

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»  
(повне найменування вищого навчального закладу)

Навчально-науковий інститут інформаційних технологій і робототехніки  
(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))

Кафедра автоматики, електроніки та телекомунікацій  
(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

## Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи

магістр

(ступінь вищої освіти)

на тему Розробка та дослідження системи керування установки прес-ножиць

Виконав: студент б курсу, групи 601мМЕ  
спеціальності 141 «Електроенергетика,  
електротехніка та електромеханіка»  
(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

Баликов О.С.

(прізвище та ініціали)

Керівник Кожушко Г.М.

(прізвище та ініціали)

Рецензент Кислиця С.Г.

(прізвище та ініціали)

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»  
Інститут Навчально-науковий інститут інформаційних технологій та  
робототехніки  
Кафедра Автоматики, електроніки та телекомунікацій  
Ступінь вищої освіти Магістр  
Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

**ЗАТВЕРДЖУЮ**  
**Завідувач кафедри**  
**автоматики, електроніки та**  
**телекомунікацій**  
\_\_\_\_\_ О.В. Шефер  
“ 03 ” вересня 2022 р.

## **З А В Д А Н Н Я** **НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

**Баликову Олександрю Сергійовичу**

**1. Тема проекту (роботи) «Розробка та дослідження системи керування установки прес-ножиць».**

Керівник проекту Кожушко Г.М., д.т.н., професор

Затверджена наказом вищого навчального закладу від “12” серпня 2022 року № 544фа.

**2. Строк подання студентом проекту (роботи) 07.12.2022 р.**

**3. Вихідні дані до проекту (роботи) номінальне зусилля різу - 1260 кН; число ходів ножа за хвилину не більше 14; найбільші розміри пазів, що пробиваються (довжина x ширина x товщина) - 100 x 85 x 16 мм; найбільші розміри оброблюваного кола (діаметр) - 67 мм; потужність електроприводу – 15 кВт.**

**4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Технологічний процес різання металу. Аналіз прес-ножиць як об'єкту модернізації. Опис функціонування базової принципової схеми. Розрахунок параметрів прес-ножиць. Вибір електродвигуна прес-ножиць. Розробка структурної схеми силового каналу електроприводу. Розрахунок параметрів елементів структурної схеми силового каналу електроприводу. Розрахунок граничних характеристик розімкнутої системи перетворювач – двигун. Синтез і аналіз лінеаризованої САК. Вибір перетворювача частоти. Вибір контролера. Вибір комунікаційної апаратури. Розробка алгоритму роботи системи.**

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

1. Технологічна схема роботи прес-ножиць.

2. Дослідження роботи електропривода в статичному режимі роботи.

3. Дослідження контуру струму САК електроприводом прес-ножиць.
4. Дослідження контуру потокозчеплення САК електроприводом прес-ножиць.
5. Дослідження контуру швидкості з інерційним зворотнім зв'язком САК електроприводом прес-ножиць.
6. Дослідження контуру швидкості з ПІ-регулятором САК електроприводом прес-ножиць.
7. Дослідження відпрацювання контуром швидкості збурюючих впливів.
8. Схема підключення системи керування електроприводом прес-ножиць.
9. Алгоритм роботи установки прес-ножиць.

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Пор. №	Назва етапів магістерської роботи	Термін виконання етапів роботи			Примітка (плакати)
1	Технологічний процес різання металу. Аналіз прес-ножиць як об'єкту модернізації	12.10.22		10%	Пл. 1
2	Опис функціонування базової принципової схеми	15.10.22		20%	Пл. 2
3	Розрахунок параметрів прес-ножиць. Вибір електродвигуна прес-ножиць	27.09.22	I	30%	Пл. 3
4	Розробка структурної схеми силового каналу електроприводу	02.11.22		40%	Пл. 4
5	Розрахунок параметрів елементів структурної схеми силового каналу електроприводу	12.11.22		50 %	Пл. 5
6	Розрахунок граничних характеристик розімкненої системи перетворювач – двигун	24.10.22	II	60%	Пл. 6
7	Синтез і аналіз лінеаризованої САК	30.11.22		70%	Пл. 7
8	Вибір перетворювача частоти. Вибір контролера	02.12.22		80%	Пл. 8
9	Вибір комунікаційної апаратури. Розробка алгоритму роботи системи	05.12.22		90%	Пл. 9
10	Оформлення магістерської роботи	07.12.22	III	100%	

Магістрант \_\_\_\_\_ Баликов О.С.  
( підпис ) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи \_\_\_\_\_ Кожушко Г.М.  
( підпис ) (прізвище та ініціали)

## ЗМІСТ

	стор.
<b>ВСТУП</b>	6
<b>РОЗДІЛ 1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА</b>	
1.1 Технологічний процес різання металу	8
1.2 Аналіз видів механізмів прес-ножиць	9
1.3 Аналіз прес-ножиць як об'єкту модернізації	14
1.4 Опис функціонування базової принципової схеми	18
<b>РОЗДІЛ 2 КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА</b>	
2.1 Розрахунок параметрів прес-ножиць	21
2.2 Попередній вибір електродвигуна за потужністю	23
2.3 Вибір електродвигуна прес-ножиць	23
2.4 Вибір типу перетворювача та способу регулювання швидкості	28
2.5 Розробка структурної схеми силового каналу електроприводу	29
2.6 Розрахунок параметрів елементів структурної схеми силового каналу електроприводу	30
2.7 Розрахунок граничних характеристик розімкненої системи перетворювач – двигун	33
2.8 Синтез і аналіз лінеаризованої САК	41
2.8.1 Структурна схема лінеаризованої безперервної САК ЕП частотно – регульованого асинхронного електроприводу з векторним керуванням	41
2.8.2 Оптимізація контуру струму з інерційним зворотним зв'язком та ПІ-регулятором	43
2.8.3 Оптимізація контуру поточозчеплення з інерційним зворотним зв'язком	48
2.8.4 Оптимізація контуру швидкості з інерційною зворотною зв'язком	53
2.8.5 Оптимізація контуру швидкості з ПІ – регулятором	57
2.8.6 Відпрацювання контуром швидкості збурюючих впливів	63
2.9 Структурна схема нелінійної САК частотно-регульованого асинхронного електроприводу з векторним керуванням	68

2.9.1 Розрахунок статичних характеристик електроприводу з векторним керуванням	70
2.9.2 Розрахунок САК потокозчеплення	71
2.9.3 Розрахунок статичних характеристик частотно-регульованого однозонного асинхронного електроприводу з векторним керуванням	73
2.9.4 Режим стабілізації струму	77
<b>РОЗДІЛ 3 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА</b>	
3.1 Вибір перетворювача частоти	83
3.2 Вибір програмованого логічного контролера	85
3.3 Вибір комунікаційної апаратури	88
3.4 Розробка алгоритму роботи системи	92
<b>ВИСНОВКИ</b>	<b>95</b>
<b>ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ</b>	<b>96</b>
<b>ДОДАТКИ</b>	

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Сучасні пресові цехи є складними виробничими комплексами, оснащеними різноманітним механічним та електричним обладнанням, обслуговування якого потребує чіткого дотримання правил безпеки та норм виробничої санітарії. Безперервність технологічного процесу вимагає одночасного виконання різних за характером операцій. Виконання цих операцій суворо регламентовано у часі як графіком виконання виробничого плану, так і за умовами безпеки. Висока інтенсивність виробництва забезпечує високу інтенсивність праці персоналу пресових цехів. Більшість обладнання пресових цехів має автоматичні та напівавтоматичні системи керування і продовжують працювати незалежно від виробничої ситуації, що склалася. Це також вимагає швидкого та правильного втручання обслуговуючого персоналу. Чіткі знання і дотримання правил безпеки необхідні обслуговуючому персоналу для оперативного проведення ремонту устаткування, що вийшло з ладу.

Одним з енергоємним обладнанням в пресовому цеху є прес-ножиці. Прес-ножиці призначені для різання листа, різання сортового металу та преса для пробивання отворів. Всі ці механізми змонтовані на одній станині та мають загальний привід. Механізм керування повзуном сортових та листових ножиць важільний, керування диروطробивним пресом важільне або педальне. При різанні важливо (щоб уникнути подвійного зрізу), щоб глибина впровадження ножів у метал не перевищувала  $V_4$  висоти перерізу, що розрізається, особливо у разі різання високопластичних металів або заготовок, підігрітих до високої температури. Щоб запобігти утворенню тріщин на торцях (внаслідок крихкості деяких сталей), вдаються до підігріву заготовок. В холодну ріжуть вуглецеві сталі, що містять до 0,5% вуглецю. На якість різки впливає і швидкість впровадження ножів у метал, для вуглецевих сталей краще підвищена швидкість, а для легувальних сталей знижена. У зв'язку з

цим необхідно приділити значну увагу для розробки нових енергозберігаючих та точних систем керування електроприводом прес-ножиць.

Метою магістерської роботи є розробка та дослідження системи керування установки прес-ножиць, а саме впровадження сучасної енергозберігаючої системи керування електроприводом на базі мікроконтролера.

Об'єктом магістерської роботи є установка прес-ножиць.

Предметом магістерської роботи є дослідження можливості впровадження сучасної енергозберігаючої технології керування електроприводом установки прес-ножиць на базі мікроконтролера.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати наступні завдання:

- виконати огляд технологічного процесу різання металу;
- виконати аналіз прес-ножиць як об'єкту модернізації;
- описати функціонування базової принципової схеми та виявити недоліки електромеханічної системи;
- вибрати електропривод установки прес-ножиць;
- розрахувати параметри елементів структурної схеми силового каналу електроприводу та граничних характеристик розімкнутої системи перетворювач – двигун;
- здійснити синтез і аналіз лінеаризованої САК;
- оптимізувати САК електроприводом установки прес-ножиць.

Для вирішення поставлених завдань в роботі використана методика, що включає в себе методи теорії автоматичного керування та методи математичного моделювання на ПК.

## РОЗДІЛ 1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

### 1.1 Технологічний процес різання металу

Різання металу – одне з найдавніших мистецтв, що практикувалися в кам'яному столітті, але різання металів було неможливе до 18-го століття, та його детальне вивчення розпочалося близько ста років тому. Це «процес, метою якого є видалення листового або сортового металу, на частини та заготовки за допомогою різального інструменту». Цей процес є основою всієї металообробної галузі. Різні типи різання обов'язковим чином застосовуються також у ремонті та обслуговуванні будь-якої механічної та навіть електронної техніки. На сьогоднішній день різання металу представлена кількома методами із застосуванням спеціального обладнання. Кожен із варіантів відрізняється своїми особливими якостями та властивостями, та застосування того чи іншого методу обробки металу потребує деяких знань даних методик. Для невеликих робіт в різанні можуть використовуватися ручні інструменти, включаючи ручні ножиці та ножівки для різання металу до бажаної форми. Цей метод різання краще всього підходить для проектів, в яких використовуються гнучкіші метали, такі як алюміній більш тонкого калібру. Використання ручних інструментів для різання металу не рекомендується, якщо метал необхідно розрізати на дуже маленькі шматочки, тому що сила, необхідна для різання металу, може просто зламати його, замість того, щоб розрізати його по призначенню. Для більших проектів або проектів, у яких використовуються більш товсті або міцніші метали, ручне різання не завжди практичне [8].

Основні елементи, залучені до цього процесу:

- металевий блок (заготівля);
- ріжучий інструмент;
- верстат;
- ріжуча рідина;

- швидкість різання (первинний рух);
- подача (вторинний рух);
- мікросхеми;
- поверхнева обробка.

Основними умовами успішного різання металу є:

- відносний рух між роботою та різальним інструментом;
- матеріал інструменту повинен бути твердішим за робочий матеріал;
- гостра ріжуча кромка ріжучого інструменту;
- первинний рух (швидкість різання);
- вторинний рух (ріжуча подача).

Основними недоліками процесу є втрата матеріалу у вигляді мікросхеми.

## **1.2 Аналіз видів механізмів прес–ножиць**

Кривошипні ножиці. Кривошипні ножиці відносяться до обладнання, призначеного для розділових операцій та є основним технологічним обладнанням для різання листа, прокату, труб та скрапу. Відомі і інші способи різання. Вогневий спосіб різання досить продуктивний, проте не забезпечує чистоти кромки; різання на дискових пилках, хоч і дає хорошу точність і чистоту різання, але малопродуктивна. Ламку на холодноломах застосовують для одержання заготовок великих перерізів. До недоліків цього процесу можна віднести додаткові витрати часу на попередню розмітку та операцію надрізування. Різання за допомогою лазерів ще не одержало застосування в промисловості. За допомогою випромінювання лазера можна виконувати отвори у найбільш твердих та крихких матеріалах. Для обробки твердих матеріалів застосовують різання ультразвуком. Продуктивність цього методу невелика [2].



Рисунок 1.1 – Кривошипні ножиці

Кривошипні ножиці можна підрозділити на ножиці з одним і двома кривошипами (відповідно ножиці однокривошипні і двокривошипні). Ножиці листові із похилим ножем є двокривошипними. Інші ножиці відносяться до однокривошипних. Це висічні (листові) ножиці, ножиці для різання заготовок (звичайної та підвищеної точності), алігаторні ножиці (різання скрапу). Комбіновані прес-ножиці мають три виконавчі механізми та служать для різання сортового прокату, листів, смуг, а також для пробивання отворів. Для різання труб використовують спеціальні ножиці.

Комбіновані ножиці. Для різання листового, сортового та фасонного прокату, а також виробництва зарубок застосовують комбіновані ножиці. Комбіновані ножиці називають прес-ножицями, якщо вони мають діропробивний прес [8].

Прес-ножиці призначені для різання листа, різання сортового металу та преса для пробивання отворів. Станина зварна одностійкова складається з основного листа, посиленого накладками, ребрами та задньою кришкою. Між основним листом та задньою кришкою поміщаються повзун та балансир. Основний лист має два поздовжні пази для проходу листової сталі при обрізанні кромки і розрізанні. Привод від індивідуального електродвигуна через пасову передачу, маховик та одноступінчасту зубчасту передачу до ексцентрикового валу. Маховик пасової передачі виконаний без струмків під

пас. Повзун сортових та листових ножиць, а також зарубочного пристрою приводиться в рух через шатун. У середній частині повзуна є виріз, у якому кріпиться рухома ножова плита, а праворуч у нижній частині - гнізда для кріплення ножів листових ножиць та зарубочного пристрою. Повзун гойдається на осі між направляючими вкладками, регульованими болтами. Повзун у вихідне положення повертається та утримується в ньому пружиною та тягою. Повзун діропробивного преса прямокутної форми. У нижній частині повзуна до пуансонодержателя кріпиться пуансон. На столі діропробивного преса кріпиться стійка, в яку встановлюється матриця. Повзун діропробивного преса наводиться в рух через шатун і балансир, що коливається. Зарубковий пристрій ножиць є вирубний штамп гільйотинного типу. Конструкція прес-ножиць дозволяє різати кутовий метал під кутом  $45^\circ$ . Для різання двотаврових балок та швелерів, а також куточків машина забезпечена спеціальними ножами, які постачаються за особливим замовленням. Під час різання під кутом матеріал закріплюється за допомогою упору, що встановлюється на певний кут [6].



Рисунок 1.2 – Комбіновані ножиці

Листові та сортові ножиці забезпечені гвинтовими притисками для запобігання віддачі матеріалу, що розрізається. На прес-ножицях для точного

пробивання отворів передбачено механізм центрування, який дозволяє точно опускати повзун з пуансоном на намічене місце. Включення листових та сортових ножиць, а також зарубочного пристрою проводиться одночасно, диروطробивного преса – окремо. Електросхема забезпечує роботу ножиць як на одиночних, так і на безперервних ходах.

Ножиці гільйотинні, або гільйотина, являють собою спеціальний верстат, що використовується з метою різання та розкривання металевого матеріалу (листового). Листи металу можуть відрізнятиса за товщиною. Дане обладнання здатне функціонувати, різати та розкрюювати метал різної товщини із збереженням високого рівня точності. Як правило, гільйотинні ножиці класифікуються за механізмом керування. Класифікація заснована на особливостях пристрою та функціонування ножової балки. Таким чином гільйотинні ножиці поділяються на [8]:

- ручні;
- пневматичні;
- гідравлічні;
- механічні;
- електромеханічні;
- автоматичні (з ЧПК);
- комбіновані.



Рисунок 1.3 – Гільйотинні ножиці

Влаштування роботи ножової балки у автоматичних гільйотинних ножиць є певною програмою обладнання (верстата) з ЧПК. У випадку з ручними ножицями гільйотинами –це спеціальна педаль.

Ручні та пневматичні гільйотини – найпростіший тип ковальсько-пресового обладнання. Вони використовуються для прямолінійного різання металевих листів, а також гуми та пластмаси. Ручні гільйотинні ножиці досить прості в експлуатації і мають невеликі габарити. Їхня компактність дозволяє легко вибрати місце для встановлення обладнання. Вони дозволять економити електроенергію, оскільки вони споживають електрику. В основі роботи приводу лежить важільно-пружинна система. Однак ручні гільйотини не можна застосовувати для різання особливо міцних матеріалів.

Механічні гільйотинні ножиці є досить надійними. Крім того, цей тип гільйотин характеризується невеликим споживанням електроенергії. Функціонування (пересування) ножа визначається карданним валом. У механічних гільйотинних ножицях маховик приводиться в дію двигуном. Експлуатація механічних гільйотин проста і не викликає труднощів. Особлива конструкція зварної рами дозволяє значно знизити навантаження.

Гільйотинні ножиці гідравлічного типу є масивною конструкцією. Завдяки цьому, а також задній лінійці існує можливість високої точності різку. Обладнання цього типу має спеціальні циліндри, які дозволяють фіксувати матеріал по всій довжині різку. При цьому зазор між лезами можна регулювати механічним способом. Деякі гільйотинні ножиці мають на увазі встановлення ЧПУ у своєму пристрої. Це дає можливість збільшити швидкість функціонування гільйотини та зберігати в пам'яті параметри різання великої кількості металу [6].

Гільйотинні ножиці з електромеханічним приводом не тільки прості у використанні, але й дозволяють досягти високої продуктивності та точності різання за допомогою регулювання положення ножів.

Найчастіше споживачі вибирають гідравлічні гільйотинні ножиці з ручним чи автоматичним регулюванням зазору між ножами. Даний тип

гільйотинних ножиць простий в експлуатації, а також передбачає різання як листового металу, так і стрижнів.

Автоматичні гільйотинні ножиці мають автоматичну систему керування. Верстат дозволяє виконувати різні програми, вибирати параметри різання, зберігати налаштування у пам'яті машини.

Прес ножиці 5224 комбіновані можуть знайти застосування на машинобудівних, ремонтних та інших заводах, при експлуатації в кліматичних зонах з помірним і холодним кліматом (виконання УХЛ), сухим і вологим тропічним кліматом. Практично всі виробники пропонують прес-ножиці, оснащені пультом керування можна задавати час операції, їх послідовність та число. Такий верстат якнайкраще підходить для роботи в напруженому режимі: він відмінно покаже себе протягом трьох змін на день. Відрізка смуг може здійснюватись під різними кутами без попередньої розмітки. У зв'язку зі своїми достоїнствами прес-ножиці можуть застосовуватися не тільки на виробництві, а й у будівництві та там, де потрібна утилізація металобрухту. Деталі надто великих габаритів потрібно попередньо пресувати [2].

### **1.3 Аналіз прес-ножиць як об'єкту модернізації**

Прес – ножиці комбіновані (рис. 1.4) призначені для відрізки смуги, відрізки прокату до 1000 мм за упором, відрізки куточка, кола, швелера, двотавра; пробивання пазів трикутної та прямокутної форми; пробивання отворів круглої, прямокутної, квадратної та будь-якої іншої форми.

Всі операції проводяться на тому самому верстаті, що забезпечує гнучку та економічну обробку прокату у великому машинобудівному виробництві, на будівельних майданчиках, а також у будь-якій ремонтній майстерні. Конструкція прес-ножиць і безліч варіантів додаткового оснащення дозволяють використовувати прес – ножиці для обробки прокату різного профілю і різних параметрів.

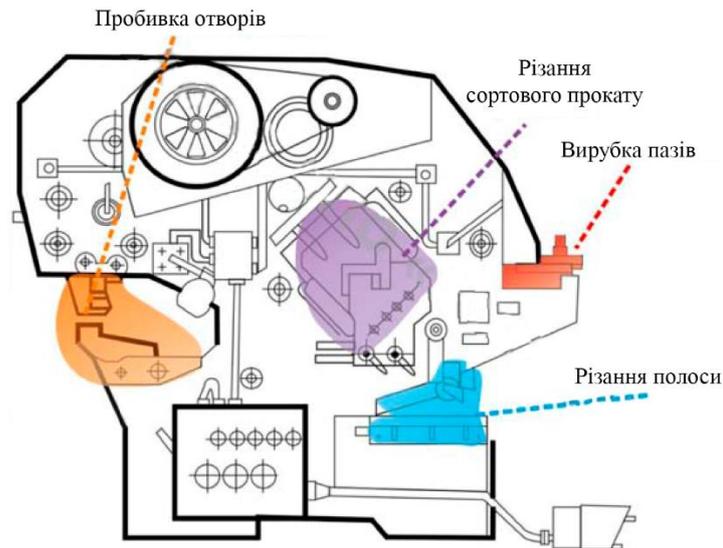


Рисунок 1.4 – Загальний вигляд прес-ножиць комбінованих НГ 5224

На рисунку 1.5 наведена кінематична схема прес-ножиць.

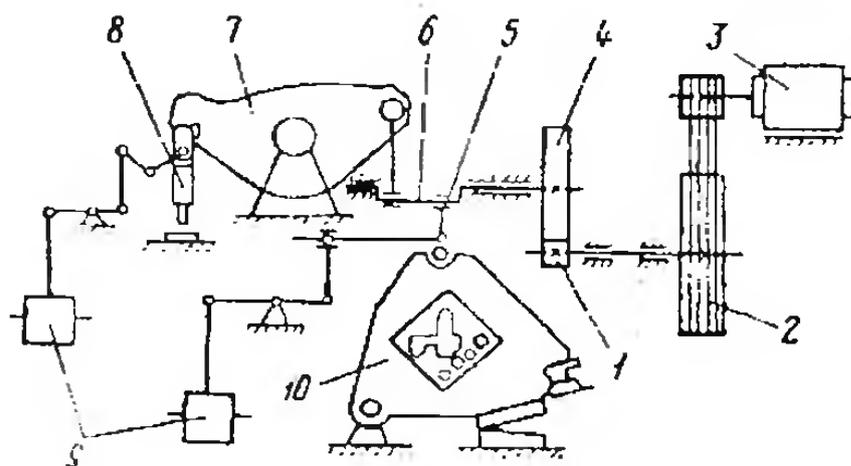


Рисунок 1.5 – Схема кінематична прес-ножиць НГ5224

1 – вал-шестерня; 2 – маховик; 3 – електродвигун; 4 – колесо зубчасте;  
5 – шатун; 6 – вал; 7 – балансир; 8 – повзун преса; 9 – електромагніт; 10 – повзун  
сортополосів секції

Привод прес-ножиць здійснюється від електродвигуна 3 через клинопасову передачу, маховик 2 і одноступінчасту передачу 1, 4 до ексцентрикового валу 6. Зубчаста пара 1, 4 прямозуба, циліндрична. Рух на повзун 10 сортополосової секції передається через балансир 7 і западаючий

камінь. Включення та вимикання виконавчих механізмів здійснюється через систему важелів, пов'язаних з одного боку з шатуном і западаючим каменем, з другого боку – з електромагнітами 9. Вал-шестерня:  $z_1=14$  – ширину обода 80 мм і з сталі 35Л.

Станина (рис. 1.6) складається з двох листів – переднього 3 завтовшки 50 мм і заднього 7 завтовшки 50 мм і заднього 7 завтовшки 2 мм, зварених між собою з використанням проставок та ребер. У станині виконані розточування для встановлення в них вісі 2 гойдання балансиру, вісі 9 повзуна сортової секції, бронзових втулок 13, 14 під вал-шестірню. Крім того, в стінках станини виконані вікна 5, в які заводять і кріплять за допомогою упорів 4, 6 нерухомі інструментальні плити. Зазор між ними регулюється вкладишами 11, 12 в які входять прокладки 10. Гвинтами в спеціальному гнізді кріпиться ніж 8 для відрізки смуги і листа. З боку зліва на станину приварюється плита 1, на якій кріпиться прес преса для пробивання отворів [6].

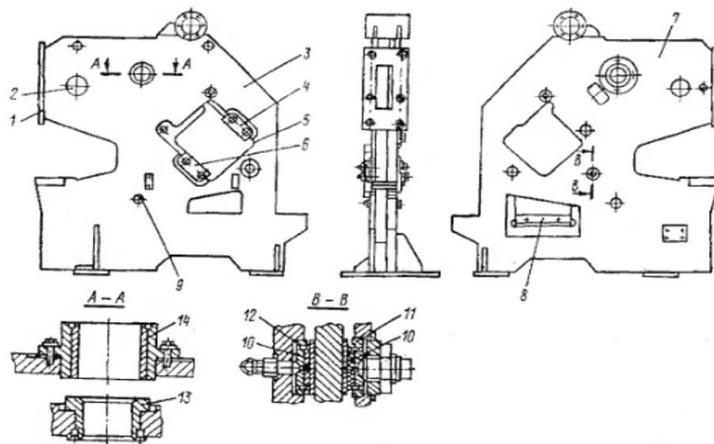


Рисунок 1.6 – Станина комбінованих ножиць

Повзун 9, пов'язаний через западний шатун 5 і під'ятник з ексцентриковим валом 3, хитається на вісі 1 між направляючими вкладишами, регульованими болтами. У вихідне положення повзун повертається і утримується пружиною 2 з тягою 4. У середній частині повзуна є виріз, в якому кріпиться рухома плита, праворуч в нижній частині – гнізда для кріплення ножів для відрізки смуги інструменту для пробивання пазів.

Для зменшення тертя між ексцентриковим валом та вкладишем 12 встановлені бронзові вкладиші 10 та 11.

Основні технічні дані прес-ножиць наведені у таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Технічні дані прес-ножиць

Найменування параметру	НГ5222	НГ5223	НГ5224
Найбільші розміри смуги, що обробляється (товщина x ширина), мм	16 x 150	18 x 190	28 x 200
Найбільші розміри оброблюваного кола (діаметр), мм	45	50	67
Найбільші розміри куточка під 90°, мм	125 x 125 x 12	125 x 125 x 14	160 x 160 x 20
Найбільші розміри куточка під 45°, мм	90 x 90 x 9	100 x 100 x 10	125 x 125 x 14
Найбільші розміри швелера, номер профілю	5..18У	5..18аУ	5..30У
Найбільші розміри двотавру, номер профілю	10..18	10..18	10..30
Найбільший діаметр отвору, що пробивається, мм	30 x 16	32 x 16	40 x 25
Найбільші розміри пазів, що пробиваються (довжина x ширина x товщина), мм	70 x 65 x 10	80 x 65 x 10	100 x 85 x 16
Число ходів ножа за хвилину не більше	18	17	14
Найбільша довжина листів, що розрізаються, по задньому упору, мм	70..1000	70..1000	130..1000
Номінальне зусилля різку, кН	560	630	1250
Електродвигун, кВт	5,5	5,5	10

На рисунку 1.7 наведено схему сортосмужного повзуна.

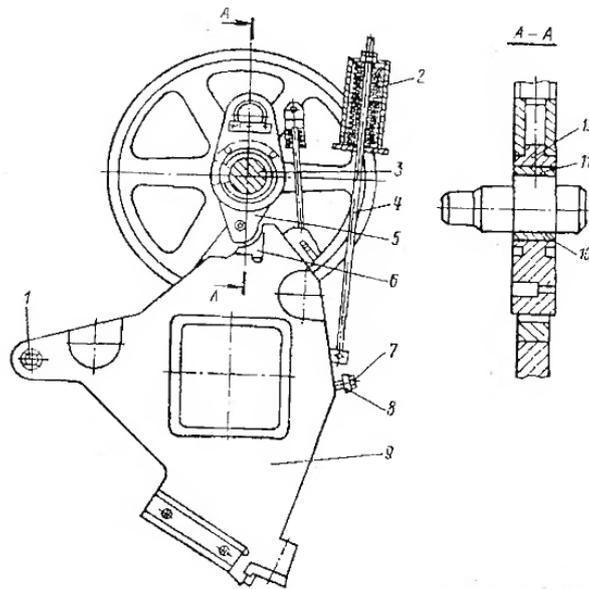


Рисунок 1.7 – Повзун сортосмушний комбінованих ножиць

#### 1.4 Опис функціонування базової принципової схеми

На рисунку 1.8 представлена електрична принципова схема базової системи.

Для підготовки до роботи:

- автоматичним вимикачем QF1 підключіть електросхему прес-ножиць до цехової мережі живлення. При цьому на дверцятах шафи загориться біла сигнальна лампа «Мережа»;

- перемикач SA1 встановіть у положення, що відповідає обраній для роботи секції. При цьому загориться лампочка HL6 «Сортова секція» або HL9 «Секція пробивання отворів»;

- натисканням кнопки SB3 запустить електродвигун головного приводу. При цьому включається магнітний пускач KM1, який став на саможивлення і підключивши електродвигун M1 до силового ланцюга, включає сигнальну лампу HL2 синього кольору «Головний привід».

Опис роботи схеми електричної принципової. Електродвигун вимикається кнопками «Загальний стоп» SB1 та SB2, розташованими на станині.

Робота схеми у режимі «Одиночні ходи». Перемикач SA1 встановить для роботи на одній із секцій: «Сортова секція» або «Секція для пробивання отворів».

При встановленні перемикача в положення «Сортова секція» загоряється лампочка HL6 зеленого кольору, підключається ланцюг увімкнення електромагніта YA2, в керування підключаються контакти SQ3.1 і SQ6.2 кінцевих вимикачів.

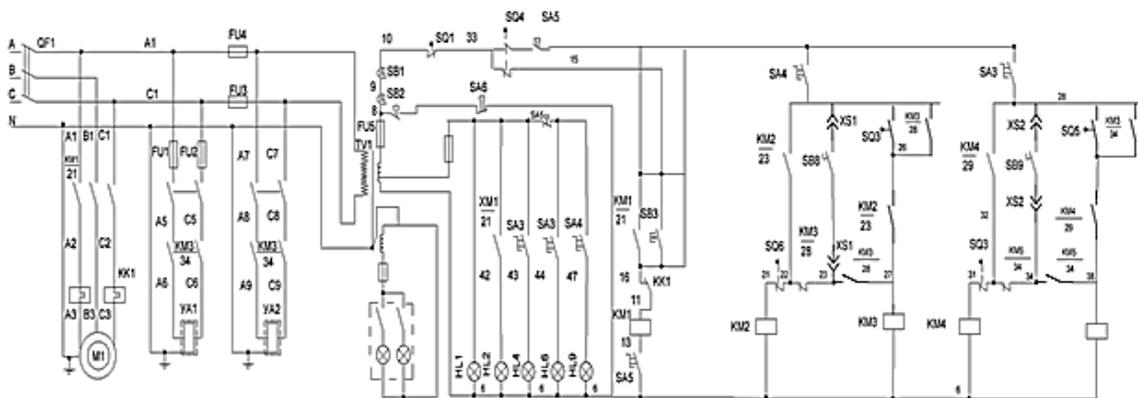


Рисунок 1.8 – Електрична принципова схема прес – ножиць

Для увімкнення електромагніту YA2 необхідно натиснути на кнопку SB8. При цьому, якщо повзун знаходиться у верхньому положенні кінцевий вимикач SQ6.2 увімкне магнітний пускач KM4 по ланцюгу 16-23-27-6 який перебуватиме у включеному стані на час впливу керуючого кулачка на штовхач кінцевого вимикача SQ6. Магнітний пускач KM4 підключає випрямний пристрій A1, включає магнітний пускач KM3 по ланцюгу 16-23-27-6. Магнітний пускач KM3 стає на саможивлення ланцюгом 16-23-27-6 і включає електромагніт YA2 у форсованому режимі.

При досягненні повзуном нижньої точки кінцевий вимикач SQ3.1 розриває ланцюг живлення магнітного пускача KM2, який своїми контактами відключає електромагніт YA2.

При поверненні повзуна у верхнє становище шатун під дією пружини назад повертається у вихідне положення.

Щоб повторно увімкнути повзун, натисніть кнопку SB8.

При тривалому натисканні на педаль безперервного ходу виходить, так як при русі повзуна кінцевий вимикач SQ3 розриває ланцюг магнітного пускача КМ2, який у свою чергу відключає електромагніт УА2 і розриває ланцюг саможивлення магнітного пускача КМ3. Але магнітний пускач КМ3 залишається включеним ланцюгом 16-17-27-6 та своїм контактом по ланцюгу 17-32 забороняє включення магнітного пускача КМ2. Після відпускання кнопки магнітний пускач КМ3 відключається і готова схема до повторного циклу.

На даний час у пресових цехах експлуатується електропривод з релейно-контактним керуванням. Недоліком такого приводу є:

- неможливість плавного регулювання швидкості двигуна;
- механічне зношування елементів схеми керування;
- громіздкість конструкції.

Щоб усунути наведені вище недоліки, пропонується встановити частотний привід. Перевагами такого приводу є можливість плавного регулювання швидкості двигуна, відбувається заміна релейно-контактною схеми керування двигуна на мікропроцесорні пристрої, які, в свою чергу, є більш надійними. Встановивши регульований електропривод на прес-ножицях, можна знизити річні енерговитрати.

#### Висновок за розділом

Проаналізували процес різання металу. Виявили, що прес-ножиці є одним з найпопулярніший метод різання металу. Комбіновані прес-ножиці є найбільш популярним типом. Провели огляд системи керування електроприводом прес-ножиць та виявили недоліки у його роботі.

## РОЗДІЛ 2 КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА

### 2.1 Розрахунок параметрів прес-ножиць

У таблиці 2.1 наведено технічні дані прес-ножиць.

Таблиця 2.1–Технічні дані прес-ножиць

Радіус кривошипу, м	R=0,125
Довжина шатуна, м	l=1,2
Перекриття ножів, м	h <sub>0</sub> =15
Зазор між ножами, мм	h <sub>3</sub> =110
Кут нахилу ножа, град	β=4°
Передаточне число редуктора	i=37
Товщина розрізуючого металу, мм	h=10
Число різів за хвилину	z=4

Для побудови спрощеної навантажувальної діаграми  $M_c=f(t)$  необхідно знайти співвідношення між кутом і лінійним переміщенням ножа.

Кутова швидкість кривошипа при русі для заданої швидкості двигуна:

$$W_K = \frac{\pi \cdot n_{дв}}{30 \cdot i}; \quad (2.1)$$

Заданою швидкістю обертання двигуна  $n_{дв}=500$  об/хв, тоді:

$$W_K = \frac{3,14 \cdot 500}{30 \cdot 37} = 1,698 \frac{1}{с}.$$

Середня швидкість кривошипу за його повний оборот:

$$W_{ксер} = \frac{W_K}{2}; \quad (2.2)$$

$$W_{ксер} = \frac{1,698}{2} = 0,849 \frac{1}{с}.$$

Тоді час роботи кривошипу складе:

$$t_p = \frac{2 \cdot \pi}{W_{\text{ксер}}}; \quad (2.3)$$

$$t_p = \frac{2 \cdot 3,14}{0,849} = 7,4 \text{ с.}$$

Швидкість переміщення ножа:

$$v_n = v_1 \cdot \sin(\alpha) = W_{\text{ксер}} \cdot R \cdot \sin(\alpha) = W_{\text{ксер}} \cdot R \cdot \sin(W_{\text{ксер}} \cdot t); \quad (2.4)$$

Переміщення ножа:

$$L_{(H)}(t) = v_n \cdot t; \quad (2.5)$$

На рисунку 2.1 представлена залежність швидкості та переміщення ножа.

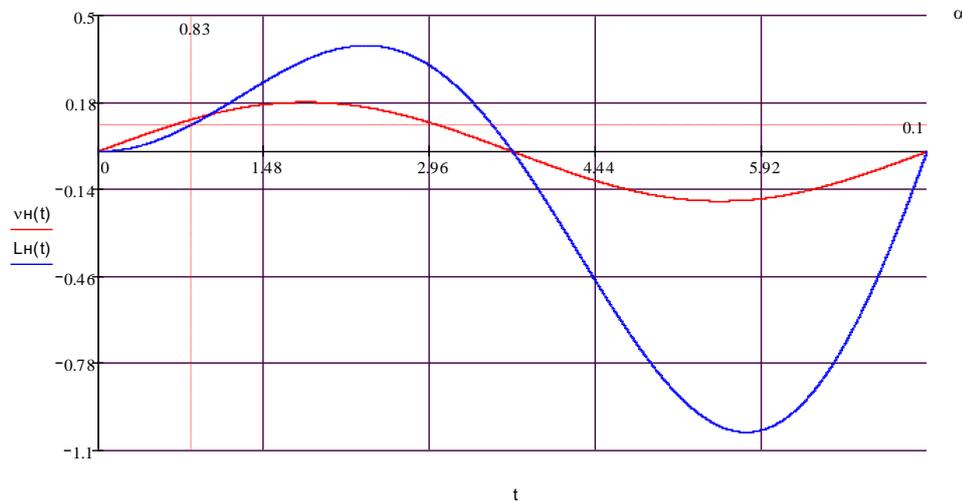


Рисунок 2.1 – Залежності швидкості  $v_H$  та переміщення ножа  $L_H$  від часу

Користуючись графіком  $L_H(t)$ , визначаємо час переміщення ножа на відстань  $h_3 - h = 110 - 10 = 100$  мм,  $t_1 = 0,83$  с.

Час циклу:

$$t_{\text{Ц}} = \frac{60}{z}; \quad (2.6)$$

$$t_{\text{Ц}} = \frac{60}{4} = 15 \text{ с.}$$

Час паузи:

$$t_o = t_{\text{ц}} - t_p; \quad (2.7)$$

$$t_0 = 15 - 7,4 = 7,6 \text{ с.}$$

Відносна тривалість включення:

$$ТВ = \frac{t_p}{t_{\pi}} \cdot 100; \quad (2.8)$$

$$ТВ = \frac{7,4}{15} \cdot 100 = 49,33\%.$$

## 2.2 Попередній вибір електродвигуна за потужністю

Послідовність ідентичних циклів роботи, кожен з яких включає час роботи при незмінному навантаженні, за яким машина не нагрівається до температури, що встановилася, і час стоянки, за який машина не охолоджується до температури навколишнього середовища [5].

$$P_{s3} = P_{s1} = \sqrt{1 + \frac{(1 - \frac{ТВ}{100}) \cdot \beta}{(1 - K_0) \cdot \frac{ТВ}{100}}}; \quad (2.9)$$

де:  $P_{s1}$  – номінальна потужність двигуна;

$K_0$  – відношення втрат холостого ходу до втрат при навантаженні;

ТВ – відносна тривалість включення, %.  $ТВ = 49,33\%$ .

Підставивши значення в формулу отримаємо:

$$P_{s3} = 10 \sqrt{1 + \frac{(1 - \frac{49,33}{100}) \cdot 0,55}{(1 - 0,14) \cdot \frac{49,33}{100}}} = 12,87 \text{ кВт.}$$

## 2.3 Вибір електродвигуна

1. В якості приводного двигуна вибираємо електродвигун загальнопромислового призначення серії 4А.  $P_{\text{потр}} = 15 \text{ кВт.}$

2. Технічні дані електродвигуна.

Технічні дані електродвигуна [11] зведені до таблиці 2.2, параметри схеми заміщення – до таблиці 2.3.

Таблиця 2.2 – Технічні дані електродвигуна

Типо-розмір	$n_0$ , [ $\frac{\text{об}}{\text{хв}}$ ]	$U_{\text{лпн}}$ , [В]	$P_{\text{дв.н}}$ , [Вт]	При номінальному навантаженні			$S_K$
				$S_H$ %	$\cos \varphi$ %	$\eta_H$ %	
4A180S4Y3	1500	380	$15 \cdot 10^3$	0,02	0,88	0,885	0,14

Продовження таблиці 2.2

$J_{\text{дв}}$ [ $\text{кг} \cdot \text{м}^2$ ]	$k_{\text{II}} = \frac{M_{\text{пуск}}}{M_H}$	$k_M = \frac{M_{\text{макс}}}{M_H}$	$k_{\text{дв}} = \frac{I_{\text{пуск}}}{I_H}$	Ступінь захисту
0,19	1,4	1	7,5	IP

Таблиця 2.3 – Параметри схеми заміщення електродвигуна

R, в.о.	X, в.о.	X, в.о.	R, в.о.	X, в.о.
0,047	0,085	4	0,25	0,13

3. Визначення додаткових параметрів двигуна та параметрів схеми заміщення.

Синхронна кутова частота обертання [10]:

$$\omega_0 = \frac{\pi \cdot n_0}{30}; \quad (2.10)$$

$$\omega_0 = \frac{3,14 \cdot 1500}{30} = 157,08 \text{ рад/с.}$$

Номінальна частота обертання двигуна:

$$n_{\text{дв.н}} = (1 - S_H) \cdot n_0; \quad (2.11)$$

$$n_{\text{дв.н}} = (1 - 0,08) \cdot 1500 = 1470 \text{ об.хв.}$$

Або:

$$\omega_{\text{дв.н}} = (1 - S_H) \cdot \omega_0; \quad (2.12)$$

$$\omega_{\text{дв.н}} = (1 - 0,02) \cdot 157,08 = 153,9 \text{ рад/с.}$$

Номинальний момент двигуна:

$$M_{\text{дв.н}} = \frac{P_{\text{дв}} \cdot 10^3}{\omega_{\text{дв.н}}}; \quad (2.13)$$

$$M_{\text{дв.н}} = \frac{15 \cdot 10^3}{153,9} = 97,4 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Номинальна фазна напруга та номинальний фазний струм статора.

Для визначення номинального фазного струму потрібно знати схему з'єднання обмоток статора. Якщо з'єднання обмоток невідоме, то при розрахунку слід прийняти з'єднання Y.

$$U_{1\sigma i} = \frac{U_{1\sigma}}{\sqrt{3}}; \quad (2.14)$$

$$U_{1\sigma i} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 219,3 \approx 220 \text{ В}.$$

$$I_{1\sigma i} = I_{1\sigma i} = \frac{D_{\sigma i}}{3 \cdot U_{1\sigma i} \cdot \cos \varphi_i \cdot \eta_i}; \quad (2.15)$$

$$I_{1\sigma i} = I_{1\sigma i} = \frac{15 \cdot 10^3}{3 \cdot 220 \cdot 0,88 \cdot 0,885} = 29,18 \text{ А}.$$

$$I_{1\text{макс}} = k_{\text{лн}} \cdot I_{1\text{н}}; \quad (2.16)$$

$$I_{1\text{макс}} = 7,5 \cdot 29,18 = 218,8 \text{ А}.$$

Критичний момент двигуна на природній характеристиці:

$$M_k = k_m \cdot M_{\text{двн}}; \quad (2.17)$$

$$M_k = 1 \cdot 97,4 = 97,4 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Пусковий момент двигуна при прямому пуску:

$$M_{\text{двпуск}} = k_p \cdot M_{\text{двн}}; \quad (2.18)$$

$$M_{\text{двпуск}} = 1,4 \cdot 97,4 = 136,4 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Схема заміщення асинхронного двигуна для фази наведена на рисунок

2.2.

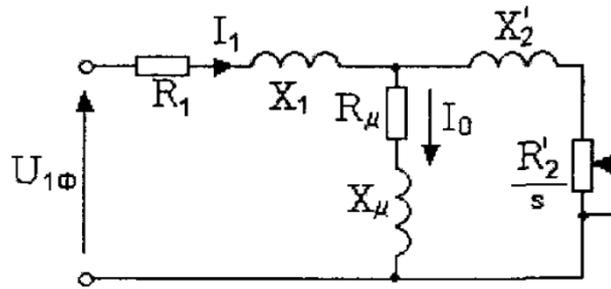


Рисунок 2.2 – Схема заміщення асинхронного двигуна

Активний опір статора обмотки [12]:

$$R_1 = R_1' \cdot \frac{U_{1\sigma i}}{I_{1\sigma i}}; \quad (2.19)$$

$$R_1 = 0,047 \cdot \frac{220}{29,18} = 0,354 \text{ Ом.}$$

Індуктивний опір розсіювання обмотки статора:

$$X_1 = X_1' \cdot \frac{U_{1\sigma i}}{I_{1\sigma i}}; \quad (2.20)$$

$$X_1 = 0,085 \cdot \frac{220}{29,18} = 0,641 \text{ Ом.}$$

Індуктивність статора обмотки, обумовлена потоком розсіювання:

$$L_{1\sigma} = \frac{X_{1\sigma}}{2 \cdot \pi \cdot f_{1H}}; \quad (2.21)$$

$$L_{1\sigma} = \frac{0,641}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 2 \cdot 10^3 \text{ Гн.}$$

Приведений до обмотки статора активний опір обмотки ротора:

$$R_2' = R_2'' \cdot \frac{U_{1\sigma i}}{I_{1\sigma i}}; \quad (2.22)$$

$$R_2' = 0,038 \cdot \frac{220}{29,18} = 0,286 \text{ Ом.}$$

Приведений до обмотки статора індуктивний опір розсіювання обмотки ротора:

$$X'_{2\sigma} = X''_2 \cdot \frac{U_{1\sigma i}}{I_{1\sigma i}}; \quad (2.23)$$

$$X'_{2\sigma} = 0,13 \cdot \frac{220}{29,18} = 0,98 \text{ Ом.}$$

Наведена індуктивність обмотки ротора обумовлена потоком розсіювання:

$$L_{2\sigma} = \frac{X'_{2\sigma}}{2 \cdot \pi \cdot f_{1H}}; \quad (2.24)$$

$$L_{2\sigma} = \frac{0,98}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 3,2 \cdot 10^{-3} \text{ Гн.}$$

Індуктивний опір короткого замикання за номінального режимі:

$$X_{кн} = X_{1\sigma} + X'_{2\sigma}; \quad (2.25)$$

$$X_{кн} = 0,641 + 0,98 = 1,62 \text{ Ом.}$$

Індуктивний опір контуру намагнічування (головний індуктивний опір):

$$X_{\mu} = X'_{\mu} \cdot \frac{U_{1\sigma i}}{I_{1\sigma i}}; \quad (2.26)$$

$$X_{\mu} = 4 \cdot \frac{220}{29,18} = 30,15 \text{ Ом.}$$

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

$$L_{\mu} = \frac{X_{\mu}}{2 \cdot \pi \cdot f_{1H}}; \quad (2.27)$$

$$L_{\mu} = \frac{30,15}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,096 \text{ Гн.}$$

Струм холостого ходу:

$$I_o = \frac{E_1}{X_{\mu}}; \quad (2.28)$$

$$I_o = \frac{220,8}{30,15} = 7,32 \text{ А.}$$

де:  $E_1$  – ЕРС – гілки намагнічування, наведена потоком повітряного зазору в обмотці статора у номінальному режимі.

$$E_1 = \sqrt{(U_{1\Phi H} \cdot \cos \varphi_H - I_{1\Phi H} \cdot R_1)^2 + U_{1\Phi H} \cdot \sin \varphi_H - I_{1\Phi H} \cdot X_{1\sigma}}^2; \quad (2.29)$$

$$E_1 = \sqrt{(219,3 \cdot 0,88 - 29,18 \cdot 0,354)^2 + 219,3 \cdot 0,22 + 29,18 \cdot 0,641)^2} = 220,8 \text{ В.}$$

## 2.4 Вибір типу перетворювача та способу регулювання швидкості

За вибраним АД розраховуємо:

Необхідна максимальна вихідна частота інвертора:

$$f_{EIAEV} = 50 \cdot \frac{\omega_{YIIAEN}}{\omega_o \cdot (1 - S_K)}; \quad (2.30)$$

$$f_{EIAEV} = 50 \cdot \frac{178,01}{157,08 \cdot (1 - 0,14)} = 65,8 \text{ Гц.}$$

Необхідна мінімальна вихідна частота інвертора:

$$f_{EIEI} = 50 \cdot \frac{\omega_{YIIAEI}}{\omega_o}; \quad (2.31)$$

$$f_{EIEI} = 50 \cdot \frac{8,9}{157,08} = 2,83 \text{ Гц.}$$

Вибираємо перетворювач за номінальним (довго допустимому) струму  $I_{IH}$  та максимальному (короткочасно допустимому) струму  $I_{EIIIAK} = I_{IH} \cdot k_{dt}$ , де  $k_{dt}$  – коефіцієнт допустимого навантаження інвертора за струмом, за такими умовами [5]:

в одно-зонному електроприводі:

$$I_{IH} \geq I_{1IH} \cdot \frac{M_{CMAKC}}{M_{ДВH}}; \quad (2.32)$$

$$I_{IH} \geq 29,18 \cdot \frac{40}{97,4} = 11,97 \text{ А.}$$

Приймаємо  $I_{IH} = 17 \text{ А.}$

$$I_{\text{МАКС}} \geq I_{\text{ЛН}} \cdot \frac{M_{\text{ЕПМАКС}}}{M_{\text{ДВН}}}; \quad (2.33)$$

$$I_{\text{МАКС}} \geq 29,18 \cdot \frac{104}{97,4} = 31,14 \text{ А.}$$

Приймаємо  $I_{\text{МАКС}}=35 \text{ А.}$

Вибір способу керування швидкістю двигуна в системі перетворювач частоти – асинхронний двигун.

Основні способи керування асинхронним частотно-регульованим електроприводом та його показники наведено у таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 – Способи керування в системі ПЧ-АД та їх показники

№	Спосіб керування	Діапазон регулювання швидкості	
		Розімкнена система	Замкнута система з датчиком швидкості
1	Скалярне керування, закон керування $U_1/f_1=\text{const}$	до 10	до 100
2	Скалярне керування, закон керування $U_1/f_1=\text{const}$ компенсація моменту та ковзання	10–15	100–120
3	Векторне керування	до 100 (з внутрішньою моделлю)	до 1000

Приймаємо спосіб керування – векторне керування без датчика швидкості, діапазон регулювання 20.

## 2.5 Структурна схема силового каналу електроприводу

У силовий канал електроприводу входять [10]:

– перетворювач частоти, що виконує функцію електричного перетворювача;

– електродвигун, який виконує функцію електромеханічного перетворювача;

– механічна система, яка виконує функцію механічного перетворювача.

При вирішенні завдань аналізу та синтезу регульованих асинхронних електроприводів зазвичай застосовуються моделі електродвигуна, складені на базі узагальненої електричної машини та виконані в нерухомій або обертовій двофазній системі координат (x, y). На рисунку 2.2 наведено структурну схему силового каналу безперервної лінеаризованої системи перетворювач – асинхронний електродвигун у нерухомій системі координат, а на рисунку 2.3 – у обертовій системі координат, орієнтованій за результуючим вектором потокозчеплення ротора. Вхідними величинами структурних схем є складові напруги керування перетворювача  $U_{упx}$  та  $U_{упy}$ , а вихідною величиною – кутова швидкість двигуна  $\omega$ . Структурні схеми рисунків 2.3 та 2.4 характеризуються наступними проміжним координатами:  $U_{1x}, U_{1y}, I_{1x}, I_{1y}, \Psi_{2x}, \Psi_{2y}$  – складові напруги, струм статора та потокозчеплення ротора в ортогональній системі координат (x, y);  $M_{ав ем}$  – електромагнітний момент двигуна, Н·м.

## 2.6 Розрахунок параметрів елементів структурної схеми силового каналу електроприводу

### Розрахунок параметрів перетворювача

Максимальне значення коефіцієнта посилення перетворювача:

$$k_i = \frac{\sqrt{2} \cdot U_{1\phi}}{U_{кпмакс}}; \quad (2.34)$$

де:  $U_{кпмакс} = 10 \text{ В}$  – максимальне значення напруги керування.

$$k_i = \frac{\sqrt{2} \cdot 220}{16} = 31,113.$$

Еквівалентна постійна часу перетворювача:

$$O_E = \frac{0,5}{f_i}; \tag{2.35}$$

де:  $f_i$  – несуча частота інвертора, Гц.

$$O_E = \frac{0,5}{8} = 0,06\text{с.}$$

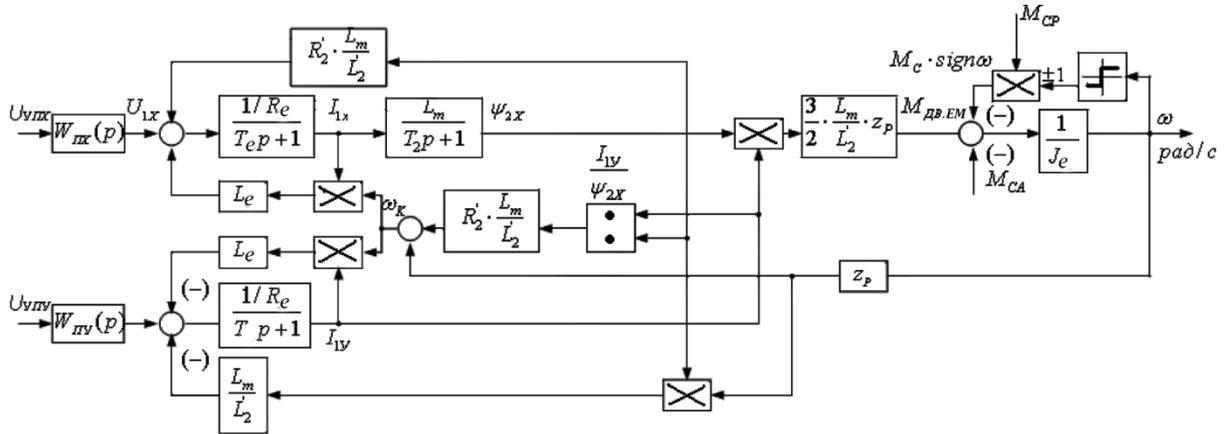


Рисунок 2.3 – Структурна схема силового каналу системи перетворювач – асинхронний електродвигун нерухомої двофазної системи координат, орієнтованої за результуючим вектором потокозчеплення ротора

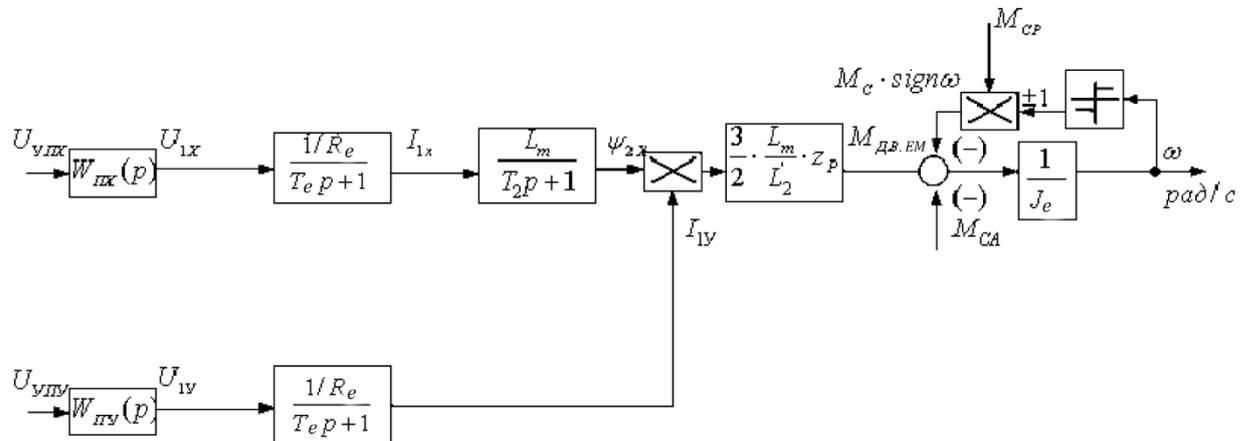


Рисунок 2.4 – Структурна схема силового каналу системи перетворювач – асинхронний електродвигун нерухомої двофазної системи координат, орієнтованої за результуючим вектором потокозчеплення ротора, при компенсації внутрішніх зворотних зв'язків

### Розрахунок параметрів двигуна

Еквівалентна індуктивність обмоток:

– статора:

$$L_1 = L_{1\sigma} + L_\mu; \quad (2.36)$$

$$L_1 = 2,04 \cdot 10^{-3} + 0,096 = 0,098 \text{ Гн.}$$

– ротора:

$$L_2 = L_{2\sigma} + L_\mu; \quad (2.37)$$

$$L_2 = 3,12 \cdot 10^{-3} + 0,096 = 0,099 \text{ Гн.}$$

Коефіцієнт розсіювання:

$$\sigma = 1 - \frac{L_\mu^2}{L_1 + L_2}; \quad (2.38)$$

$$\sigma = 1 - \frac{0,096^2}{0,098 + 0,099} = 0,052.$$

Еквівалентний опір:

$$R_E = R_1 + R_2 \cdot \frac{L_\mu^2}{L_2^2}; \quad (2.39)$$

$$R_E = 0,354 + 0,286 \cdot \frac{0,096^2}{0,099^2} = 0,623 \text{ Ом.}$$

Електромагнітні постійні часу:

$$T_E = \frac{\sigma \cdot L_1}{R_E}; \quad (2.40)$$

$$T_E = \frac{0,052 \cdot 0,098}{0,623} = 8,12 \cdot 10^{-3} \text{ с.}$$

$$T_2 = \frac{L_2}{R_2}; \quad (2.41)$$

$$T_2 = \frac{0,099}{0,286} = 0,346 \text{ с.}$$

Розрахунок параметрів механічної системи

Момент інерції механізму:

$$J_M = 0,5 \cdot J_{\text{ДВ}}; \quad (2.42)$$

$$J_M = 0,5 \cdot 0,19 = 0,095 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Еквівалентний момент інерції приводу:

$$J_E = J_{ДВ} + J_M; \quad (2.43)$$

$$J_E = 0,19 + 0,095 = 0,285 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

## 2.7 Розрахунок граничних характеристик розімкнутої системи перетворювач – двигун. Перевірка забезпечення заданої області роботи електроприводу

При векторному керуванні магнітний потік підтримується: в першій зоні постійним  $\Psi_{2X} = \Psi_{2XH} = \text{const}$ , а в другій зоні послаблюється відповідно до залежності  $\Psi_{2X} = \Psi_{2XH} \cdot \frac{\omega}{\omega_n}$ .

### Розрахунок механічних характеристик

Механічна характеристика  $M=f(S)$  системи перетворювач частоти–асинхронний двигун розраховується для частоти  $f_1=f_{1H}=50$  Гц за виразом [12]:

$$M(S) = \frac{3 \cdot U_{1\Phi H}^2 \cdot R_2}{\omega_0 \cdot S \cdot \left[ (X_{KH})^2 + \left( R_1 + \frac{R_2}{S} \right)^2 + \left( \frac{R_1 \cdot R_2}{S \cdot X_\mu} \right)^2 \right]}; \quad (2.44)$$

$$M(S) = \frac{3 \cdot 220^2 \cdot 0,286}{157,08 \cdot S \cdot \left[ (1,621)^2 + \left( 0,354 + \frac{0,286}{S} \right)^2 + \left( \frac{1,621 \cdot 0,286}{S \cdot 30,15} \right)^2 \right]};$$

Задаємося ковзанням у межах  $S = 0,01, 0,02, \dots, 1$  і розраховуємо характеристику  $\omega = f(M)$ , де:  $\omega = \omega_0 \cdot (1 - s)$ , яка показана рисунку 2.5.

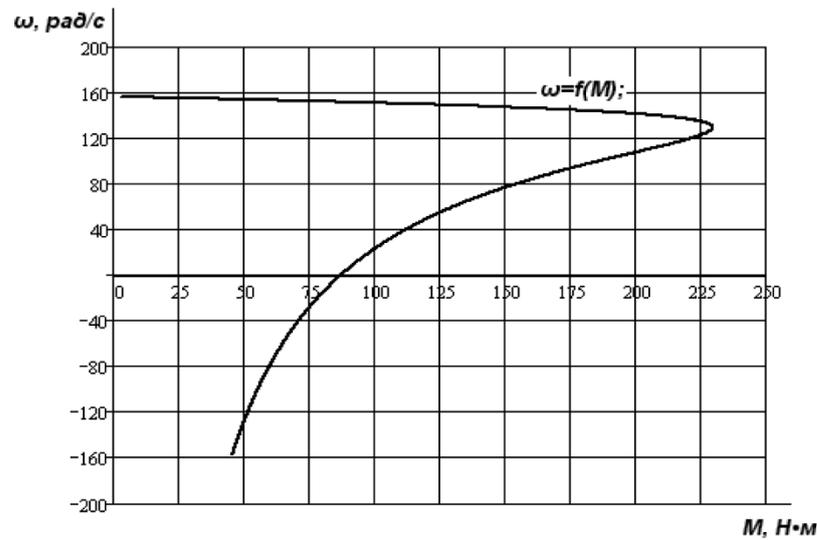


Рисунок 2.5 – Механічна характеристика системи перетворювач частоти–асинхронний двигун

#### Розрахунок електромеханічних характеристик

Електромеханічна характеристика  $I_1(S)$  розімкнутої системи перетворювач частоти–асинхронний двигун розраховується для значення частоти  $f_1=f_{1H}=50$  Гц за виразом [11]:

$$I_1(S) = \sqrt{I_0^2 + I_2^2(S) + 2 \cdot I_0 \cdot I_2(S) \cdot \sin\varphi_2(S)}; \quad (2.45)$$

$$I_1(S) = \sqrt{1,01^2 + 14,89^2 + 2 \cdot 1,01 \cdot 14,89 \cdot 0,11} = 15,04 \text{ A.}$$

де:

$$I_2(S) = \frac{U_{1\text{фн}}}{\pm \sqrt{(R_1 + \frac{R_2}{S})^2 + (X_{\text{кн}})^2 + (\frac{R_1 + R_2}{S + X_\mu})^2}}; \quad (2.46)$$

$$I_2(S) = \frac{220}{\pm \sqrt{(0,354 + \frac{0,286}{5})^2 + (1,621)^2 + (\frac{0,354 + 0,286}{5 + 30,15})^2}} = 14,89 \text{ A.}$$

$$\sin\varphi_2(S) = \frac{X_{\text{кн}}}{\sqrt{(R_1 + \frac{R_2}{S})^2 + (X_{\text{кн}})^2}}; \quad (2.47)$$

$$\sin \varphi_2(S) = \frac{1,621}{\sqrt{(0,354 + \frac{0,286}{5})^2 + (1,621)^2}} = 0,11.$$

$$I_0 = \frac{U_{1\text{фн}}}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_\mu)^2 \cdot f_2'}}; \quad (2.48)$$

$$I_0 = \frac{220}{\sqrt{0,354^2 + (0,641 + 30,15)^2 \cdot 50}} = 1,01 \text{ A}.$$

За результатами розрахунку будується електромеханічна характеристика  $\omega(I_1)$  (рис 2.6).

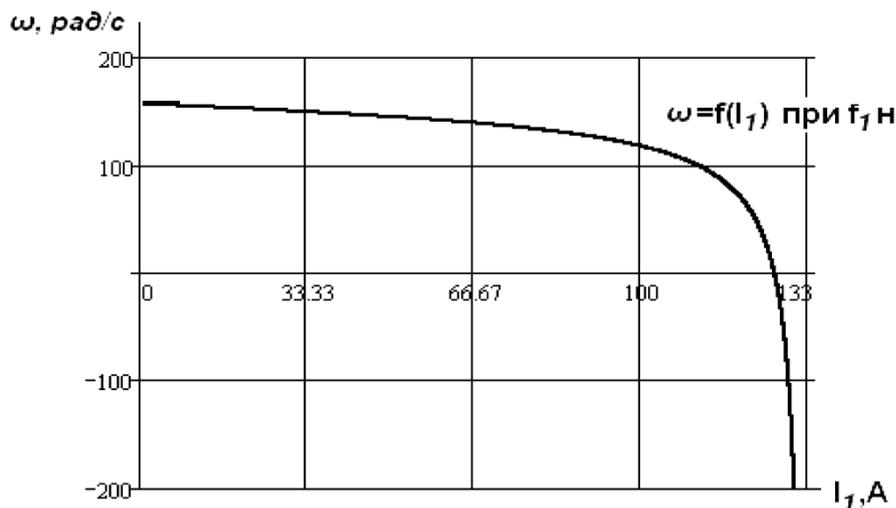


Рисунок 2.6 – Електромеханічна характеристика розімкнутої системи перетворювач частоти – асинхронний двигун

#### Визначення заданої сфери роботи

1. На отримане сімейство механічних характеристик  $M(\omega)$  наносяться граничні характеристики для тривалого та короточасного режимів роботи:

$$-M_{\text{СМІН}}(\omega) = 6;$$

$$-M_{\text{СМАКС}}(\omega) = 40;$$

$$-M_{\text{ЕПМАКС}}(\omega) = 104;$$

2. На отримане сімейство електромеханічних характеристик  $I_1(\omega)$  наносяться характеристика довго допустимого струму двигуна  $I_{\text{ДВДОВДОП}}(\omega)$ :

$$I_{\text{ДВДОВДОП}}(\omega) = I_{\text{ДВН}} \cdot \left(0,5 + \frac{\omega}{\omega_{\text{ДВН}}}\right); \quad (2.49)$$

$$I_{\text{ДВДОВДОП}}(\omega) = 29,18 \cdot \left(0,5 + \frac{\omega}{153,9}\right); \quad (2.50)$$

при  $\omega \leq 0,5 \cdot \omega_{\text{ДВН}}$

$$I_{\text{ДВДОВДОП}}(\omega) = 29,18.$$

при  $\omega < 0,5 \cdot \omega_{\text{ДВН}}$

3. Розраховується та будується залежність допустимого тривалого моменту електродвигуна  $I_{\text{ДВДОВДОП}}(\omega)$ .

– в зоні роботи з номінальним потоком при  $f_i \leq f_{\text{ін}}, \omega \leq (\omega_0 \cdot (1 - S_k))$ ;

$$M_{\text{ДВМАКС}}(W) = M_K \Big|_{f_n - f_{\text{ін}}}; \quad (2.51)$$

$$M_K = \frac{3 \cdot U_{\text{фн}}^2}{2 \cdot \omega_0 \cdot \left[ [R_1^2 + X_{\text{КН}}^2] \cdot \left[ 1 + \left[ \frac{R_2}{X_\mu} \right]^2 \right] \right]}; \quad (2.52)$$

$$M_K = \frac{3 \cdot 220^2}{2 \cdot 157 \cdot \left[ [0,354^2 + 1,62^2] \cdot \left[ 1 + \left[ \frac{0,286}{30,1} \right]^2 \right] \right]} = 229 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

– в зоні роботи з ослабленим потоком при  $f_i > f_{\text{ін}}, (W > (W_0 \cdot (1 - S_k)))$ :

$$M_{\text{ДВМАКС}}(\omega) = M_K \cdot \frac{\omega_0 \cdot (1 - S_k)}{\omega}; \quad (2.53)$$

$$M_{\text{ДВМАКС}}(\omega) = 229 \cdot \frac{157 \cdot (1 - 0,173)}{\omega}.$$

4. Розраховується та будується залежність допустимого тривалого струму електродвигуна  $I_{\text{ДВДОВДОП}}(\omega)$

– у зоні роботи з номінальним потоком ( $f_i \leq f_{\text{ін}}$ ):

$$I_{\text{ДВДОВДОП}}(\omega) = M_{\text{ДВН}} \cdot \left(0,5 + \frac{\omega}{\omega_{\text{ДВН}}}\right); \quad (2.54)$$

при  $\omega \leq 0,5 \cdot \omega_{\text{ДВН}}$

$$I_{\text{ДВДОВДОП}}(\omega) = 97,4 \cdot \left(0,5 + \frac{\omega}{153,9}\right).$$

$$I_{\text{ДВДОВДОП}}(\omega) = I_{\text{ДВН}}; \quad (2.55)$$

при  $0,5 \cdot \omega_{\text{ДВН}} < \omega \leq \omega_{\text{ДВН}}$

$$I_{\text{ДВДОВДОП}}(\omega) = 97,4 \text{ А.}$$

– у зоні роботи з ослабленим потоком  $f_i > f_{1н}$  з урахуванням того що двигун обраний із запасом за потужністю приймаємо [14]:

$$I_{\text{ДВДОВДОП}}(\omega) = I_{\text{ДВН}};$$

при  $\omega > \omega_{\text{ДВН}}$

$$I_{\text{ДВДОВДОП}}(\omega) = 97,4 \text{ А.}$$

Розраховується та будується залежність  $I_{\text{СМАКС}}(\omega)$  відповідна тривалого максимального навантаження  $M_{\text{СМАКС}}(\omega) = \text{const}$ . Для цього необхідно визначити відповідне  $M_{\text{СМАКС}}$  значення ковзання  $S_{T5}$ , вирішивши щодо  $S$  рівняння:

$$M_{\text{СМАКС}} = \frac{3 \cdot U_{1\text{фн}}^2 \cdot R_2}{\omega_0 \cdot S \cdot \left[ (X_{\text{КН}})^2 + \left(R_1 + \frac{R_2}{S}\right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2}{S \cdot X_{\mu}}\right)^2 \right]}; \quad (2.56)$$

$$\frac{3 \cdot 220^2 \cdot 0,286}{157 \cdot 5 \cdot \left[ (1,62)^2 + \left(0,354 + \frac{0,286}{5}\right)^2 + \left(\frac{0,354 \cdot 0,286}{5 \cdot 30,1}\right)^2 \right]} = 44.$$

і далі розрахувати значення струму  $I_{\text{СМАКС}}|_{f_n=f_{1н}}$  та швидкості

$$\omega_{05} = \omega_0 \cdot (1 - s_{05}).$$

Залежність  $I_{\text{СМАКС}}(\omega)$  розраховується за виразами:

$$I_{\text{СМАКС}}(\omega) = I_{\text{СМАКС}}|_{f_n=f_{1н}}; \quad (2.57)$$

при  $\omega \leq \omega_{T5}$

$$I_{\text{СМАКС}}(\omega) = I_{\text{СМАКС}} \Big|_{f_H=f_{1H}}; \quad (2.58)$$

при  $\omega > \omega_{T5}$

6. Розраховується та будується залежність  $I_{\text{ЕПМАКС}}(\omega)$  відповідна тривалому максимальному навантаженню  $I_{\text{ЕПМАКС}}(\omega) = \text{const}$ . Для цього необхідно визначити відповідне  $I_{\text{ЕПМАКС}}(\omega)$  значенню ковзання  $S_{T.14}$  вирішивши щодо  $S$  рівняння:

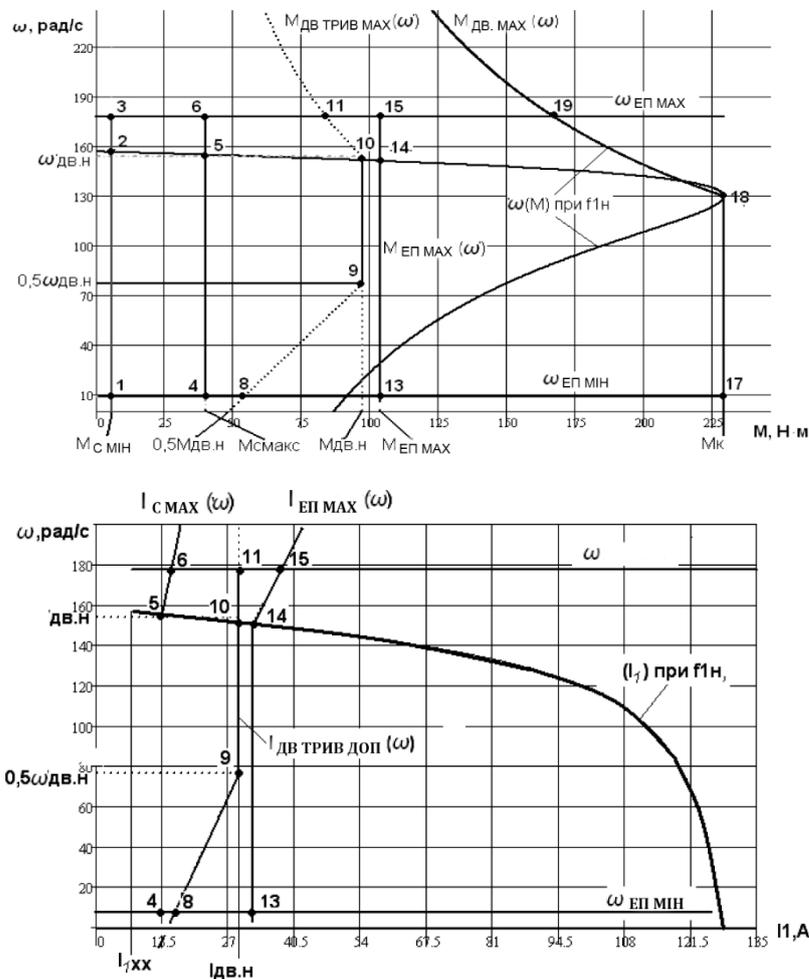


Рисунок 2.7 – а, б – відповідно механічна та електромеханічна характеристика електроприводу та навантаження при векторному керуванні

$$I_{\text{ЕПМАКС}} \frac{3 \cdot L_{10i}^2 \cdot R_2}{\omega_0 \cdot S \cdot \left[ (X_{EI})^2 + \left( R_1 + \frac{R_2}{S} \right)^2 + \left( \frac{R_1 \cdot R_2}{S \cdot X_\mu} \right)^2 \right]}; \quad (2.59)$$

$$I_{\text{ЕПМАКС}} = \frac{3 \cdot 220 \cdot 0,286}{157 \cdot 5 \cdot \left[ (1,62)^2 + \left( 0,354 + \frac{0,286}{S} \right)^2 + \left( \frac{0,354 \cdot 0,286}{S \cdot 30,1} \right)^2 \right]}$$

І далі розрахувати значення струму  $I_{\text{СМАКС}} \Big|_{f_n=f_{1n}}$  та швидкості ( $\omega_{\text{T14}} = \omega_0 \cdot (1 - S_{\text{T14}})$ ):

$$I_{\text{ЕПСМАКС}}(\omega) = I_{\text{ЕПСМАКС}} \Big|_{f_n=f_{1n}}; \quad (2.60)$$

при  $\omega \leq \omega_{\text{T14}}$

$$I_{\text{ЕПСМАКС}}(\omega) = I_{\text{ЕПСМАКС}} \Big|_{f_n=f_{1n}} \cdot \frac{\omega}{\omega_{\text{T5}}}; \quad (2.61)$$

при  $\omega > \omega_{\text{T14}}$

Перевірка правильності вибору двигуна

За результатами побудови механічних характеристик електроприводу  $\omega(I_1)$  (рис.2.7–а) перевіряється правильність вибору двигуна за моментом:

$$M_{\text{ДВДОВДОП}}(\omega) \geq M_{\text{СМАКС}}; \quad 85 \text{ Н} \cdot \text{м}(\omega) \geq 40 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

маємо

$$M_{\text{ДВСМАКС}}(\omega) \geq M_{\text{ЕПСМАКС}}; \quad 165 \text{ Н} \cdot \text{м}(\omega) \geq 104 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Отже двигун по моменту обраний правильно.

За результатами побудови електромеханічних характеристик електроприводу  $\omega(M)$  (рис.2.7–б) перевіряється правильність вибору двигуна по струму

$$I_{\text{ДВДОВДОП}}(\omega) \geq I_{\text{СМАКС}}; \quad \text{маємо } 29 \text{ А} \geq 15,5 \text{ А}.$$

Отже, двигун по струму обраний правильно.

Перевірка правильності вибору перетворювача

За результатами побудови електромеханічних характеристик електроприводу  $\omega(I_1)$  (рис.2.7–б) перевіряється правильність вибору перетворювача: у всьому діапазоні регулювання швидкості повинні виконуватися умови:

$$I_{\text{СМАК}}(\omega) \leq I_{\text{ИН}}; \quad 15,5 \text{ А} \leq 17 \text{ А.}$$

маємо

$$I_{\text{ЕПСМАК}}(\omega) \leq I_{\text{ИМАКС}}; \quad 32 \text{ А} \leq 35 \text{ А.}$$

Умови перевірки за моментом та струмом:

– у верхній частині діапазону регулювання швидкості:

$$\left. \begin{array}{l} M_{\text{T.11}} > M_{\text{T.6}} \\ M_{\text{T.19}} > M_{\text{T.15}} \\ I_{\text{T.11}} > I_{\text{T.6}} \end{array} \right\} \text{— всі умови виконуються, так як}$$

$$85 \text{ Н} \cdot \text{м} > 41 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

$$165 \text{ Н} \cdot \text{м} > 104 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

$$29 \text{ А} > 15,5 \text{ А}$$

– у нижній частині діапазону регулювання швидкості:

$$\left. \begin{array}{l} M_{\text{T.8}} \geq M_{\text{T.6}} \\ M_{\text{T.17}} \geq M_{\text{T.13}} \\ I_{\text{T.8}} \geq I_{\text{T.4}} \end{array} \right\} \text{— умови по моменту виконуються, так як}$$

$$54 \text{ Н} \cdot \text{м} \geq 41 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

$$229 \text{ Н} \cdot \text{м} \geq 104 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

$$15,5 \text{ А} \geq 13,5 \text{ А}$$

Загальні висновки щодо аналізу отриманих характеристик (рис.2.7):

– система перетворювач частоти – асинхронний двигун може забезпечити тривалу роботу в інтервалі зміни моменту навантаження від  $M_{\text{СМІН}} = 3 \text{ Н} \cdot \text{м}$  до  $M_{\text{СМАКС}} = 41 \text{ Н} \cdot \text{м}$  та заданий короткочасний момент  $M_{\text{ЕПМАКС}} = 104 \text{ Н} \cdot \text{м}$  у всьому діапазоні регулювання швидкості від  $\omega_{\text{ЕПМІН}} = 9 \text{ рад / с}$  до  $\omega_{\text{ЕПМАКС}} = 150 \text{ рад / с}$ .

– для забезпечення заданого діапазону регулювання швидкості електропривод має бути однозонний.

Для подальших розрахунків приймаємо:

$$I_{\text{ЕПМАКС}} = I_{\text{T.15}} = 39 \text{ А.}$$

## 2.8 Синтез і аналіз лінеаризованої САК

### 2.8.1 Структурна схема лінеаризованої безперервної САК ЕП частотно – регульованого асинхронного електроприводу з векторним керуванням

Структурна схема лінеаризованої безперервної САК частотно-регульованого асинхронного електроприводу з векторним керуванням наведено на рисунку 2.8.

На схемі прийнято такі позначення [5]:

$W(p)_{PC}, W(p)_{P\psi}, W(p)_{P\Omega}$  – передавальні функції регуляторів струму, потокозчеплення та швидкості;

$k_{CX} = k_{CY}$  – коефіцієнт зворотного зв'язку по струму.

$$k_{CX} = k_{CY} = \frac{U_{3C\text{МАКС}}}{I_{EP\text{МАКС}}}; \quad (2.62)$$

$$k_{CX} = k_{CY} = \frac{10}{32} = 0,313 \text{ В / А.}$$

Маємо:  $U_{3C\text{МАКС}} = 10 \text{ В.}$

$k_{\psi}$  – коефіцієнт зворотного зв'язку по потокозчепленню ротора;

$$k_{\psi} = \frac{U_{3\psi\text{МАКС}}}{\Psi_{2x}}; \quad (2.63)$$

$$k_{\psi} = \frac{10}{0,781} = 12,8 \text{ В / Вб.}$$

Маємо:  $U_{3\psi\text{МАКС}} = 10 \text{ В.}$

$$\Psi_{2\sigma} = \Psi_1 = \frac{I_{YEI}}{\frac{3}{2} \cdot Z_p \cdot \frac{L_m}{L_2} \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{I_{1H}^2 \cdot I_0^2}}; \quad (2.64)$$

$$\Psi_{2\sigma} = \Psi_1 = \frac{60,66}{\frac{3}{2} \cdot 2 \cdot \frac{0,101}{0,099} \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{17,97^2 \cdot 0,01^2}} = 0,781 \text{ А.}$$

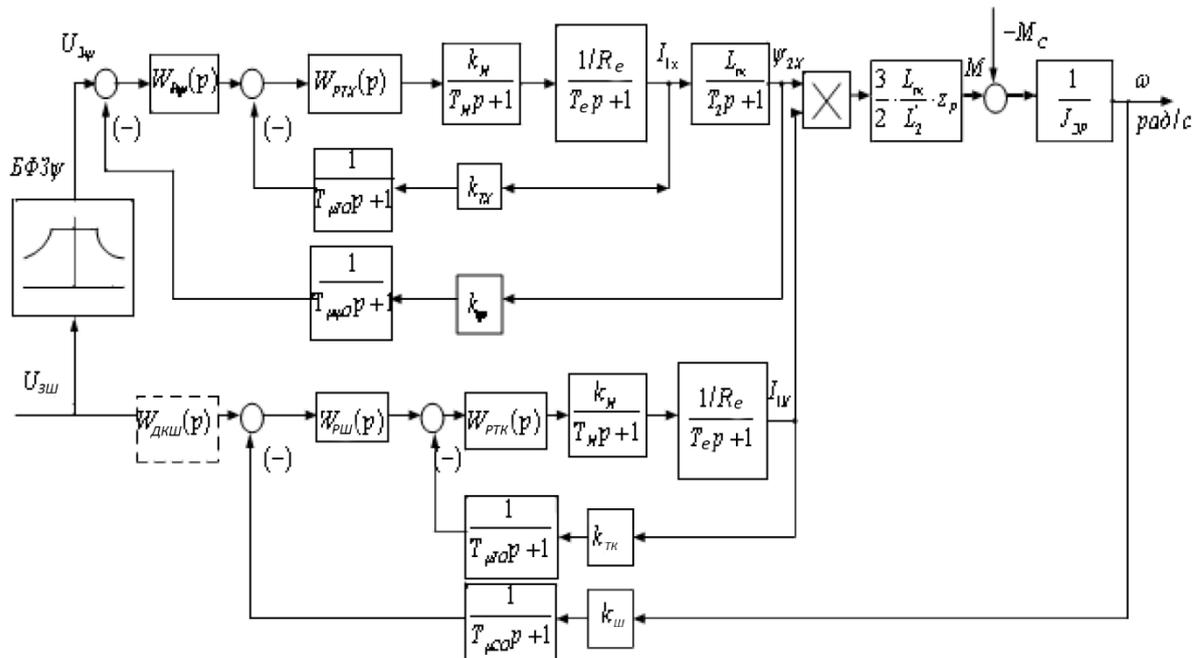


Рисунок 2.8 – Структурна схема лінеаризованої безперервної САК РЕП частотно-регульованого асинхронного електропривод з векторним керуванням

Коефіцієнт зворотного зв'язку за швидкістю:

$$k_3 = \frac{U_{3\text{СМАКС}}}{\omega_{\text{ЕПМАКС}}}; \quad (2.65)$$

$$k_3 = \frac{10}{150} = 0,066 \text{ В} \cdot \text{с} / \text{рад}.$$

Маємо:  $U_{3\text{СМАКС}} = 10 \text{ В}$ .  $f_i = 8 \text{ кГц}$ .

Період згладжування результатів вимірювання струму:

$$T_{\mu\text{ТО}} = \frac{1}{f_i} \cdot \frac{n_T}{3}; \quad (2.66)$$

$$T_{\mu\text{ТО}} = \frac{1}{8 \cdot 10^3} \cdot \frac{8}{3} = 0,000033 \text{ с}.$$

Маємо кількість вимірів  $n_T = 8$ .

Період розрахунку потокозчеплення:

$$\text{Маємо: } n_\psi > 3. \quad T_{\mu\psi 0} = \left(16 \cdot \frac{1}{f_i}\right) \cdot \frac{n_\psi}{3}; \quad (2.67)$$

$$T_{\mu c0} = \left(16 \cdot \frac{1}{8 \cdot 10^3}\right) \cdot \frac{4}{3} = 0,0027 \text{ с.}$$

Період розрахунку швидкості:

$$\text{Маємо: } n_c \geq 3. \quad T_{\mu c0} = \left(16 \cdot \frac{1}{f_i}\right) \cdot \frac{n_c}{3}; \quad (2.68)$$

$$T_{\mu c0} = \left(16 \cdot \frac{1}{8 \cdot 10^3}\right) \cdot \frac{3}{3} = 0,002 \text{ с.}$$

Контури регулювання струму, потокозчеплення та швидкості електроприводів змінного струму мають відносно велику інерційність у ланцюзі зворотного зв'язку, тому проводимо оптимізацію контурів системи частотно-регульованого електроприводу.

### 2.8.2 Оптимізація контуру струму з інерційним зворотним зв'язком та ПІ-регулятором

Структурна схема контуру струму з інерційним зворотним зв'язком та повною компенсацією внутрішнього негативного зворотного зв'язку по ЕРС двигуна наведено на рисунку 2.9.

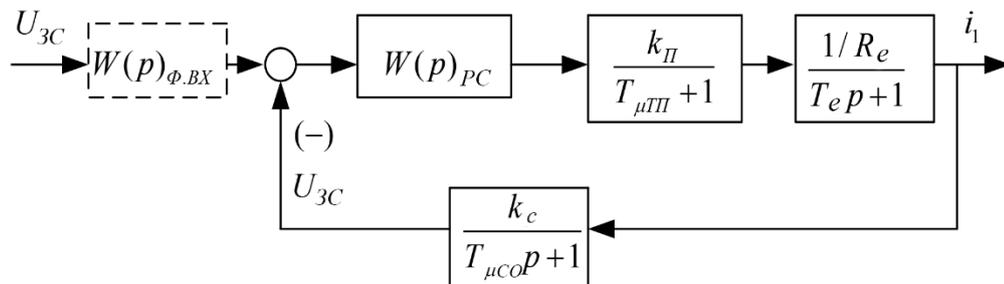


Рисунок 2.9 – Структурна схема контуру струму

На схемі рисунку 2.9 прийнято такі позначення:

$U_{zc}$  – напруга завдання на струм;

$T_{\mu ПП}$  – мала постійна часу в прямому каналі, с;

$$T_{\mu ПП} = \frac{1}{f_i}; \quad (2.69)$$

$$T_{\mu\Pi} = \frac{1}{8 \cdot 10^3} = 0,000125 \text{ с.}$$

де:  $T_{\mu\text{TO}}$  – мала постійна часу в ланцюзі зворотного зв'язку, с.

Передатна функція ПІ-регулятора струму [12]:

$$\omega_{\text{PC}}(p) = k_{\text{PC}} \cdot \frac{T_{\text{PC}} \cdot p + 1}{T_{\text{PC}} \cdot p}; \quad (2.70)$$

$$\omega_{\text{PC}}(p) = 12,62 \cdot \frac{0,008 \cdot p + 1}{0,008 \cdot p}.$$

Коефіцієнт посилення регулятора струму:

$$k_{\text{PC}} = \frac{T_E \cdot R_E}{k_i \cdot k_C \cdot a_T \cdot (T_{\mu\Pi} + T_{\mu\text{TO}})}; \quad (2.71)$$

$$k_{\text{PC}} = \frac{0,008 \cdot 0,623}{1,4 \cdot 0,313 \cdot 2 \cdot (0,000125 + 0,00033)} = 12,62.$$

де:

$$k_C = \frac{U_{3\text{CMAKC}}}{I_{\text{EIPMAKC}}}; \quad (2.72)$$

$$k_C = \frac{10}{32} = 0,313 \text{ В / А.}$$

$$U_{3\text{CMAKC}} = 10 \text{ В.}$$

$a_T=2$  – коефіцієнт оптимізації.

Постійна часу регулятора струму:

$$T_{\text{PC}} = T_E = 0,008 \text{ с.}$$

Контур струму має такі передавальні функції:

– розімкнутого контуру:

$$W(p)_{\text{PO3.C}} = \frac{1}{a_T \cdot T_{\mu\Pi} \cdot T_{\mu\text{TO}} \cdot T_{\mu\text{TE}} \cdot p^3 + a_T \cdot T_{\mu\text{TE}}^2 \cdot p^2 + a_T \cdot T_{\mu\text{TE}} \cdot p}; \quad (2.73)$$

$$W(p)_{\text{PO3.C}} = \frac{1}{3,819 \cdot 10^{-11} \cdot p^3 + 4,201 \cdot 10^{-7} \cdot p^2 + 9,167 \cdot 10^{-4} \cdot p}.$$

– замкнутого контуру:

$$\begin{aligned}
 W(p)_{\text{ЗАМ.С}} &= \frac{\frac{1}{k_C} \cdot (T_{\mu\text{ТО}} + 1)}{a_T \cdot T_{\mu\text{П}} \cdot T_{\mu\text{ТО}} \cdot T_{\mu\text{ТЕ}} \cdot p^3 + a_T \cdot T_{\mu\text{ТЕ}}^2 \cdot p^2 + a_T \cdot T_{\mu\text{ТЕ}} \cdot p + 1} \approx \\
 &\approx \frac{\frac{1}{k_T} \cdot (T_{\mu\text{ТО}} + 1)}{a_T \cdot T_{\mu\text{ТЕ}}^2 \cdot p^2 + a_T \cdot T_{\mu\text{ТЕ}} \cdot p + 1} \approx \\
 &\approx \frac{\frac{1}{0,27} \cdot (0,00033 + 1)}{4,201 \cdot 10^{-7} \cdot p^2 + 9,167 \cdot 10^{-4} \cdot p + 1};
 \end{aligned}
 \tag{2.74}$$

де:  $T_{\mu\text{ТЕ}} = T_{\mu\text{П}} + T_{\mu\text{ТО}} = 0,000125 + 0,00033 = 0,00046$

—еквівалентна мала постійний час оптимізованого контуру.

Налаштування контуру близьке до налаштування на модульний оптимум (МО) системи 2-го порядку. Контур є астатичною системою 1-го порядку з керування.

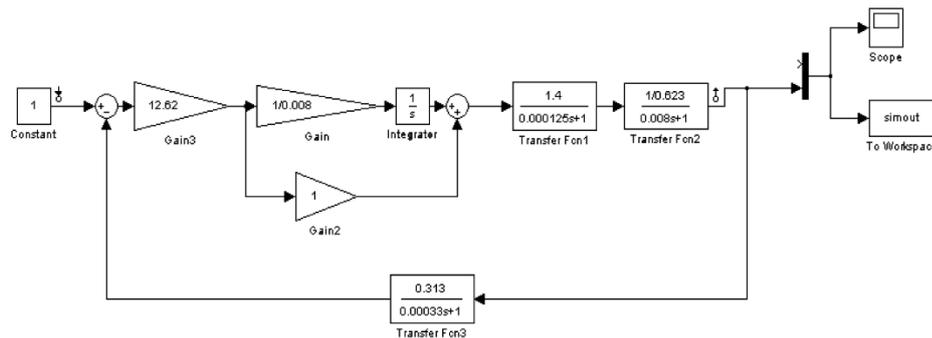


Рисунок 2.10 – Структурна схема контуру струму

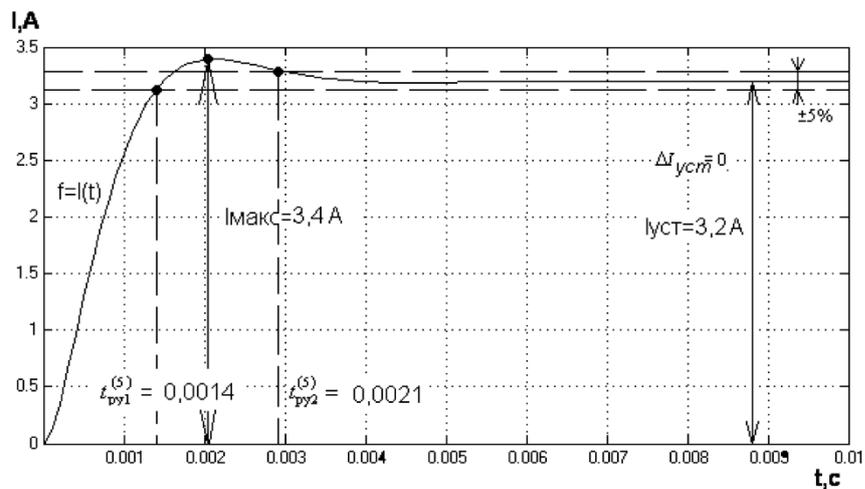


Рисунок 2.11 – Перехідна характеристика  $i(t)$  контуру струму при  $U_{\text{ЗС}} = 1 \text{ В}$

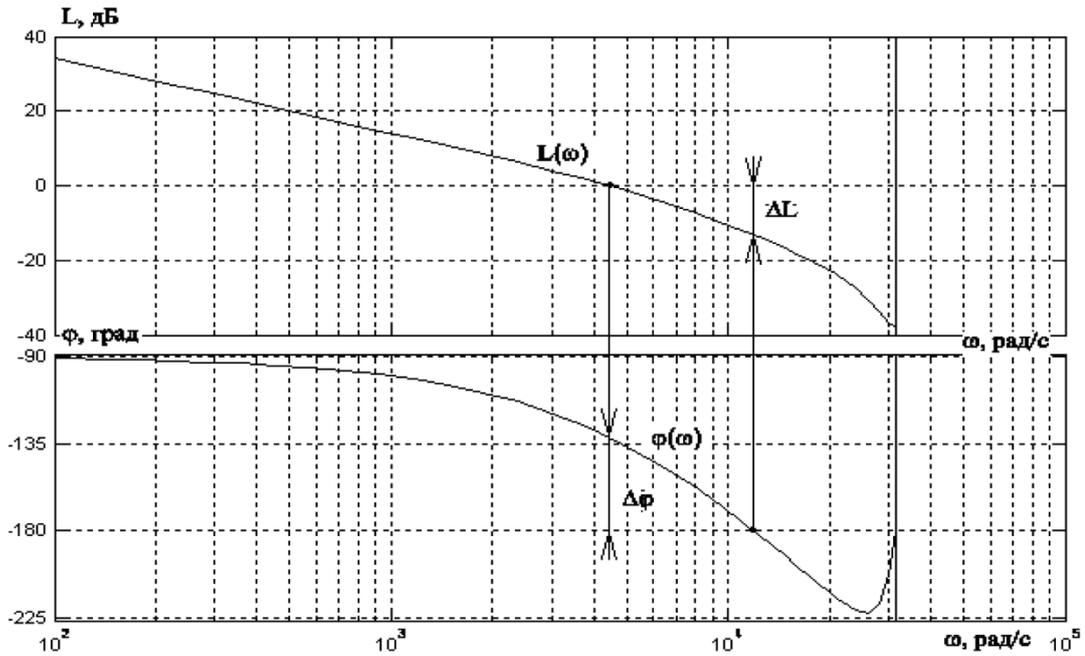


Рисунок 2.12 – Логарифмічні частотні характеристики розімкнутого контуру струму, налаштованого на МО (без фільтру на вході)

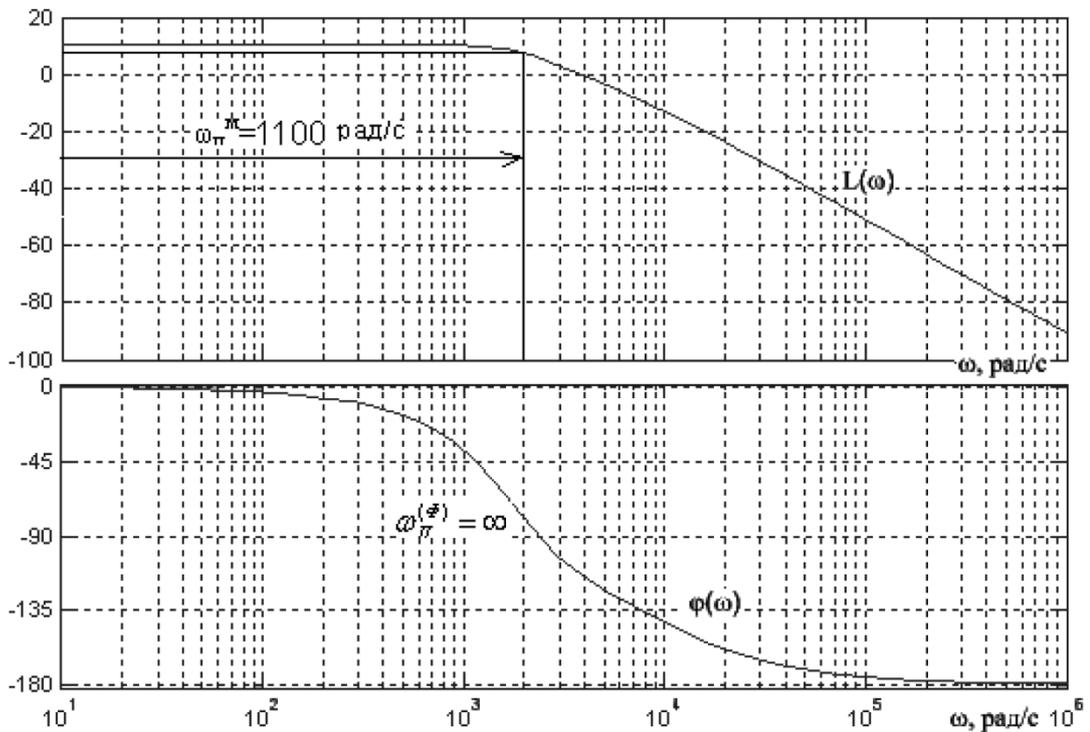


Рисунок 2.13 – Логарифмічні частотні характеристики замкнутого контуру струму, налаштованого на МО (без фільтру на вході)

При  $T_{\mu TP} \ll T_{\mu TO} = (0,000125 < 0,00033)$  очікувані показники якості роботи замкнутого контуру струму з керування без фільтра на вході:

- встановилася помилка  $\Delta I_{уст} = 0 \text{ А}$ ;
- перерегулювання  $\sigma = 6,7\%$ ;
- час першого та остаточного входження в 5% зону при відпрацюванні ступінчастого завдання;

$$t_{pk1}^{(5)} = 2,75 \cdot (T_{\mu TP} + T_{\mu TO}); \quad (2.75)$$

$$t_{pk1}^{(5)} = 2,75 \cdot (0,000125 + 0,00033) = 0,00125 \text{ с.}$$

$$t_{pk2}^{(5)} = 6 \cdot (T_{\mu TP} + T_{\mu TO}); \quad (2.76)$$

$$t_{pk2}^{(5)} = 6 \cdot (0,000125 + 0,00033) = 0,00273 \text{ с.}$$

Для замкнутого контуру

- смуга пропускання по модулю:

$$\omega_{\Pi}^{(M)} \approx \frac{0,9}{T_{\mu TP} + T_{\mu TO}}; \quad (2.77)$$

$$\omega_{\Pi}^{(M)} \approx \frac{0,9}{0,000125 + 0,00033} = 1978 \text{ рад / с.}$$

- смуга пропускання по фазі:

$$\omega_{\Pi}^{(\Phi)} = \infty$$

з характеристик (рис.2.13)  $\omega_{\Pi}^{(M)} = 1100 \text{ рад / с.}$

$$\omega_{\Pi}^{(\Phi)} = \infty.$$

Для розімкнутого контуру

З графіка, наведеного на рисунку 2.13:

- запас стійкості по модулю складає  $\Delta L = 17 \text{ дБ}$ .
- запас стійкості за фазою становить  $\Delta \varphi = 47 \text{ град}$ .

Таблиця 2.5 – Показники перехідних процесів контуру струму з ПІ-регулятором

Показники перехідних процесів			
По керуванню			
$t_{pk1}^{(5)}$	$t_{pk2}^{(5)}$	$\sigma, \%$	$\Delta I_{уст}, A$
Очікувані показники			
0,00125	0,00273	6,7	0
Результати моделювання			
0,0014	0,0021	6,4	0

Висновок: аналіз параметрів якості, наведених у таблиці 2.5 показав, що очікувані показники та результати моделювання відрізняються не значно, тому це підтверджує, що параметри контуру розраховані та обрані правильно.

### 2.8.3 Оптимізація контуру поточозчеплення з інерційним зворотним зв'язком

При оптимізації контуру поточозчеплення внутрішній оптимізований замкнутий контур струму представлений усіченою передатною функцією 1-го порядку [11]:

$$W(p)_{зам.с} \approx \frac{1}{T_c \cdot p + 1} \approx \frac{1}{0,000917 \cdot p + 1} \approx \frac{3,2}{0,000917 \cdot p + 1}; \quad (2.78)$$

де:

$$T_c = a_T \cdot T_{\mu TE} = a_T \cdot (T_{\mu ПІ} + T_{\mu ТО}); \quad (2.79)$$

$$T_T = 2 \cdot (0,000125 + 0,00033) = 0,000917 \text{ с.}$$

– еквівалентна стала часу оптимізованого контуру струму.

Структурна схема контуру поточозчеплення з інерційним зворотним зв'язком та ПІ-регулятором наведена на рисунку 2.14.

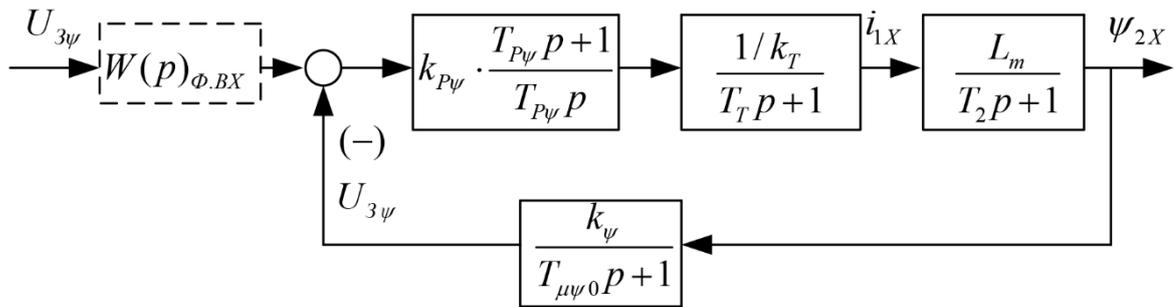


Рисунок 2.14 – Структурна схема контуру потокозчеплення з ПІ-регулятором

Передатна функція ПІ-регулятора потокозчеплення:

$$W(p)_{P\psi} = k_{P\psi} \cdot \frac{T_{P\psi} \cdot p + 1}{T_{P\psi} \cdot p} = 11,645 \cdot \frac{0,346 \cdot p + 1}{0,346 \cdot p}; \quad (2.80)$$

Коефіцієнт посилення та постійна часу регулятора потокозчеплення визначаються за виразами:

$$k_{P\psi} = \frac{T_2 \cdot k_C}{L_m \cdot k_\psi} \cdot \frac{1}{a_\psi \cdot (T_C + T_{\mu\psi 0})}; \quad (2.81)$$

$$k_{P\psi} = \frac{0,346 \cdot 0,313}{0,101 \cdot 12,808} \cdot \frac{1}{2 \cdot (0,000917 + 0,0027)} = 11,645.$$

$$k_\psi = \frac{U_{3\psi \text{МАКС}}}{\psi_H}; \quad (2.82)$$

$$k_\psi = \frac{10}{0,914} = 12,808 \text{ В / Вб.}$$

$$U_{3\psi \text{МАКС}} = 10 \text{ В.}$$

$a_\psi = 2$  – коефіцієнт оптимізації.

Контур потокозчеплення з ПІ-регулятором налаштований таким чином має такі передавальні функції [14]:

– розімкнутого контуру:

$$W(p)_{\text{РОЗ}\psi} = \frac{1}{a_\psi \cdot T_C \cdot T_{\mu\psi 0} \cdot T_{\mu\psi E} \cdot p^3 + a_\psi \cdot T_{\mu\psi E}^2 \cdot p^2 + a_\psi \cdot T_{\mu\psi E} \cdot p}; \quad (2.83)$$

$$W(p)_{\text{РОЗ}\psi} = \frac{1}{1,752 \cdot 10^{-8} \cdot p^3 + 2,568 \cdot 10^{-5} \cdot p^2 + 7,167 \cdot 10^{-3} \cdot p};$$

– замкнутого контуру:

$$W(p)_{3AM\psi} = \frac{\frac{1}{k_{\psi}} \cdot (T_{\mu\psi 0} \cdot p + 1)}{a_{\psi} \cdot T_T \cdot T_{\mu\psi 0} \cdot T_{\mu\psi E} \cdot p^3 + a_{\psi} \cdot T_{\mu\psi E}^2 \cdot p^2 + a_{\psi} \cdot T_{\mu\psi E} \cdot p + 1} \approx \quad (2.84)$$

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

$$W(p)_{3AM\psi} = \frac{0,078 \cdot (0,00033 \cdot p + 1)}{2,567 \cdot 10^{-8} \cdot p^2 + 7,167 \cdot 10^{-3} \cdot p + 1}.$$

$$T_{\mu\psi E} = T_T + T_{\mu\psi 0}; \quad (2.85)$$

де:  $T_{\mu\psi E}$  – еквівалентна мала постійна оптимізованого часу контуру.

$$T_{\mu\psi E} = 0,000917 + 0,0027 = 0,0036 \text{ с.}$$

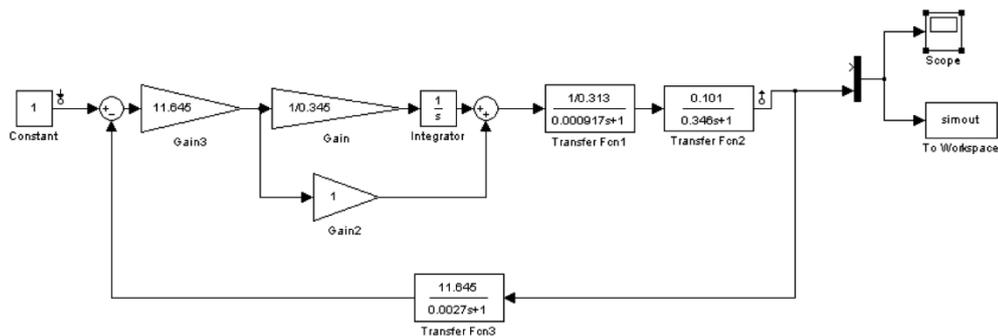


Рисунок 2.15 – Структурна схема контуру потокозчеплення з ПІ-регулятором

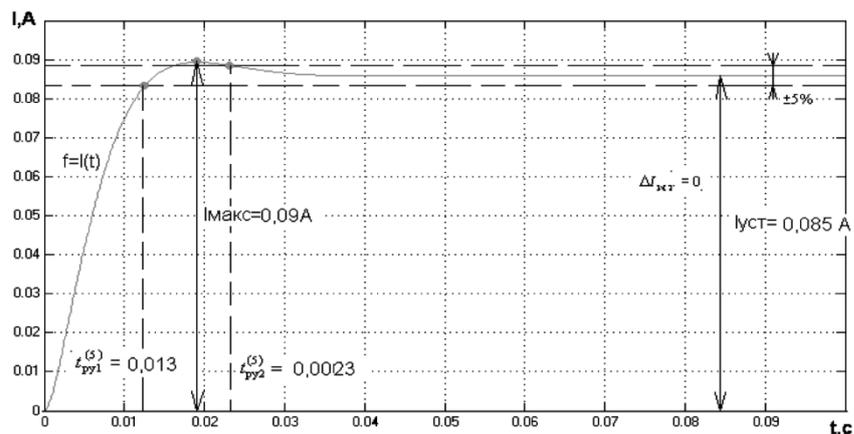


Рисунок 2.16 – Перехідна характеристика  $\psi(t)$  контуру потокозчеплення по структурній схемі при  $U_{3T} = 1 \text{ В}$

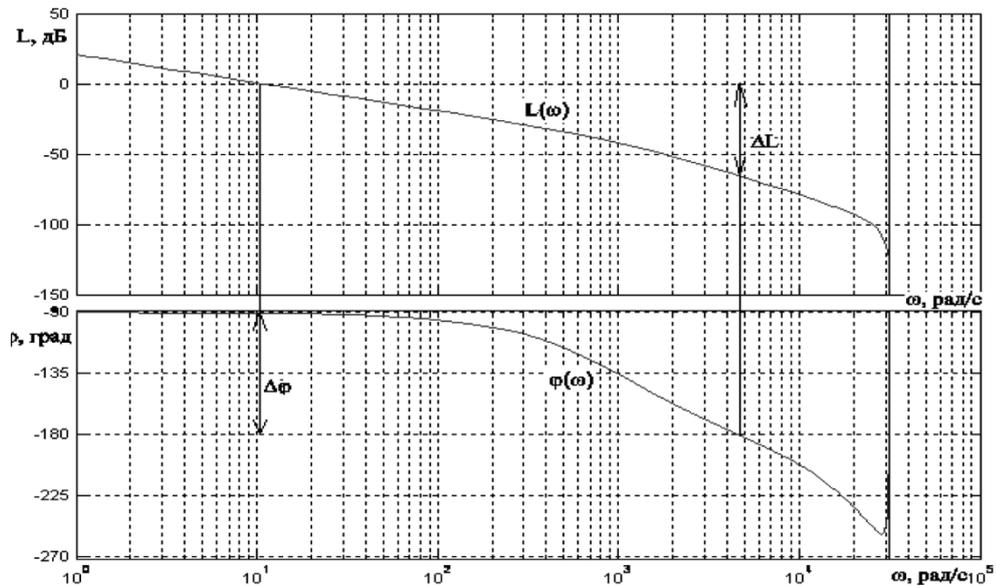


Рисунок 2.17 – Логарифмічні частотні характеристики розімкнутого контуру потокозчеплення, налаштованого на МО (без фільтра на вході)

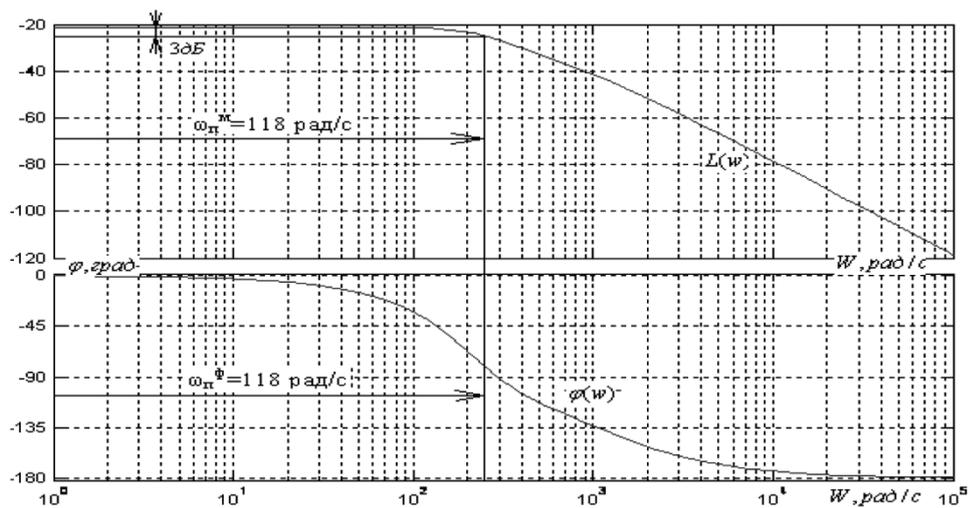


Рисунок 2.18 – Логарифмічні частотні характеристики замкнутого контуру потокозчеплення, налаштованого на МО (без фільтра на в ході)

Налаштування контуру близьке до налаштування на модульний оптимум системи другого порядку. Контур є астатичною системою регулювання першого порядку з керування та забезпечує нульову помилку, що встановилася  $\Delta\psi_{уст} = 0\text{Вб}$ . Залежно від співвідношення малих постійних часу  $T_T$  і  $T_{\mu\psi_0}$  контур має наступні динамічні показники якості роботи:

– перерегулювання:

$$\sigma = (4,3 \div 6,7)\%;$$

– час входження до 5% зони:

$$t_{pk1}^{(5)} = (4,1 \div 2,75) \cdot (T_T + T_{\mu\psi 0}); \quad (2.86)$$

$$t_{pk1}^{(5)} = (4,1 \div 2,75) \cdot (0,000917 + 0,0027) = 0,011 \text{ с.}$$

$$t_{pk2}^{(5)} = 0,02 \text{ с.}$$

Для замкнутого контуру

– смуга пропускання по модулю:

$$\omega_{\Pi}^{(M)} = \omega_{\Pi}^{(\Phi)} = \frac{(0,71 - 0,9)}{T_T + T_{\mu\psi 0}}; \quad (2.87)$$

$$\omega_{\Pi}^{(M)} = \omega_{\Pi}^{(\Phi)} = \frac{0,9}{0,000917 + 0,0027} = 197,2 \text{ рад / с.}$$

з характеристик (рис. 2.17) видно що  $\omega_{\Pi}^{(M)} = \omega_{\Pi}^{(\Phi)} = 118 \text{ рад / с.}$

– смуга пропускання по фазі:  $\omega_{\Pi}^{(\Phi)} = 120 \text{ рад / с.}$

Для розімкнутого контуру

З графіка, наведеного на рисунку 2.16:

– запас стійкості за модулем  $\Delta L = 65 \text{ дБ.}$

– запас стійкості по фазі  $\Delta \varphi = 90 \text{ град.}$

Таблиця 2.6 – Показники перехідних процесів контуру поточкозчеплення з ПІ-регулятором

Показники перехідних процесів			
По керуванню			
$t_{pk1}^{(5)}$	$t_{pk2}^{(5)}$	$\sigma, \%$	$\Delta \psi_{уст}, \text{Вб}$
Очікувані показники			
0,011	–	(4,3 ÷ 6,7)	0
Результати моделювання			
0,013	0,023	5,4	0,092

Висновок: аналіз параметрів якості, наведених у таблиці 2.6 показав, що очікувані показники та результати моделювання відрізняються не значно, тому це підтверджує, що параметри контуру розраховані та обрані правильно.

### 2.8.4 Оптимізація контуру швидкості з інерційним зворотним зв'язком

При оптимізації контуру швидкості внутрішній оптимізований замкнутий контур струму представлений усіченою функцією передачі 1-го порядку [5]:

$$W(p)_{\text{ЗАМШ}} \approx \frac{1}{k_C} \approx \frac{1}{0,000917 \cdot p + 1}; \quad (2.88)$$

де:  $T_C$  – еквівалентна постійна часу оптимізованого контуру струму.

$$T_C = a_T \cdot T_{\mu TE} = a_T \cdot (T_{\mu ПИ} + T_{\mu ТО}); \quad (2.89)$$

$$T_C = 2 \cdot (0,000125 + 0,00033) = 0,000917 \text{ с.}$$

Оптимізація контуру швидкості з П – регулятором

Структурна схема контуру швидкості з інерційним зворотним зв'язком та П – регулятором наведено на рисунку 2.19.

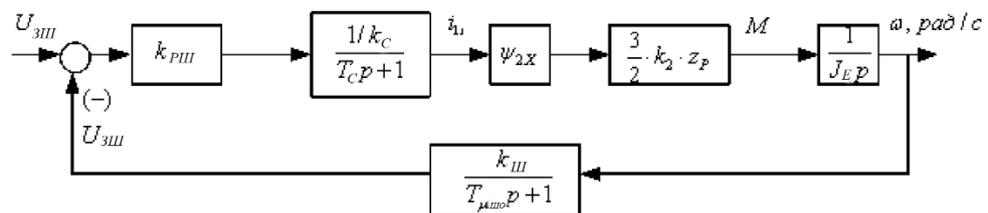


Рисунок 2.19 – Структурна схема контуру швидкості з П-регулятором

Передатна функція П-регулятора швидкості:

$$W_{\text{ПИШ}}(p) = k_{\text{ПИШ}}.$$

Коефіцієнт посилення регулятора швидкості:

$$k_{\text{ПИШ}} = \frac{J_E \cdot k_C}{\psi_{2x} \cdot \frac{3}{2} \cdot k_2 \cdot Z_p \cdot k_{\text{Ш}}} \cdot \frac{1}{a_c \cdot (T_{\text{Ш}} + T_{\mu\text{СО}})}; \quad (2.90)$$

$$k_{\text{ПИШ}} = \frac{0,285 \cdot 0,313}{0,781 \cdot \frac{3}{2} \cdot 1,021 \cdot 2 \cdot 0,066} \cdot \frac{1}{2 \cdot (0,000917 + 0,002)} = 96,12.$$

$$k_2 = \frac{L_m}{L_2}; \quad (2.91)$$

$$k_2 = \frac{0,101}{0,099} = 1,02.$$

$k_{ш}$  – коефіцієнт зворотного зв'язку за швидкістю

$$k_{ш} = \frac{U_{ЗШМАКС}}{W_{ЕПМАКС}}; \quad (2.92)$$

$$k_{ш} = \frac{10}{150,51} = 0,066 \text{ В} \cdot \text{с} / \text{рад}.$$

Прийняти:  $U_{ЗШМАКС} = 10 \text{ В}$ .

$a_{ш} = 2$  – коефіцієнт оптимізації;

$\psi_{2x}$  – проекція вектора потокозчеплення ротора на вісь  $x$  ортогональної системи координат  $x, y$ . В одно-зонному електроприводі  $\psi_{2x} = \psi_{2xH} = 0,914 \text{ Вб}$ .

Контур швидкості з П – регулятором в одно-зонному електроприводі має такі передавальні функції [10]:

– розімкнутого контуру:

$$\begin{aligned} W(p)_{\text{РОЗШ}} &= \frac{1}{a_{ш} \cdot T_C \cdot T_{\mu CO} \cdot T_{\mu CE} \cdot p^3 + a_{ш} \cdot T_{\mu CE}^2 \cdot p^2 + a_{ш} \cdot T_{\mu CE} \cdot p} \approx \\ &\approx \frac{1}{1,069 \cdot 10^{-8} \cdot p^3 + 1,701 \cdot 10^{-5} \cdot p^2 + 5,83 \cdot 10^{-3} \cdot p}; \end{aligned} \quad (2.93)$$

– замкнутого контуру з керування:

$$\begin{aligned} W(p)_{\text{ЗАМШ}} &= \frac{\frac{1}{k_{ш}} \cdot (T_{\mu CO} \cdot p + 1)}{a_{ш} \cdot T_C \cdot T_{\mu CO} \cdot T_{\mu CE} \cdot p^3 + a_{ш} \cdot T_{\mu CE}^2 \cdot p^2 + a_{ш} \cdot T_{\mu CE} \cdot p + 1} \approx \\ &\approx \frac{\frac{1}{k_{ш}} \cdot (T_{\mu CO} \cdot p + 1)}{a_{ш} \cdot T_{\mu CE}^2 \cdot p^2 + a_{ш} \cdot T_{\mu CE} \cdot p + 1}; \end{aligned} \quad (2.94)$$

$$W(p)_{\text{ЗАМШ}} = \frac{15,051 \cdot (0,002 \cdot p + 1)}{1,7 \cdot 10^{-5} \cdot p^2 + 5,83 \cdot 10^{-3} \cdot p + 1};$$

де:  $W(p)_{\text{ЗАМШ}} = T_C + T_{\mu CO} = 0,000917 + 0,002 = 0,00292 \text{ с}$ . – еквівалентна

мала постійна часу оптимізованого контуру  $\omega$ .

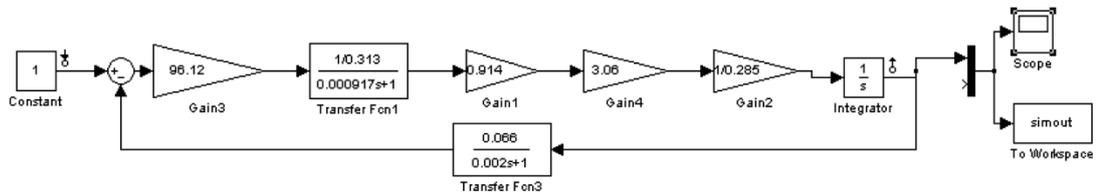


Рисунок 2.20 – Структурна схема контуру швидкості з П-регулятором

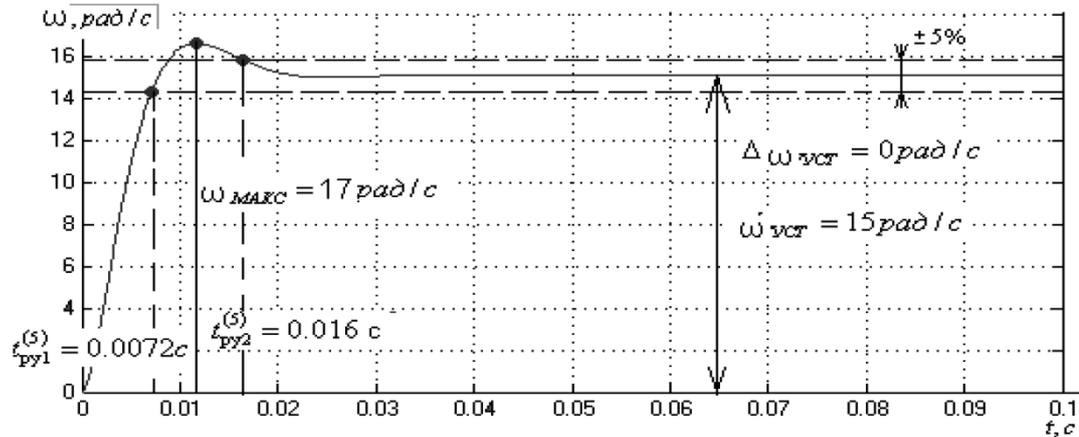


Рисунок 2.21 – Перехідна характеристика контуру швидкості при  $U_{3C} = 10 \text{ В}$

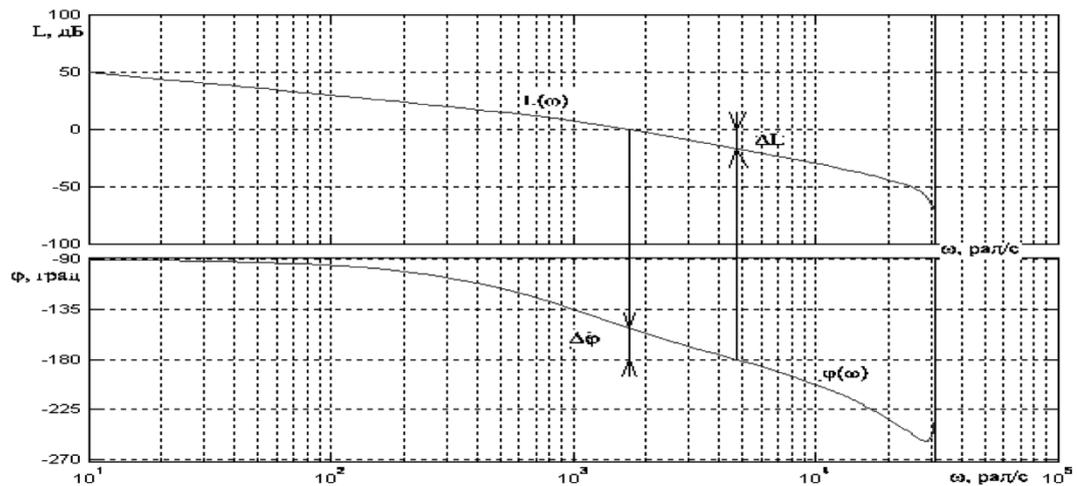


Рисунок 2.22 – Логарифмічні частотні характеристики розімкнутого контуру швидкості, налаштованого на МО (без фільтра на вході)

Налаштування контуру близьке до налаштування на МО системи 2-го порядку [12].

Контур є астатичною системою 1-го порядку з керування та забезпечує нульову помилку з керування:

$$\Delta W_{\text{к уст}} = 0 \text{ рад/с.}$$

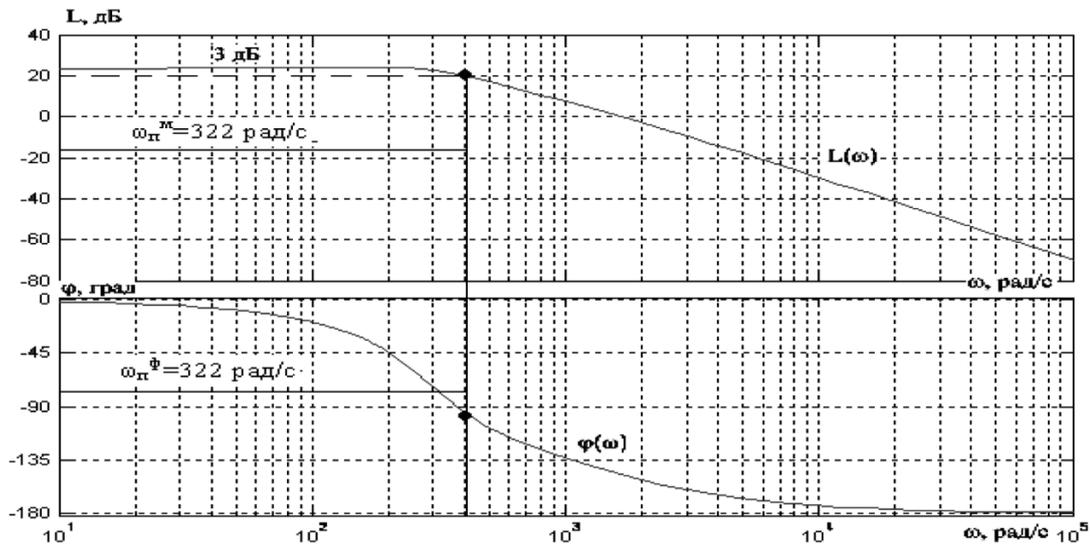


Рисунок 2.23 – Логарифмічні частотні характеристики замкнутого контуру швидкості, налаштованого на МО (без фільтра на вході)

І відповідно показники відпрацювання стрибка завдання:

– перерегулювання:  $\sigma = (4,3 \div 6,7)\%$ ;

– час першого входження до 5% зони:

$$t_{DO1}^{(5)} = (4,1 \div 2,75) \cdot (O_o + O_{\mu VO}); \quad (2.95)$$

$$t_{DO1}^{(5)} = (4,1 \div 2,75) \cdot (0,000917 + 0,002) = 0,0088 \text{ с.}$$

З графіка перехідного процесу (рис 2.23) видно, що час першого входження в 5% зону дорівнює  $t_{pk1}^{(5)} = 0,0072$ , а час другого входження до 5% зони  $t_{pk2}^{(5)} = 0,016$ .

Для замкнутого контуру

– залежно від співвідношення малих постійних часу  $\frac{T_{\mu CO}}{T_T}$  смуга

пропускання контуру по модулю змінюється не більше:

$$\omega_1^{(1)} = \omega_1^{(\sigma)} = \frac{(0,71 \div 0,9)}{O_o + O_{\mu VO}}; \quad (2.96)$$

$$\omega_1^{(1)} = \omega_1^{(\sigma)} = \frac{(0,71 \div 0,9)}{0,000917 + 0,002} = 322 \text{ рад / с.}$$

З графіків видно, що  $\omega_1^{(1)} = \omega_1^{(\sigma)} = 322 \text{ рад / с}$ .

Для розімкнутого контуру

– запас стійкості за модулем  $\Delta L = 29 \text{ дБ}$ .

– запас стійкості по фазі  $\Delta\phi = 30 \text{ дБ}$ .

При отриманих значеннях перерегулювання у контурі швидкості установка на вході контуру фільтра недоцільна.

Теоретичні та експериментальні показники якості лінеаризованого контуру швидкості зведено до таблиці 2.7.

Таблиця 2.7 – Показники перехідних процесів контуру швидкості з П – регулятором

Показники перехідних процесів			
По керуванню			
$t_{\text{рк1}}^{(5)}$	$t_{\text{рк2}}^{(5)}$	$\sigma, \%$	$\Delta\psi_{\text{уст}}, \text{рад / с}$
Очікувані показники			
0,0088	–	(4,3 ÷ 6,7)	0
Результати моделювання			
0,007	0,016	6,6	0

Висновок: аналіз параметрів якості, наведених у таблиці 2.7 показав, що очікувані показники та результати моделювання відрізняються не значно, тому це підтверджує, що параметри контуру розраховані та обрані правильно.

### 2.8.5 Оптимізація контуру швидкості з ПІ – регулятором

Структурна схема контуру швидкості з інерційним зворотним зв'язком та ПІ – регулятором наведено на рисунку 2.24.

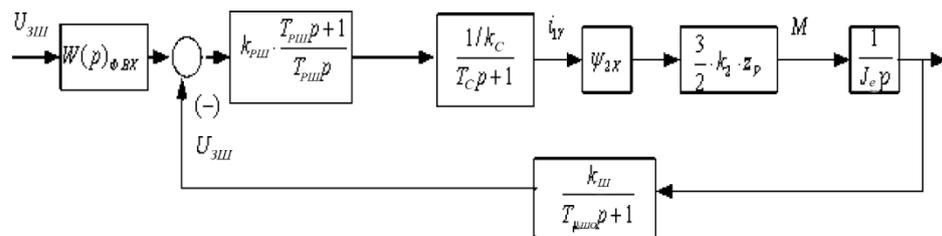


Рисунок 2.24 – Структурна схема контуру швидкості з ПІ-регулятором

Передатна функція ПІ-регулятора:

$$W(p)_{PI} = k_{PI} \cdot \frac{T_{PI} \cdot p + 1}{T_{PI} \cdot p} = 96,12 \cdot \frac{0,012 \cdot p + 1}{0,012 \cdot p}; \quad (2.97)$$

Коефіцієнт посилення та постійна часу регулятора швидкості визначаються за виразами:

$$k_{PI} = \frac{J_E \cdot k_C}{\Psi_{2x} \cdot \frac{3}{2} \cdot k_2 \cdot Z_p \cdot k_{ш}} \cdot \frac{1}{a_{ш} \cdot (T_C + T_{\mu CO})}; \quad (2.98)$$

$$\text{де: } k_2 = \frac{L_m}{L_2} = \frac{0,101}{0,099} = 1,102.$$

$T_{PI}$  – еквівалентна мала постійна часу оптимізованого контуру.

$$k_{PI} = \frac{0,285 \cdot 0,313}{0,781 \cdot \frac{3}{2} \cdot 1,02 \cdot 2 \cdot 0,066} \cdot \frac{1}{2 \cdot (0,000917 + 0,002)} = 96,12.$$

$$T_{PI} = b_{ш} \cdot a_{ш} \cdot (T_C + T_{\mu CO}); \quad (2.99)$$

$$T_{PI} = 2 \cdot 2 \cdot (0,000917 + 0,002) = 0,012 \text{ с.}$$

Контур швидкості з ПІ-регулятором налаштований таким чином має такі передавальні функції:

– розімкнутого контуру:

$$W(p)_{POZPI} = \frac{a_{ш} \cdot b_{ш} \cdot (T_{\mu CE} \cdot p + 1)}{b_{ш} \cdot a_{ш}^4 \cdot T_C \cdot T_{\mu CO} \cdot T_{\mu CE}^4 \cdot p^4 \cdot b_{ш} \cdot a_{ш}^3 \cdot T_{\mu CE}^3 \cdot p^3 + b_{ш} \cdot a_{ш}^2 \cdot T_{\mu CE}^2 \cdot p^2 + b_{ш} \cdot a_{ш} \cdot T_{\mu CE} \cdot p + 1} = \frac{2,2 \cdot (0,012 \cdot p + 1)}{1,248 \cdot 10^{-10} \cdot p^4 + 6,806 \cdot 10^{-5} \cdot p^3 + 6,806 \cdot 10^{-5} \cdot p^2 + 0,012 \cdot p + 1}; \quad (2.100)$$

– замкнутого контуру з керування:

$$W(p)_{ZAMPI} = \frac{1}{k_{ш}} \cdot \frac{a_{ш} \cdot b_{ш} \cdot (T_{\mu CE} \cdot p + 1) \cdot (T_{\mu CO} \cdot p + 1)}{b_{ш} \cdot a_{ш}^2 \cdot T_C \cdot T_{\mu CO} \cdot T_{\mu CE}^4 \cdot p^4 \cdot b_{ш} \cdot a_{ш}^2 \cdot T_{\mu CE}^3 \cdot p^3 + b_{ш} \cdot a_{ш}^2 \cdot T_{\mu CE}^2 \cdot p^2 + b_{ш} \cdot a_{ш} \cdot T_{\mu CE} \cdot p + 1}; \quad (2.101)$$

де:  $T_{\mu CE}$  – еквівалентна мала постійна часу.

$$T_{\mu CE} = T_C + T_{\mu CO}; \quad (2.102)$$

$$T_{\mu CE} = 0,000917 + 0,002 = 0,00292 \text{ с.}$$

Оптимізований контур при відпрацюванні ступінчастих керуючих впливів забезпечує високу швидкодію при перерегулюванні в загальному випадку понад 43%. Налаштування контуру без фільтрів на вході близьке до налаштування на СО.

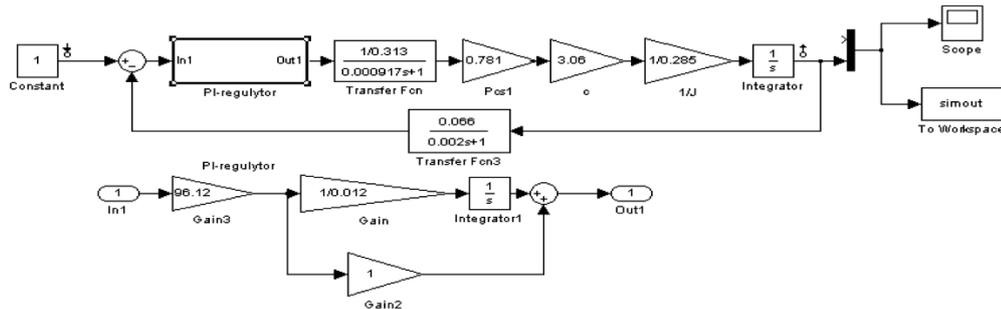


Рисунок 2.25 – Функціональна схема контуру швидкості з ПІ-регулятором

Якщо на вході контуру встановити фільтр із передавальною функцією:

$$W(p)_{\Phi BX} = \frac{1}{T_{\Phi BX2} \cdot p + 1} = \frac{1}{0,002 \cdot p + 1}; \quad (2.103)$$

І постійною часу:  $T_{\Phi BX2} = T_{\mu CO} = 0,002 \text{ с.}$

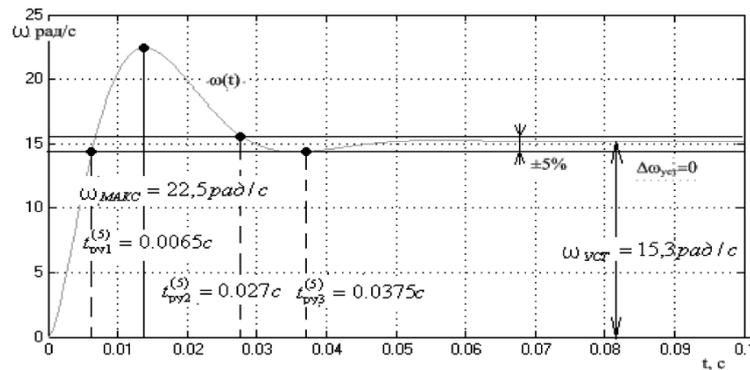


Рисунок 2.26 – Перехідна характеристика контуру швидкості при  $U_{3T} = 1 \text{ В}$

То перерегулювання не перевищуватиме 43%. Для обмеження перерегулювання на рівні 8,1% на вході контуру швидкості повинні бути включені два однакові фільтри відповідно з постійними часу [11]:

$$T_{\Phi BX2} = b_{ш} \cdot a_{ш} \cdot (T_C + T_{\mu CO}); \quad (2.104)$$

$$T_{\Phi BX2} = 2 \cdot 2 \cdot (0,000917 + 0,002) = 0,0117 \text{ с.}$$

$$T_{\Phi BX2} = T_{\mu CO} = 0,002 \text{ с.}$$

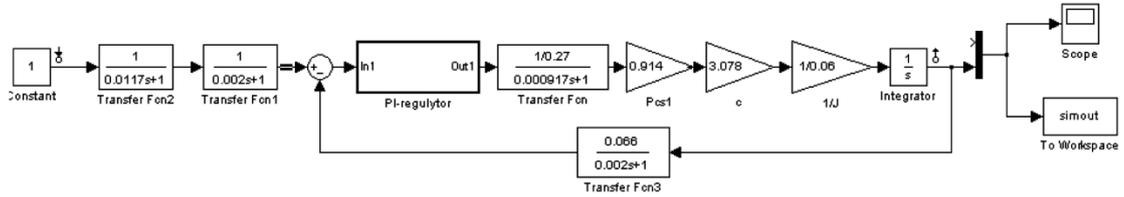


Рисунок 2.27 – Функціональна схема контуру швидкості з інерційним зворотним зв'язком та ПІ-регулятором

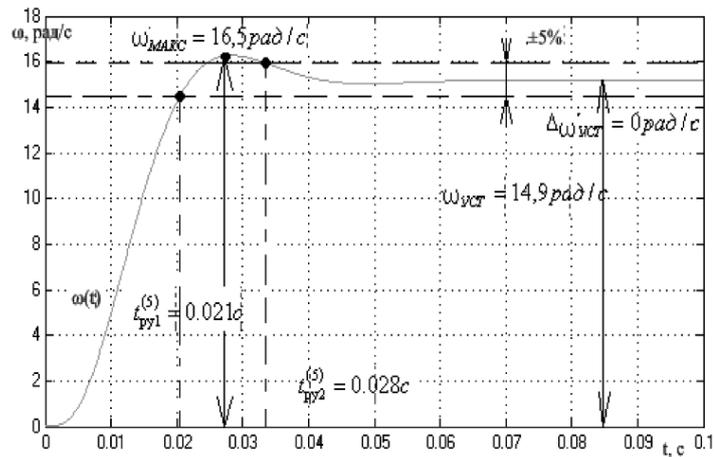


Рисунок 2.28 – Перехідна характеристика контуру швидкості (з двома фільтрами на вході) при  $U_{3C} = 1 \text{ В}$

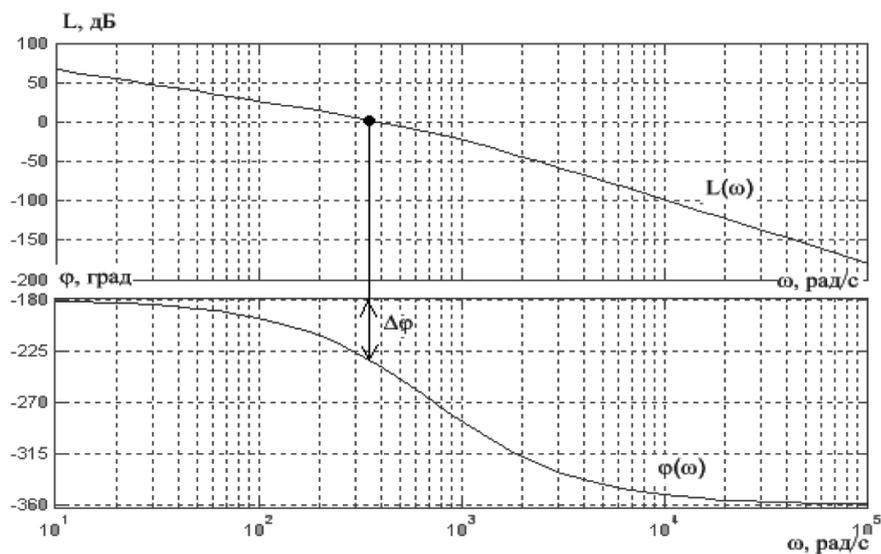


Рисунок 2.29 – Логарифмічні частотні характеристики розімкнутого контуру швидкості, налаштованого на МО (з фільтрами на вході)

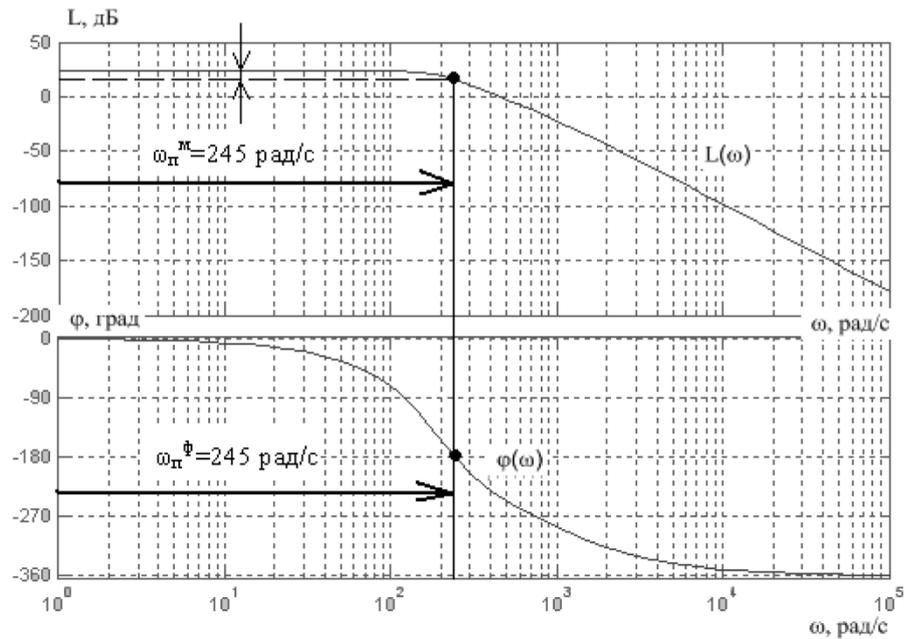


Рисунок 2.30 – Логарифмічні частотні характеристики замкнутого контуру швидкості, налаштованого на МО (з фільтрами на вході)

Передатна функція замкнутого контуру швидкості по керуванню двома фільтрами на вході має вигляд [14]:

– замкнутого контуру:

$$W(p)_{\text{РОЗ Ш}} = \frac{1}{k_{\text{ш}}} \cdot \frac{1}{b_{\text{ш}} \cdot a_{\text{ш}}^2 \cdot T_{\text{C}} \cdot T_{\mu\text{CO}} \cdot T_{\mu\text{CE}}^2 \cdot p^4 \cdot b_{\text{ш}} \cdot a_{\text{ш}}^2 \cdot T_{\mu\text{CE}}^3 \cdot p^3} \cdot \frac{1}{b_{\text{ш}} \cdot a_{\text{ш}}^2 \cdot T_{\mu\text{CE}}^2 \cdot p^2 + b_{\text{ш}} \cdot a_{\text{ш}} \cdot T_{\mu\text{CE}} \cdot p + 1}; \quad (2.105)$$

де:  $T_{\mu\text{CE}}$  – еквівалентна мала постійна часу

$$T_{\mu\text{CE}} = T_{\text{C}} + T_{\mu\text{CO}}; \quad (2.106)$$

$$T_{\mu\text{CE}} = 0,000917 + 0,002 = 0,00292 \text{ с.}$$

На вході контуру достатньо встановити один згладжуючий фільтр з постійною часу:

$$T_{\text{ФВХ2}} = b_{\text{ш}} \cdot a_{\text{ш}} \cdot (T_{\text{C}} + T_{\mu\text{CO}}); \quad (2.107)$$

$$T_{\text{рш}} = 2 \cdot 2 \cdot (0,000917 + 0,002) = 0,017 \text{ с.}$$

Налаштування контуру без фільтрів на вході близьке до налаштування на СО, а з фільтрами на МО для системи 3-го порядку.

Контур швидкості з фільтрами на вході є астатичною системою 1-го порядку та забезпечує нульову статичну помилку з керування. Динамічні показники якості роботи контуру залежать від співвідношення малих постійних часу  $\frac{T_{\mu CO}}{T_{II}}$  та попередньо можуть бути визначені за виразами;

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

$$\sigma = (8,1 \div 10)\%;$$

$$t_{PV1}^{(5)} = (7 \div 5,8) \cdot (T_T + T_{\mu CO}); \quad (2.108)$$

$$t_{PV1}^{(5)} = (7,5 \div 5,8) \cdot (0,000917 + 0,002) = 0,00215 \text{ с.}$$

$$t_{PV2}^{(5)} = (12 \div 9,5) \cdot (T_T + T_{\mu CO}); \quad (2.109)$$

$$t_{PV2}^{(5)} = (12 \div 9,5) \cdot (0,000917 + 0,002) = 0,0027 \text{ с.}$$

Для замкнутого контуру

– смуга пропускання контуру по модулю і по фазі змінюються в межах:

$$\omega_{II}^{(M)} = \frac{(0,5 \div 0,54)}{T_T + T_{\mu CO}}; \quad (2.110)$$

$$\omega_{II}^{(M)} = \frac{(0,5 \div 0,54)}{0,000917 + 0,002} = 186,2 \text{ рад / с.}$$

$$\omega_{II}^{(\Phi)} = \frac{(0,71 \div 0,9)}{T_T + T_{\mu CO}}; \quad (2.111)$$

$$\omega_{II}^{(\Phi)} = \frac{(0,36 \div 0,42)}{0,000917 + 0,002} = 144,8 \text{ рад / с.}$$

Для розімкнутого контуру

– запас стійкості по фазі  $\Delta\varphi = 50^\circ$ .

Таблиця 2.8 – Показники перехідних процесів контуру швидкості з ПІ-регулятором

Показники перехідних процесів			
По керуванню			
$t_{pk1}^{(5)}$	$t_{pk2}^{(5)}$	$\sigma, \%$	$\Delta\psi_{к\text{уст}}, \text{рад / с}$
Очікувані показники			
0,0125	0,027	(8,1 ÷ 10)	0
Результати моделювання			
0,021	0,028	9,6	15

Висновок: аналіз параметрів якості, наведених у таблиці 2.8 показав, що очікувані показники та результати моделювання відрізняються не значно, тому це підтверджує, що параметри контуру розраховані та обрані правильно.

### 2.8.6 Відпрацювання контуром швидкості збурюючих впливів

#### Контур швидкості з ПІ-регулятором

Структурна схема лінеаризованого контуру швидкості з інерційним зворотним зв'язком та ПІ – регулятором для режиму відпрацювання збурюючого впливу наведено рисунку 2.31.

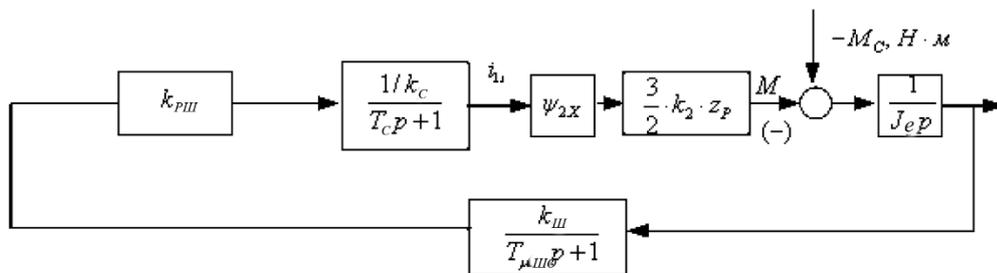


Рисунок 2.31 – Структурна схема лінеаризованого контуру швидкості з ПІ – регулятором під час відпрацювання збурення

Передатна функція замкнутого контуру швидкості за збуренням:

$$W(p)_{3\text{ЗАМ}} = \frac{W(p)}{-M_c(p)} = \frac{\frac{1}{J_E} \cdot a_{\text{ш}} \cdot T_{\mu\text{CE}} \cdot (T_C \cdot p + 1) \cdot (T_{\mu\text{CO}} \cdot p + 1)}{a_{\text{ш}} \cdot T_C \cdot T_{\mu\text{CO}} \cdot T_{\mu\text{CE}}^3 \cdot p^3 + a_{\text{ш}} \cdot T_{\mu\text{CE}}^2 \cdot p^2 + a_{\text{ш}} \cdot T_{\mu\text{CO}} \cdot p + 1} \approx (2.112)$$

$$\approx \frac{0,02 \cdot (0,00292 \cdot p + 1) \cdot (0,002 \cdot p + 1)}{1,069 \cdot 10^{-8} \cdot p^3 + 1,701 \cdot 10^{-5} \cdot p^2 + 5,833 \cdot 10^{-3} \cdot p + 1};$$

Оптимізований замкнутий контур швидкості з П – регулятором є статичною системою регулювання зі збуренням.

Очікувані показники якості роботи контуру при відпрацюванні ступінчастого збурювального впливу [5]:

– встановилася помилка зі збуренням:

$$\Delta W_{3\text{УСТ}} = \frac{a_{\text{ш}} \cdot (T_C + T_{\mu\text{CO}})}{J_E}; \quad (2.113)$$

$$\Delta W_{3\text{УСТ}} = \frac{2 \cdot (0,000917 + 0,002)}{0,06} \cdot (-33) = 3,209 \text{ рад / с.}$$

– динамічний провал (сплеск) швидкості при накиданні (скиданні) навантаження  $\Delta M_c$ :

$$\Delta W_{3\text{МАКС}} \approx 1,067 \cdot (-3,209) = 6,63 \text{ рад / с.}$$

– час відпрацювання збурюючого впливу:

$$t_{3\text{В}} \approx 2,45 \cdot (T_C + T_{\mu\text{CO}}); \quad (2.114)$$

$$t_{3\text{В}} \approx 2,45 \cdot (0,000917 + 0,002) \approx 0,0071 \text{ с.}$$

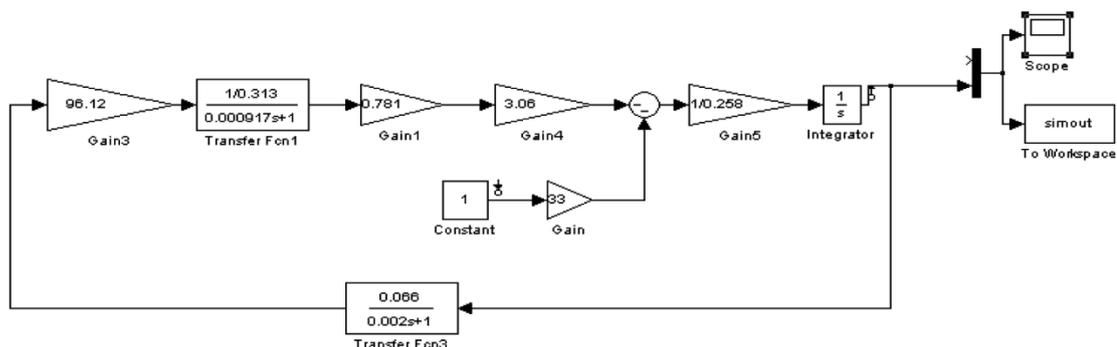


Рисунок 2.32 – Функціональна схема лінеаризованого контуру швидкості з П – регулятором під час відпрацювання збурення

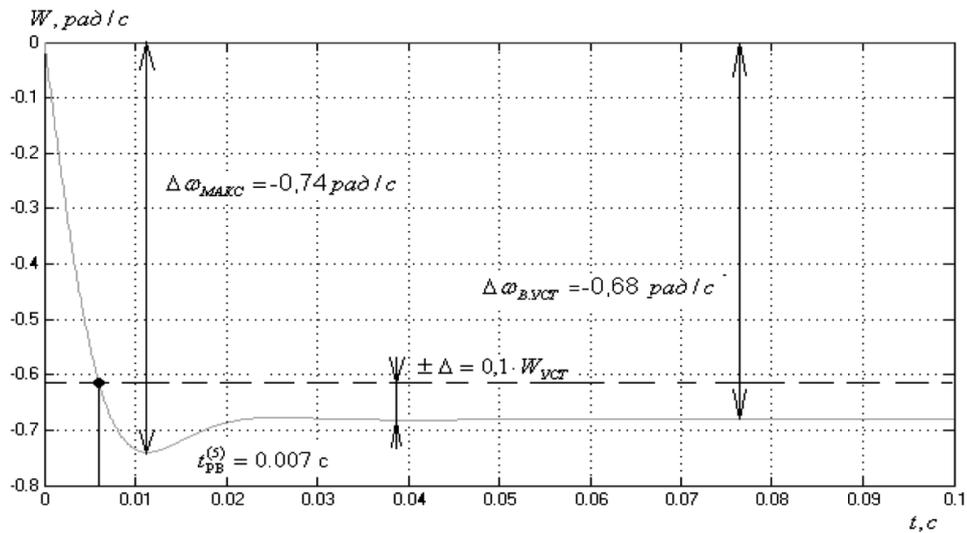


Рисунок 2.33 – Перехідна характеристика контуру швидкості  $\Delta M_c = 33$

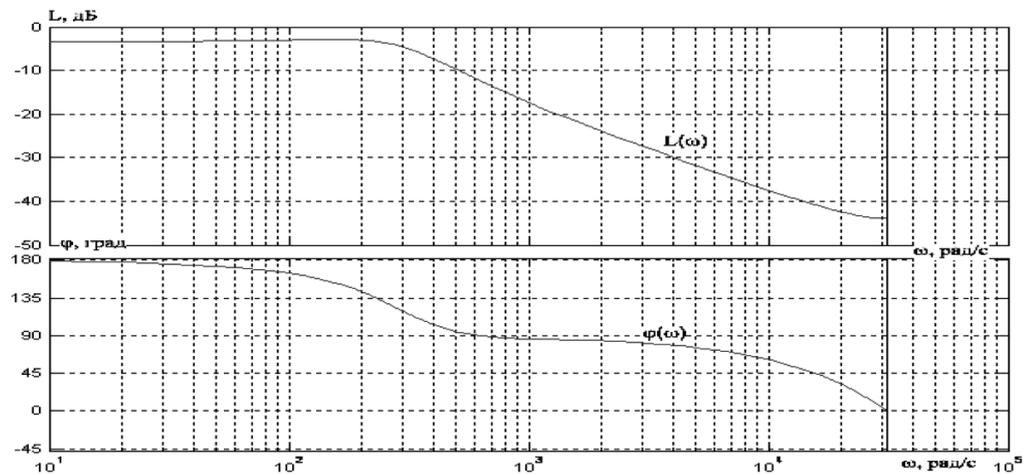


Рисунок 2.34 – Логарифмічні частотні характеристики замкнутого контуру швидкості, налаштованого на МО

Теоретичні та експериментальні показники якості зведені в таблицю 2.9. Час перехідного процесу збурення  $t_{зв}$  оцінюється за остаточному входженню до зони допустимих відхилень  $\pm\Delta$ , де  $\Delta = 0,1 \cdot W_{вст}$ .

Таблиця 2.9 – Показники перехідних процесів контуру швидкості з ПІ-регулятором

$\Delta W_{з\text{ макс}}, \text{ рад/с}$ ( $\Delta M_c = 33 \text{ Н} \cdot \text{м}$ )	$t_{зв}, \text{ с}$	$\Delta W_{з\text{ вст}}, \text{ рад/с}$
Очікувані показники якості		
0,72	0,0071	0,67
Результати моделювання		
0,74	0,007	0,68

### Контур швидкості з ПІ-регулятором

Структурна схема лінеаризованого контуру швидкості з інерційним зворотним зв'язком та ПІ-регулятором, при відпрацюванні збурювального впливу наведено на рисунку 2.35.

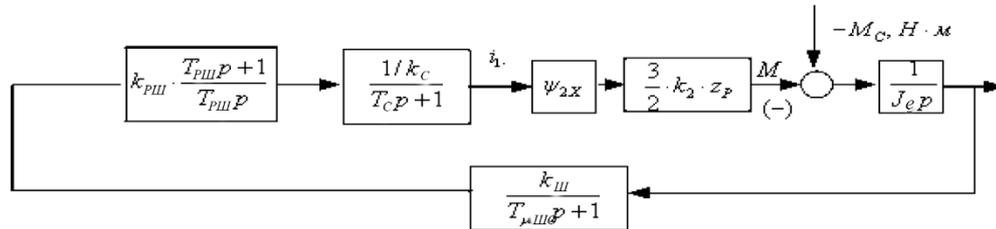


Рисунок 2.35 – Структурна схема лінеаризованого контуру швидкості з ПІ-регулятором при відпрацюванні збурення

Передатна функція замкнутого контуру швидкості збурення:

$$\begin{aligned}
 W(p)_{\text{ЗЗМ}} &= \frac{W(p)}{-M_c(p)} = \\
 &= \frac{\frac{1}{J_E} \cdot b_{\text{ш}} \cdot a_{\text{ш}}^2 \cdot T_{\mu\text{CE}}^2 \cdot p \cdot (T_C \cdot p + 1) \cdot (T_{\mu\text{CO}} \cdot p + 1)}{a_{\text{ш}} \cdot b_{\text{ш}} \cdot T_C \cdot T_{\mu\text{CO}} \cdot T_{\mu\text{CE}}^2 \cdot p^4 + a_{\text{ш}}^2 \cdot b_{\text{ш}} \cdot T_{\mu\text{CE}}^3 \cdot p^3 + a_{\text{ш}}^2 \cdot b_{\text{ш}} \cdot T_{\mu\text{CE}}^2 \cdot p^2 \cdot b_{\text{ш}} \cdot a_{\text{ш}} \cdot T_{\mu\text{CE}} \cdot p + 1} \approx \\
 &= \frac{\frac{1}{J_E} \cdot b_{\text{ш}} \cdot a_1 \cdot T_{\mu\text{CE}}^2 \cdot p \cdot (T_{\mu\text{CE}} \cdot p + 1)}{b_{\text{ш}} \cdot a_{\text{ш}}^2 \cdot T_{\mu\text{CE}}^3 \cdot p^3 + b_{\text{ш}} \cdot a_{\text{ш}}^2 \cdot T_{\mu\text{CE}}^2 \cdot p^2 + b_{\text{ш}} \cdot a_{\text{ш}} \cdot T_{\mu\text{CE}} \cdot p + 1} \approx \\
 &\approx \frac{2,3 \cdot 10^{-4} \cdot p \cdot (0,002 \cdot p + 1)}{1,985 \cdot 10^{-7} \cdot p^3 + 6,806 \cdot 10^{-5} \cdot p^2 + 0,012 \cdot p + 1};
 \end{aligned} \tag{2.115}$$

Оптимізований замкнутий контур швидкості з ПІ-регулятором являє собою астатичну систему регулювання 1-го порядку за збуренням. Очікувані показники якості роботи під час відпрацювання ступінчастого збурюючого впливу [10]:

– встановилася помилка збурення:

$$\Delta W_{\text{ЗУСТ}} = 0 \text{ рад / с.}$$

– динамічний провал (сплеск) швидкості при накиданні (скиданні) навантаження  $\Delta M_c$ :

$$\Delta W_{3 \text{ МАКС}} \approx \frac{1,75 \cdot (T_c + T_{\mu CO})}{J_E} \cdot \Delta M_c; \quad (2.116)$$

$$\Delta W_{3 \text{ МАКС}} \approx \frac{1,75 \cdot (0,00917 + 0,002)}{0,06} \cdot 33 = 2,805 \text{ рад / с.}$$

– час відпрацювання збурюючого впливу:

$$t_{3B} \approx (12,5 \div 10,9) \cdot (T_c + T_{\mu CO}); \quad (2.117)$$

$$t_{3B} \approx (12,5 \div 10,9) \cdot (0,000917 + 0,002) = 0,0246 \text{ с.}$$

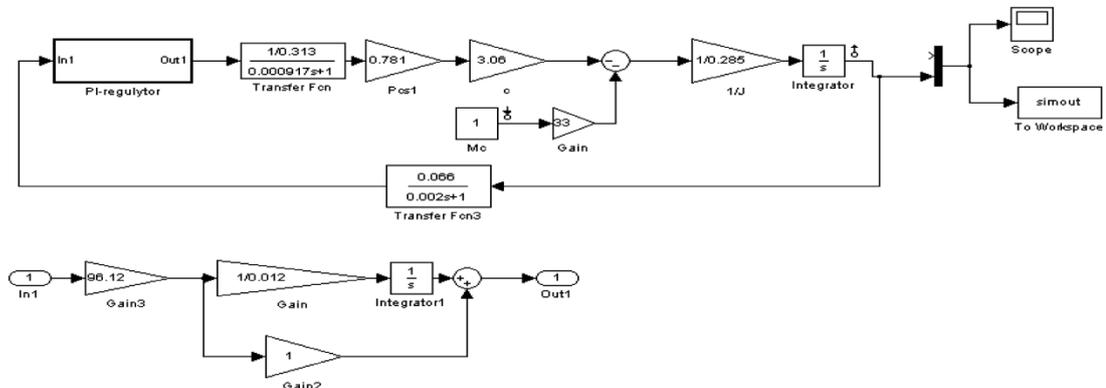


Рисунок 2.36 – Функціональна схема лінеаризованого контуру швидкості з ПІ-регулятором при відпрацюванні збурення

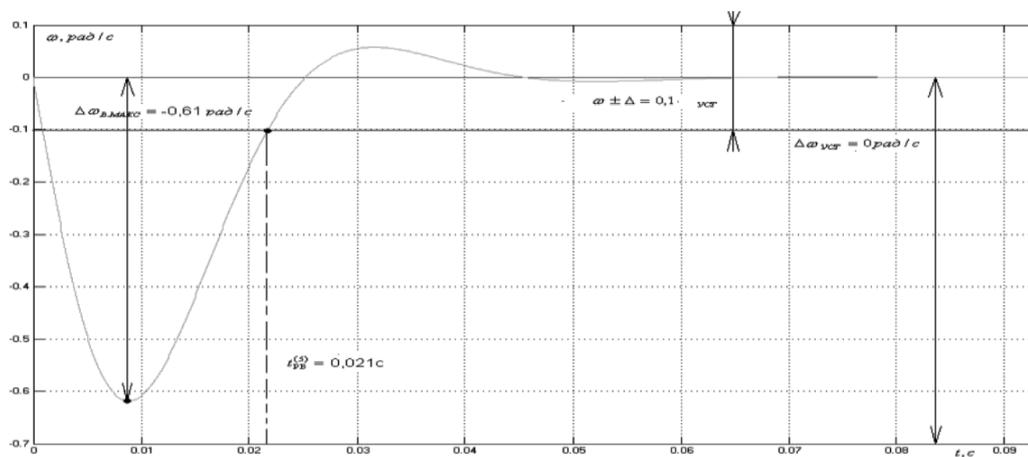


Рисунок 2.37 – Перехідна характеристика контуру швидкості

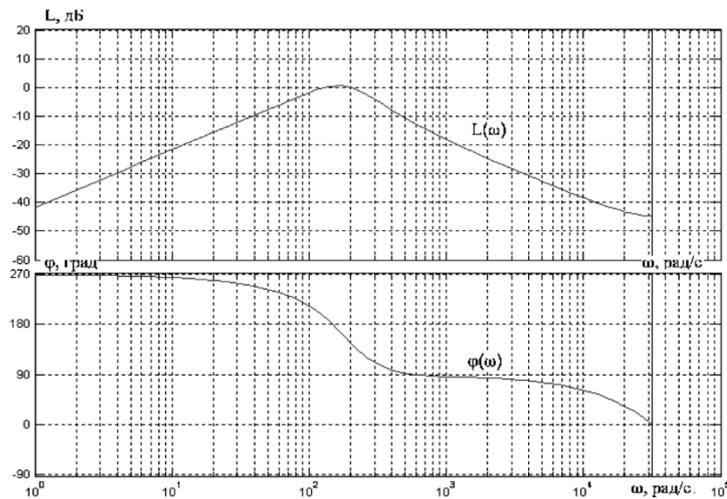


Рисунок 2.38 – Логарифмічні частотні характеристики замкнутого контуру швидкості, налаштованого на СО (без фільтра на вході)

Таблиця 2.10 – Показники перехідних процесів контуру швидкості з ПІ-регулятором

$\Delta W_{3\text{МАКС}}, \text{рад/с}$ ( $\Delta M_c = 33 \text{ Н} \cdot \text{м}$ )	$t_{3\text{В}}, \text{с}$	$\Delta W_{3\text{УСТ}}, \text{рад/с}$
Очікувані показники якості		
0,59	0,0246	0
Результати моделювання		
0,61	0,021	0

Теоретичні та експериментальні показники якості зведені в таблицю 2.10. Час перехідного процесу з збурення  $t_{3\text{В}}$  оцінюється за остаточним входженням до зони допустимих відхилень  $\pm \Delta$ , де  $\Delta = 0,1 \cdot W_{\text{УСТ}}$ .

## 2.9 Структурна схема нелінійної САК частотно-регульованого асинхронного електроприводу з векторним керуванням

Структурна схема нелінійної САК частотно-регульованого електроприводу з векторним керуванням наведено на рисунку 2.39.

Структурна схема рисунка складена виходячи з структурної схеми лінеаризованої САК електроприводу та враховуючи такі основні нелінійності елементів системи керування електроприводу [11]:

– насичення регулятора струму, потокозчеплення та швидкості:

$$U_{PCMAX} = \pm 10V. \quad U_{P\psi MAX} = \pm 10V. \quad U_{PШ MAX} = \pm 10V.$$

– постійне за величиною в першій зоні і залежне від швидкості у другій зоні регулювання обмеження максимального струму електроприводу в перехідних режимах та короткочасних навантаженнях, яке досягається обмеженням вихідної напруги регулятора швидкості на рівні:

$$U_{PCDOП}(\omega) = \pm k_T \cdot I_{EП MAX}(\omega); \quad (2.118)$$

Де залежність  $I_{EП MAX}(\omega)$  формується за допомогою блоку БЗТО:

– реактивний характер навантаження:

$$M_c(\omega) = M_c \cdot \sin \omega; \quad (2.119)$$

Де величина моменту змінюється від  $(M_{CXX} + M_{CДВ})$  до  $(M_{C MAX} + M_{CДВ})$ ;

– нелінійна залежність завдання потокозчеплення  $U_{C\psi}$  у другій зоні регулювання швидкості від величини завдання швидкості  $U_{ЗШ}$ .

Дослідження на імітаційній моделі нелінійної САК електроприводу (рис.2.39) проводяться з метою оцінки впливу величини завдання швидкості  $U_{ЗШ}$  та моменту  $M_c$  на характер перехідних процесів та динамічні показники якості роботи електроприводу з урахуванням обмеження вихідних напруг регуляторів та перетворювача частоти.

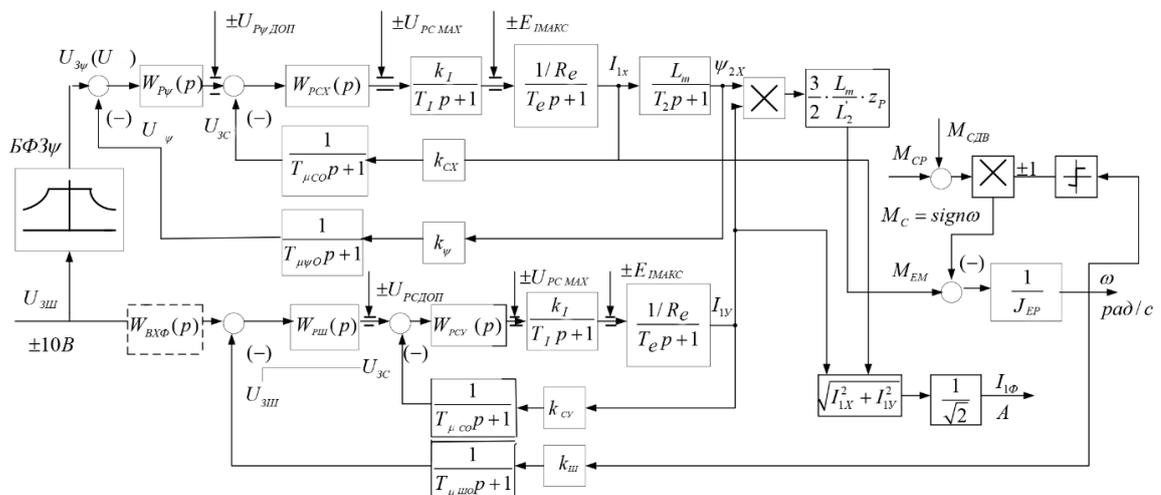


Рисунок 2.39 – Структурна схема нелінійної безперервної САК частотно-регульованого асинхронного електроприводу при векторному керуванні

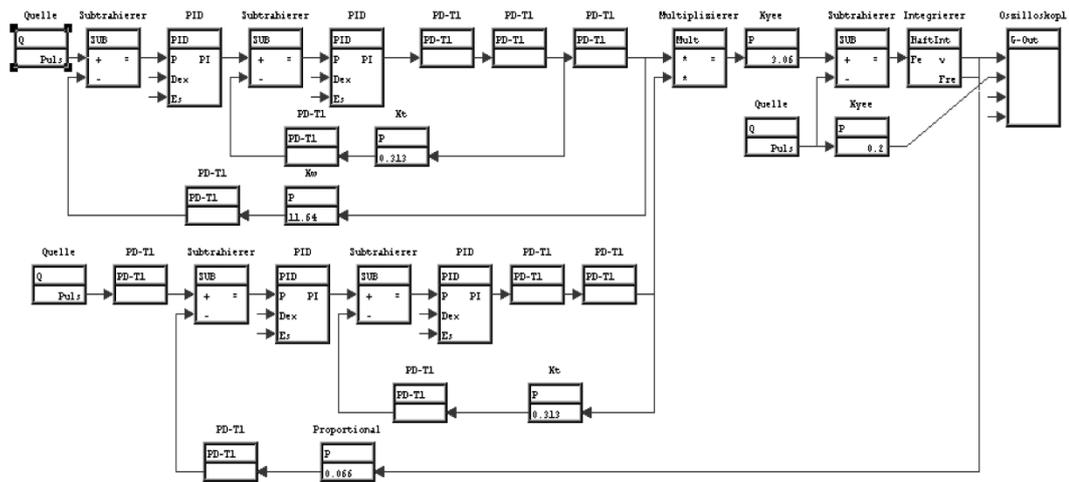


Рисунок 2.40 – Імітаційна модель нелінійної безперервної САК частотно-регульованого асинхронного електроприводу при векторному керуванні

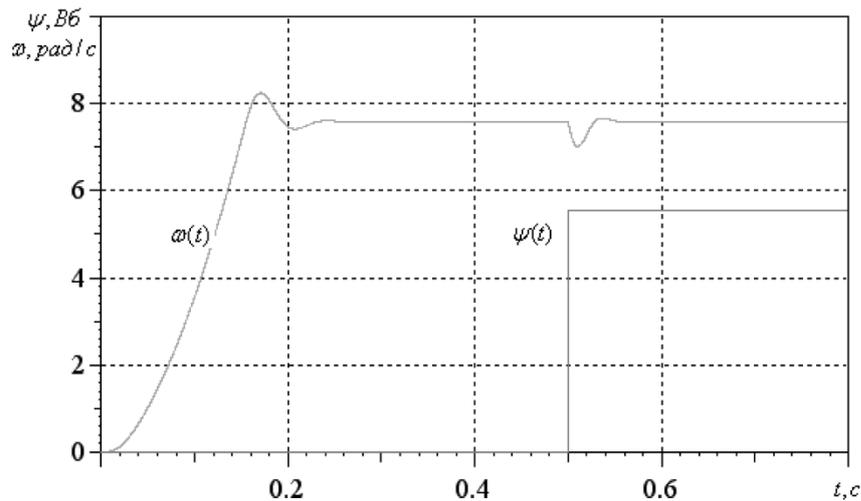


Рисунок 2.41 – Перехідна характеристика нелінійної безперервної САК

### 2.9.1 Розрахунок статичних характеристик електроприводу з векторним керуванням

САК електроприводу складається з двох незалежних двоконтурних систем регулювання [11]:

- системи стабілізації заданого значення потокозчеплення  $\Psi_{2X}$ ;

– системи стабілізації швидкості обертання двигуна області зміни робочих навантажень та стабілізації (обмеження) моменту двигуна на заданому максимальному рівні у режимі короткочасних перевантажень.

Фактично ж системи регулювання потокозчеплення  $\psi_{2X}$  і швидкості  $\omega$  взаємопов'язані. Тому точний розрахунок статичних характеристик є дуже складне завдання.

Обмежимося оцінкою статичних показників роботи контурів регулювання потокозчеплення та швидкості, розглядаючи їх як незалежні системи. Такий підхід є наближеним, але він дає можливість оцінити статичні характеристики електроприводу з якісної сторони. Для отримання кількісної оцінки статичних показників якості роботи електроприводу слід використовувати динамічні імітаційні моделі, що враховують взаємний вплив систем регулювання потокозчеплення та швидкості.

### 2.9.2 Розрахунок САК потокозчеплення

Структурна схема САК потокозчеплення електроприводу з повністю компенсованими внутрішніми зворотними зв'язками двигуна для статичного режиму наведено на рисунку 2.42.

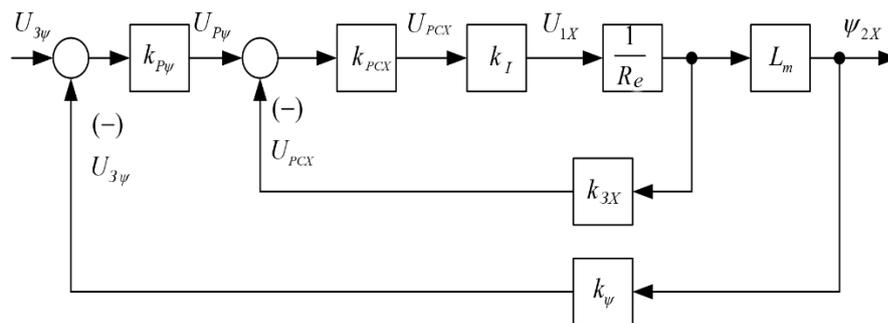


Рисунок 2.42 – Структурна схема САК (стабілізації) потокозчеплення в статичному режимі

Структурна схема на рисунку 2.42 описується такою системою рівнянь:

$$U_{P\psi} = (U_{3\psi} - k_{\psi} \cdot \psi_{2X}) \cdot k_{P\psi}; \quad (2.120)$$

$$U_{1X} = (U_{P\psi} - k_{1X} \cdot I_{1X}) \cdot k_{PCX} \cdot k_1; \quad (2.121)$$

$$I_{1X} = \frac{U_{1X}}{R_E}; \quad (2.122)$$

$$\psi_{2X} = I_{1X} \cdot L_m; \quad (2.123)$$

де:  $k_{CX} = k_C = 0,313, k_{PCX} = k_{PC} = 12,62$ .

При III регуляторах струму та потокозчеплення коефіцієнти посилення регуляторів слід прийняти:

$$k_{P\psi} \gg 1 \text{ приймаємо } k_{P\psi} = 200.$$

$$k_{PCX} \gg 1 \text{ приймаємо } k_{PCX} = 200.$$

Вирішивши спільно наведену вище систему рівнянь, знайдемо фактичне значення потокозчеплення  $\psi_{2X}$  при заданому значенні керування  $u_{3\psi}$  ( $u_{3III}$ ) на вході контуру:

$$\psi_{2X}(U_{3\psi}) = \frac{k_{P\psi} \cdot k_{PCX} \cdot k_1 \cdot L_m \cdot k_\psi}{R_E + k_{P\psi} \cdot k_{PTX} \cdot k_1 \cdot L_m \cdot k_\psi + k_{PCX} \cdot k_1 \cdot k_{CX}} \quad (2.124)$$

$$\frac{U_{3\psi}(U_{3III})}{k_\psi} = a \cdot \frac{U_{3\psi}(U_{3III})}{k_\psi};$$

$$\psi_{2X}(U_{3\psi}) = \frac{200 \cdot 200 \cdot 31,11 \cdot 0,101 \cdot 11,645}{0,623 + 200 \cdot 200 \cdot 31,11 \cdot 0,101 \cdot 11,645 + 200 \cdot 31,11 \cdot 0,313} \cdot \frac{10}{12,8} = 0,781 \text{ Вб.}$$

де:

$$a = \frac{k_{P\psi} \cdot k_{PTX} \cdot k_1 \cdot L_m \cdot k_\psi}{R_E + k_{P\psi} \cdot k_{PTX} \cdot k_1 \cdot L_m \cdot k_\psi + k_{PTX} \cdot k_1 \cdot k_{TX}}; \quad (2.125)$$

$$a = \frac{200 \cdot 200 \cdot 31,11 \cdot 0,101 \cdot 11,645}{0,623 + 200 \cdot 200 \cdot 31,11 \cdot 0,101 \cdot 11,645 + 200 \cdot 31,11 \cdot 0,313} = 0,999.$$

$$\psi_{2X3AD} = \frac{U_{3\psi}(U_{3III})}{k_\psi} = 0,781 - \text{задане значення потокозчеплення, Вб.}$$

Абсолютна похибка контуром заданого значення потокозчеплення:

$$\Delta\psi_{2X} = \frac{R_E + k_{PCX} \cdot k_1 \cdot k_{CX}}{R_E + k_{P\psi} \cdot k_{PCX} \cdot k_1 \cdot L_m \cdot k_\psi + k_{PCX} \cdot k_1 \cdot k_{CX}} \cdot \frac{U_{3\psi}(U_{3III})}{k_\psi}; \quad (2.126)$$

$$\Delta\psi_{2X} = \frac{0,623 + 200 \cdot 31,11 \cdot 0,313}{0,623 + 200 \cdot 200 \cdot 31,11 \cdot 0,101 \cdot 12,8 + 200 \cdot 31,11 \cdot 0,313} \cdot 0,781 = 0,00063 \text{ Вб.}$$

Таким чином, у загальному випадку  $\psi_{2X} = a \cdot \frac{U_{3\psi}(U_{3Ш})}{k_{\psi}}$ . А в першій зоні  $\psi_{2X} = a \cdot \psi_{2XН}$ . Відповідно до отриманого виразу похибка відпрацювання контуром заданого значення потокозчеплення не залежить від швидкості обертання та навантаження двигуна. Фактично така залежність є.

Враховуючи, що похибка  $\psi_{2X}$  мала, у загальному випадку можна прийняти  $\psi_{2X} = \psi_{2XЗАД} = \frac{U_{3\psi}(U_{3Ш})}{k_{\psi}}$ , а в першій зоні  $\psi_{2X} = \psi_{2XН}$ .

### 2.9.3 Розрахунок статичних характеристик частотно-регульованого однозонного асинхронного електроприводу з векторним керуванням

Структурна схема САК однозонного електроприводу при стабілізації швидкості та припущення, що САК потокозчеплення точно підтримує задане номінальне значення потокозчеплення  $\psi_{2XН}$ , наведено на рисунку 2.43. Регулятор швидкості в режимі стабілізації швидкості насичений  $U_{рш} < U_{рш\text{ДОД}}$ .

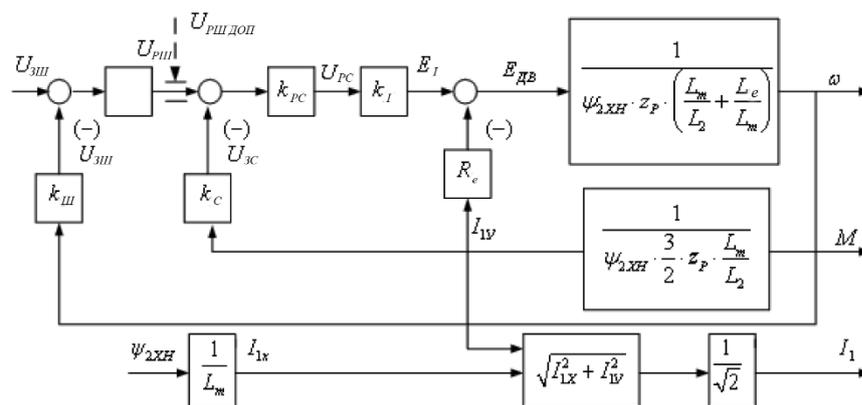


Рисунок 2.43 – Структурна схема САК швидкості одно-зонного електроприводу для статичного режиму стабілізації швидкості

Структурна схема на рисунку 2.43 описується такою системою рівнянь:

$$U_{PШ} = (U_{3Ш} - k_{ш} \cdot \omega) \cdot k_{PШ}; \quad (2.127)$$

$$U_{1Y} = (U_{PШ} - k_{CY} \cdot I_{1Y}) \cdot k_{PCY} \cdot k_1; \quad (2.128)$$

$$M = \psi_{2XH} \cdot z_p \cdot \frac{3}{2} \cdot z_p \cdot \frac{L_m}{L_2} \cdot I_{1Y}; \quad (2.129)$$

$$E_{ДВ} = U_{1Y} + I_{1Y} \cdot R_E; \quad (2.130)$$

$$\omega = \frac{E_{ДВ}}{\psi_{2XH} \cdot z_p \cdot \left( \frac{L_m}{L_2} + \frac{\sigma \cdot L_1}{L_m} \right)}; \quad (2.131)$$

Де при ПІ-регуляторах струму та швидкості  $k_{PШ} \gg 1$ , приймаємо  $k_{PШ} = 200$ ,  $k_{PCY} \gg 1$ , приймаємо  $k_{PCY} = 200$ .

Вирішивши спільно наведену систему рівнянь щодо швидкості  $\omega$ , знайдемо вираз для електромеханічної  $\omega(I_{1Y})$  і механічної  $\omega(M)$  характеристик електроприводу в режимі стабілізації швидкості [14].

Вираз для електромеханічної характеристики приводу  $\omega(I_{1Y})$ :

$$\begin{aligned} \omega(I_{1Y}) = \psi_0(U_0) - \Delta\psi_3(I_{1Y}) &= \frac{k_{PШ} \cdot k_{PCY} \cdot k_E \cdot k_{Ш}}{\psi_{2XH} \cdot z_p \cdot \left( \frac{L_m}{L_2} + \frac{\sigma \cdot L_1}{L_m} + k_{PШ} \cdot k_{PCY} \cdot k_E \cdot k_{Ш} \right)} \cdot \\ &\cdot \frac{U_0}{k_{Ш}} - \frac{R_T + k_{PCT} \cdot k_E \cdot k_{Ш}}{\psi_{2XH} \cdot z_p \cdot \left( \frac{L_m}{L_2} + \frac{\sigma \cdot L_1}{L_m} + k_{PШ} \cdot k_{PCT} \cdot k_E \cdot k_{Ш} \right)} \cdot I_{1C} \\ \omega(I_{1Y}) = \psi_0(U_0) - \Delta\psi_3(I_{1Y}) &= \\ &= \frac{200 \cdot 200 \cdot 31,11 \cdot 0,066}{0,781 \cdot 2 \cdot \left( \frac{0,101}{0,099} + \frac{0,052 \cdot 0,098}{0,101} \right) + 200 \cdot 200 \cdot 31,11 \cdot 0,066} \cdot \\ &\cdot \frac{10}{0,066} - \frac{0,623 + 200 \cdot 31,11 \cdot 0,066}{0,781 \cdot 2 \cdot \left( \frac{0,101}{0,099} + \frac{0,052 \cdot 0,098}{0,101} \right) + 200 \cdot 200 \cdot 31,11 \cdot 0,066} \cdot 5,401 = \\ &= 150,7 \text{ рад / с.} \end{aligned} \quad (2.132)$$

де:  $U_{3Ш}$  – швидкість ідеального холостого ходу при керуючій напрузі.

$$\psi_0(U_0) = \frac{k_{\text{PШ}} \cdot k_{\text{PCY}} \cdot k_E \cdot k_{\text{Ш}}}{\psi_{2\text{XH}} \cdot z_p \cdot \left( \frac{L_m}{L_2} + \frac{\sigma \cdot L_1}{L_m} \right) + k_{\text{PШ}} \cdot k_{\text{PCY}} \cdot k_E \cdot k_{\text{Ш}}} \cdot \frac{U_0}{k_{\text{Ш}}}; \quad (2.133)$$

$$\psi_0(U_0) = \frac{200 \cdot 200 \cdot 31,11 \cdot 0,066}{0,781 \cdot 2 \cdot \left( \frac{0,101}{0,099} + \frac{0,052 \cdot 0,098}{0,101} \right) + 200 \cdot 200 \cdot 31,11 \cdot 0,066} \cdot \frac{10}{0,066} = 150,5 \text{ рад / с.}$$

$$\omega_{\text{зАд}}(U_{\text{зШ}}) = \frac{U_{\text{зШ}}}{k_{\text{Ш}}} = \frac{10}{0,066} = 151,5 \text{ – задане значення швидкості, рад/с;}$$

– абсолютна похибка швидкості електроприводу в замкнутій системі збурення при зміні струму  $I_{1Y}$  (навантаження електроприводу).

$$\Delta\omega_3(I_{1Y}) = \frac{k_C \cdot k_{\text{PCY}} \cdot k_E \cdot k_{\text{Ш}}}{\psi_{2\text{XH}} \cdot z_p \cdot \left( \frac{L_m}{L_2} + \frac{\sigma \cdot L_1}{L_m} \right) + k_{\text{PШ}} \cdot k_{\text{PCY}} \cdot k_E \cdot k_{\text{Ш}}} \cdot I_{1Y}; \quad (2.134)$$

$$\Delta\omega_3(I_{1Y}) = \frac{0,623 + 200 \cdot 31,11 \cdot 0,066}{0,781 \cdot 2 \cdot \left( \frac{0,101}{0,099} + \frac{0,052 \cdot 0,098}{0,101} \right) + 200 \cdot 200 \cdot 31,11 \cdot 0,066} \cdot 5,401 = 0,027 \text{ рад / с.}$$

Абсолютна похибка швидкості електроприводу у замкненій системі з керування:

$$\begin{aligned} \Delta\omega(U_{\text{зШ}}) &= \omega_{\text{зАд}}(U_{\text{зШ}}) - \omega(I_{1Y}) = \\ &= \frac{\psi_{2\text{XH}} \cdot z_p \cdot \left( \frac{L_m}{L_2} + \frac{\sigma \cdot L_1}{L_m} \right)}{\psi_{2\text{XH}} \cdot z_p \cdot \left( \frac{L_m}{L_2} + \frac{\sigma \cdot L_1}{L_m} \right) + k_{\text{PШ}} \cdot k_{\text{PCY}} \cdot k_1 \cdot k_{\text{Ш}}} \cdot \frac{U_{\text{зШ}}}{k_{\text{Ш}}}; \quad (2.135) \\ \Delta\omega(U_{\text{зШ}}) &= \omega_{\text{зАд}}(U_{\text{зШ}}) - \omega(I_{1Y}) = \\ &= \frac{0,781 \cdot 2 \cdot \left( \frac{0,101}{0,099} + \frac{0,052 \cdot 0,098}{0,101} \right)}{0,781 \cdot 2 \cdot \left( \frac{0,101}{0,099} + \frac{0,052 \cdot 0,098}{0,101} \right) + 200 \cdot 200 \cdot 31,11 \cdot 0,066} \cdot \frac{10}{0,066} = \\ &= 0,003 \text{ рад / с.} \end{aligned}$$

Характеристика  $\omega(I_{1Y})$  пояснює принцип роботи САК швидкості відповідно до структурної схеми рисунка 2.9 і побічно характеризує статичні характеристики частотно-регульованого асинхронного електропривод з векторним керуванням. Для побудови електромеханічної характеристики  $\omega(I_{1\phi})$  необхідно для вибраних значень струму  $I_{1Y}$  визначити відповідні їм значення струму  $I_{1\phi}$  двигуна за виразом.

Вираз для механічної характеристики  $\omega(M)$  електроприводу:

$$\begin{aligned} \omega(1) &= \omega_0(\psi_0) - \Delta\omega_3(I) = \\ &= \frac{k_{PШ} \cdot k_{PCY} \cdot k_E \cdot k_{Ш}}{\psi_{2XH} \cdot z_p \cdot \left(\frac{L_m}{L_2} + \frac{\sigma \cdot L_1}{L_m}\right) + k_{PШ} \cdot k_{PCY} \cdot k_1 \cdot k_{Ш}} \cdot \frac{U_0}{k_{Ш}} - \\ &\quad \frac{(R_C + k_{PCY} \cdot k_E \cdot k_{Ш}) / (\psi_{2XH} \cdot z_p \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{L_m}{L_2})}{\psi_{2XH} \cdot z_p \cdot \left(\frac{L_m}{L_2} + \frac{\sigma \cdot L_1}{L_m}\right) + k_{PШ} \cdot k_{PCY} \cdot k_E \cdot k_{Ш}} \cdot M; \\ \omega(1) &= \omega_0(\psi_0) - \Delta\omega_3(I) = \\ &= \frac{200 \cdot 200 \cdot 31,11 \cdot 0,066}{0,781 \cdot 2 \cdot \left(\frac{0,101}{0,099} + \frac{0,052 \cdot 0,098}{0,101}\right) + 200 \cdot 200 \cdot 31,11 \cdot 0,066} \cdot \frac{10}{0,066} - \\ &\quad \frac{(0,623 + 200 \cdot 31,11 \cdot 0,066 / (0,781 \cdot 2 \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{0,101}{0,099}))}{0,914 \cdot 2 \cdot \left(\frac{0,109}{0,107} + \frac{0,064 \cdot 0,105}{0,109}\right) + 200 \cdot 200 \cdot 31,11 \cdot 0,066} \cdot 60,66 = 150,38 \text{ рад / с.} \end{aligned} \quad (2.136)$$

– абсолютна похибка швидкості електроприводу в замкненій системі з збурення (при зміні моменту навантаження):

$$\Delta\omega(M) = \frac{(R_C \cdot k_{PCY} \cdot k_E \cdot k_{Ш}) / (\psi_{2XH} \cdot z_p \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{L_m}{L_2})}{\psi_{2XH} \cdot z_p \cdot \left(\frac{L_m}{L_2} + \frac{\sigma \cdot L_1}{L_m}\right) + k_{PШ} \cdot k_{PCY} \cdot k_E \cdot k_{Ш}} \cdot M; \quad (2.137)$$

$$\Delta\omega(M) = \frac{(0,623 \cdot 200 \cdot 31,11 \cdot 0,066) / (0,781 \cdot 2 \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{0,101}{0,099})}{0,781 \cdot 2 \cdot (\frac{0,101}{0,099} + \frac{0,052 \cdot 0,098}{0,101}) + 200 \cdot 200 \cdot 31,11 \cdot 0,066} \cdot 60,66 =$$

$$= 0,127 \text{ рад / с.}$$

Відносна похибка швидкості електроприводу за збуренням (при зміні моменту навантаження) знаходиться за виразом:

$$\Delta_H(U_{3Ш}) = \frac{\omega(U_{3Ш}; M_{\text{МІН}}) - \omega(U_{3Ш}; M_{\text{МАКС}})}{\omega(U_{3Ш}; \omega(U_{3Ш}; M_{\text{МАКС}}))} \cdot 100\%; \quad (2.138)$$

Де мінімальне та максимальне значення електромагнітного моменту двигуна  $M$ , що відповідають граничним значенням діапазону зміни навантаження електроприводу приймаються рівними:

$$M_{\text{МІН}} = 0,15 \cdot M_{\text{ДВН}} + M_{\text{СДВ}}; \quad (2.139)$$

$$M_{\text{МІН}} = 0,15 \cdot 60,66 + 16 = 25,1 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

$$M_{\text{МАКС}} = M_{\text{ДВН}} + M_{\text{СДВ}}; \quad (2.140)$$

$$M_{\text{МАКС}} = 60,66 + 16 = 76,66 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

–при визначенні похибки комплектного регульованого електроприводу;

$$M_{\text{МІН}} = M_{\text{СМІН}} + M_{\text{СДВ}}; \quad (2.141)$$

$$M_{\text{МАКС}} = M_{\text{СМАКС}} + M_{\text{СДВ}}; \quad (2.142)$$

–при визначенні похибки виробничого електроприводу механізму.

#### 2.9.4 Режим стабілізації струму

В однозонному електроприводі з постійним струмообмеженням при умови, що потокозчеплення підтримується постійним  $\psi_{2x} = \psi_{2xн}$  в пуско-гальмівних режимах та при великих короткочасних навантаженнях внаслідок насичення регулятора швидкості обмежуватиметься струм і момент двигуна на постійному рівні. Структурна схема САК швидкості однозонного електроприводу з постійним струмообмеженням для статичного режиму стабілізації струму наведено на рисунку 2.44.

Схема рисунка 2.44 описується такою системою рівнянь:

$$(U_{\text{ршдоп}} - k_{\text{CY}} \cdot I_{1Y}) \cdot k_{\text{PC}} \cdot k_1 = U_{1Y}; \quad (2.143)$$

$$(U_{1Y} - E_{\text{ДВ}}) \cdot \frac{1}{R_E} = I_{1Y}; \quad (2.144)$$

$$\Psi_{2\text{XH}} \cdot z_p \cdot \left( \frac{L_m}{L_2} + \frac{\sigma \cdot L_1}{L_m} \right) \cdot \omega = E_{\text{ДВ}}; \quad (2.145)$$

$$I_{1Y} \cdot \Psi_{2\text{XH}} \cdot \frac{3}{2} \cdot z_p \cdot \frac{L_m}{L_2} = M; \quad (2.146)$$

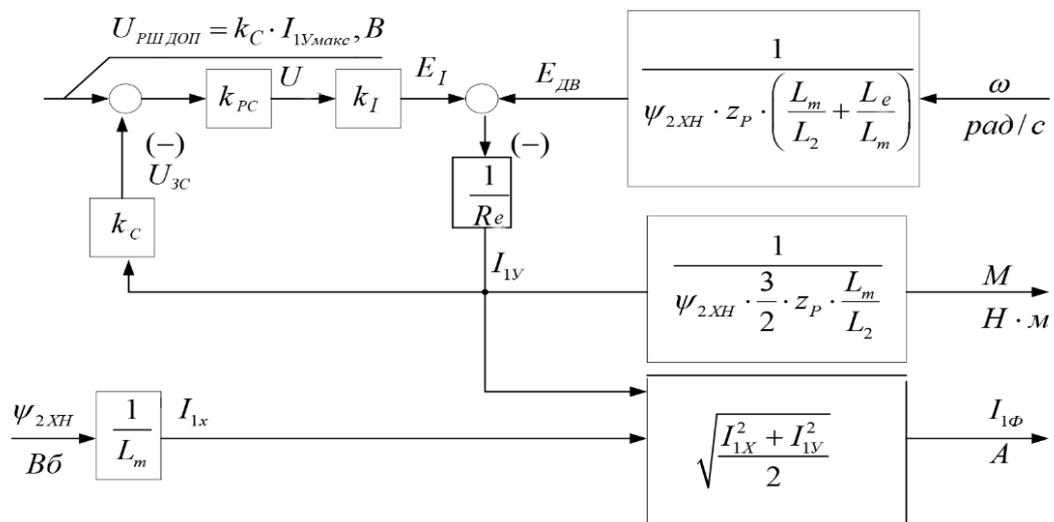


Рисунок 2.44 – Структурна схема САК швидкості одно-зонного електроприводу з постійним струмообмеженням для статичного режиму стабілізації струму

Вирішивши спільно наведену систему рівнянь щодо струму  $I_{1Y}$  та електромагнітного моменту  $M$ , знайдемо відповідно вираз для електромеханічної  $I_{1Y}(\omega)$  механічної  $M(\omega)$  характеристик електроприводу в режимі стабілізації струму (обмеження моменту) двигуна.

Вираз для електромеханічної характеристики  $I_{1Y}(\omega)$  приводу:

$$I_{1Y}(\omega) = I_{1Y\text{СТОП}}(U_{\text{РШДОП}}) - \Delta I(\omega) =$$

$$\frac{k_{\text{PCY}} \cdot k_1 \cdot k_C}{R_E + k_{\text{PCY}} \cdot k_1 \cdot k_C} \cdot \frac{U_{\text{РШДОП}}}{k_C} - \frac{\Psi_{2\text{XH}} \cdot z_p \cdot \left(\frac{L_m}{L_2} + \frac{\sigma \cdot L_1}{L_m}\right)}{R_E \cdot k_{\text{PCY}} \cdot k_1 \cdot k_C} \cdot \omega; \quad (2.147)$$

$$I_{1Y}(\omega) = I_{1Y\text{СТОП}}(U_{\text{РШДОП}}) - \Delta I(\omega) =$$

$$\frac{200 \cdot 31,11 \cdot 0,313}{0,623 + 200 \cdot 31,11 \cdot 0,313} \cdot \frac{10}{0,313} - \frac{0,781 \cdot 2 \cdot \left(\frac{0,101}{0,099} + \frac{0,052 \cdot 0,098}{0,101}\right)}{0,623 \cdot 200 \cdot 31,11 \cdot 0,066} \cdot 150,5 =$$

$$= 31,86 \text{ A.}$$

де:  $I_{1Y\text{МАКС}} = \frac{U_{\text{РШДОП}}}{k_C}$  – задане значення максимального струму, А;

$$I_{1Y\text{СТОП}}(U_{\text{РШДОП}}) = \frac{k_{\text{PCY}} \cdot k_1 \cdot k_C}{R_E + k_{\text{PCY}} \cdot k_1 \cdot k_C} \cdot \frac{U_{\text{РШДОП}}}{k_C}; \quad (2.148)$$

$$I_{1Y\text{СТОП}}(U_{\text{РШДОП}}) = \frac{200 \cdot 31,11 \cdot 0,313}{0,623 + 200 \cdot 31,11 \cdot 0,066} \cdot \frac{10}{0,313} = 31,99 \text{ A.}$$

фактичне значення максимального струму  $I_{1Y}$  при  $\omega=0$  (в режимі стопоріння).

Абсолютна похибка струму при швидкості  $\omega$ :

$$\Delta I_{1Y}(\omega) = \frac{\Psi_{2\text{XH}} \cdot z_p \cdot \left(\frac{L_m}{L_2} + \frac{\sigma \cdot L_1}{L_m}\right)}{k_E + k_{\text{PCY}} \cdot k_1 \cdot k_C} \cdot \omega; \quad (2.149)$$

$$\Delta I_{1Y}(\omega) = \frac{0,781 \cdot 2 \cdot \left(\frac{0,101}{0,099} + \frac{0,052 \cdot 0,098}{0,101}\right)}{0,623 + 200 \cdot 31,11 \cdot 0,066} \cdot 150,5 = 0,129 \text{ A.}$$

Характеристика  $I_{1Y}(\omega)$  пояснює принцип роботи САК швидкості відповідно до структурної схеми та опосередковано характеризує статичні показники електроприводу в режимі стабілізації струму. Для отримання електромеханічної характеристики  $I_{1\Phi}(\omega)$  в режимі стабілізації струму необхідно для отриманих значень струму  $I_{1Y}$  по виразу вказаного вище визначити відповідні їм значення струму двигуна  $I_{1\Phi}$ . Вираз для механічної характеристики електроприводу в режимі стабілізації (обмеження) струму;

$$M(\omega) = M_{\text{СТОП}}(U_{\text{РШДОП}}) - \Delta M(\omega) =$$

$$\frac{k_{\text{PC}} \cdot k_1 \cdot k_{\text{T}}}{R_{\text{E}} + k_{\text{PCY}} \cdot k_1 \cdot k_{\text{C}}} \cdot \omega_{2\text{XH}} \cdot \frac{3}{2} \cdot z_{\text{P}} \cdot \frac{L_{\text{m}}}{L_2} \cdot \frac{U_{\text{РШДОП}}}{k_{\text{C}}} -$$

$$\frac{\psi_{2\text{XH}}^2 \cdot z_{\text{P}}^2 \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{L_{\text{m}}}{L_2} \cdot \left( \frac{L_{\text{m}}}{L_2} + \frac{\sigma \cdot L_1}{L_{\text{m}}} \right)}{R_{\text{E}} \cdot k_{\text{PCY}} \cdot k_1 \cdot k_{\text{C}}} \cdot \omega;$$
(2.150)

$$M(\omega) = M_{\text{СТОП}}(U_{\text{РШДОП}}) - \Delta M(\omega) =$$

$$\frac{200 \cdot 31,11 \cdot 0,313}{0,623 + 200 \cdot 31,11 \cdot 0,066} \cdot 0,781 \cdot \frac{3}{2} \cdot 2 \cdot \frac{0,101}{0,099} \cdot \frac{10}{0,313} -$$

$$\frac{0,781^2 \cdot 2^2 \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{0,101}{0,099} \cdot \left( \frac{0,101}{0,099} + \frac{0,052 \cdot 0,098}{0,101} \right)}{150,5} = 76,17 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

$$M_{\text{МАКС}}(U_{\text{РШДОП}}) = \psi_{2\text{XH}} \cdot \frac{3}{2} \cdot z_{\text{P}} \cdot \frac{L_{\text{m}}}{L_2} \cdot \frac{U_{\text{РШДОП}}}{k_{\text{C}}};$$
(2.151)

$$M_{\text{МАКС}}(U_{\text{РШДОП}}) = 0,781 \cdot \frac{3}{2} \cdot 2 \cdot \frac{0,101}{0,099} \cdot \frac{10}{0,313} = 2437 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

– фактичне значення максимального електромагнітного моменту двигуна при  $\omega = 0$  (в режимі стопоріння двигуна);

$$M_{\text{СТОП}}(U_{\text{РШДОП}}) = \frac{k_{\text{PC}} \cdot k_1 \cdot k_{\text{C}}}{R_{\text{E}} \cdot k_{\text{PCY}} \cdot k_1 \cdot k_{\text{C}}} \cdot \psi_{2\text{XH}} \cdot \frac{3}{2} \cdot z_{\text{P}} \cdot \frac{L_{\text{m}}}{L_2} \cdot \frac{U_{\text{РШДОП}}}{k_{\text{C}}};$$
(2.152)

$$M_{\text{СТОП}}(U_{\text{РШДОП}}) = \frac{200 \cdot 31,11 \cdot 0,313}{0,623 + 200 \cdot 31,11 \cdot 0,066} \cdot 0,781 \cdot \frac{3}{2} \cdot 2 \cdot \frac{0,101}{0,099} \cdot \frac{10}{0,313} =$$

$$= 76,46 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

– абсолютна похибка електромагнітного моменту двигуна при швидкості  $\omega$ :

$$\Delta M(\omega) = \frac{\psi_{2\text{XH}}^2 \cdot \frac{3}{2} \cdot z_{\text{P}}^2 \cdot \frac{L_{\text{m}}}{L_2} \cdot \left( \frac{L_{\text{m}}}{L_2} + \frac{\sigma \cdot L_1}{L_{\text{m}}} \right)}{R_{\text{E}} + k_{\text{PCY}} \cdot k_1 \cdot k_{\text{C}}} \cdot \omega;$$
(2.153)

$$\Delta M(\omega) = \frac{0,914^2 \cdot \frac{3}{2} \cdot 2^2 \cdot \frac{0,109}{0,107} \cdot \left( \frac{0,109}{0,107} + \frac{0,064 \cdot 0,105}{0,109} \right)}{0,729 + 200 \cdot 31,11 \cdot 0,27} \cdot 152,61 = 0,303 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Електромеханічні  $\omega(I_{1Y})$  і  $\omega(I_{1\Phi})$  та механічні  $\omega(M)$  характеристики електроприводу в режимі стабілізації швидкості та, відповідно  $I_{1Y}(\omega)$ ,  $I_{1\Phi}(\omega)$  і  $M(\omega)$  в області обмеження струму ідентичні за формою і є жорсткі характеристики у першому режимі роботи.

Статичні характеристики однозонного електроприводу представлені на рисунку 2.45, 2.46.

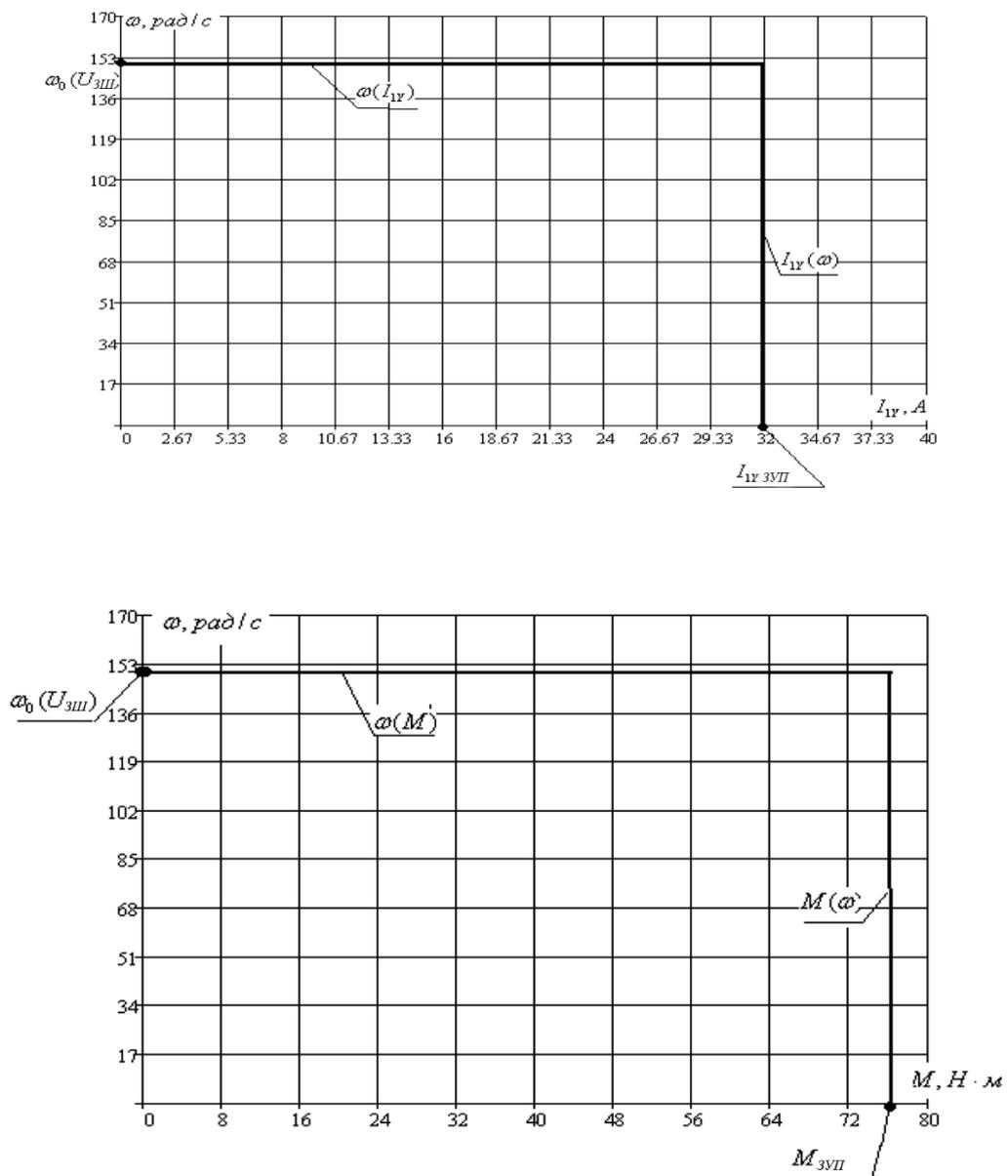


Рисунок 2.45 – Статичні характеристики однозонного електроприводу:

А, В – електромеханічні

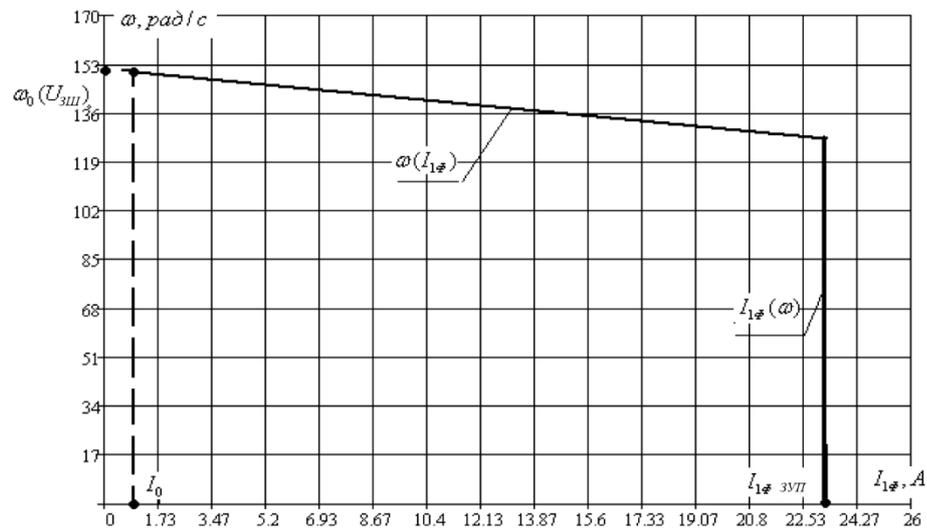


Рисунок 2.46 – Механічна характеристики однофазного електроприводу:

#### Висновок за розділом

Провели розрахунки потужності двигуна та обрали двигун 4A180S4У3. Після проведеного аналізу типів перетворювачів частоти обрали спосіб керування – векторне керування без датчика швидкості, діапазон регулювання 20. Розробили структурну схему силового каналу. Виконали синтез та аналіз лінеаризованої САК електроприводом прес-ножиць.

## РОЗДІЛ 3 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

### 3.1 Вибір перетворювача частоти

Згідно розрахунків, зроблених у розділі 2, вибираємо перетворювач частоти Danfoss Micro Drive FC51. Параметри вибраного перетворювача частоти зведено до таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Параметри перетворювача частоти Danfoss Micro Drive FC51

Тип	Параметри живильної мережі		Вихідна напруга $U_H$ , %	Вихідна частота, несуча частота $f$ , Гц	Вихідний струм		Рекомендована потужність $P_2$ , Вт
	$U_{1.ен}$ , В	$f_c$ , Гц			$I_{VZT,н}$ , А	$I_{VLTmax}$ , А	
Danfoss FC51	380	50	(0–100)	(0–132) 8 кГц	44	70,7	$22 \cdot 10^3$

Захист паралельних кіл:

Щоб захистити установку від перевантаження по струму та пожежі, всі паралельні ланцюги в установці, комутаційні пристрої, механізми тощо. повинні мати захист від короткого замикання та перевантаження по струму відповідно до державних/міжнародних правилами.

Захист від короткого замикання:

Для захисту обслуговуючого персоналу та обладнання у разі внутрішньої несправності в блоці або короткого замикання в ланцюзі постійного струму компанія Danfoss рекомендує застосовувати запобіжники, зазначені в наведених нижче таблицях. Перетворення частоти забезпечує повний захист від короткого замикання на виході двигуна або гальма.

Максимальний струмовий захист:

Забезпечте захист від перевантаження, щоб запобігти перегріву кабелів в установці. Максимальний струмовий захист повинен виконуватись відповідно до державних нормами та правилами. Плавкі запобіжники повинні

бути розраховані на захист у колах, що допускають максимальний струм 100,000 А(еф.) (симетрична схема), максимальне напруга 480 Ст.

Безвідповідність технічним умовам UL:

Якщо вимоги UL/cUL не є обов'язковими, компанія Danfoss рекомендує приміняти запобіжники, зазначені у таблиці 1.3, що забезпечить відповідність вимогам стандарту EN50178. Недотримання наведених рекомендацій може у разі несправності призвести до пошкодження перетворювача частоти [19].

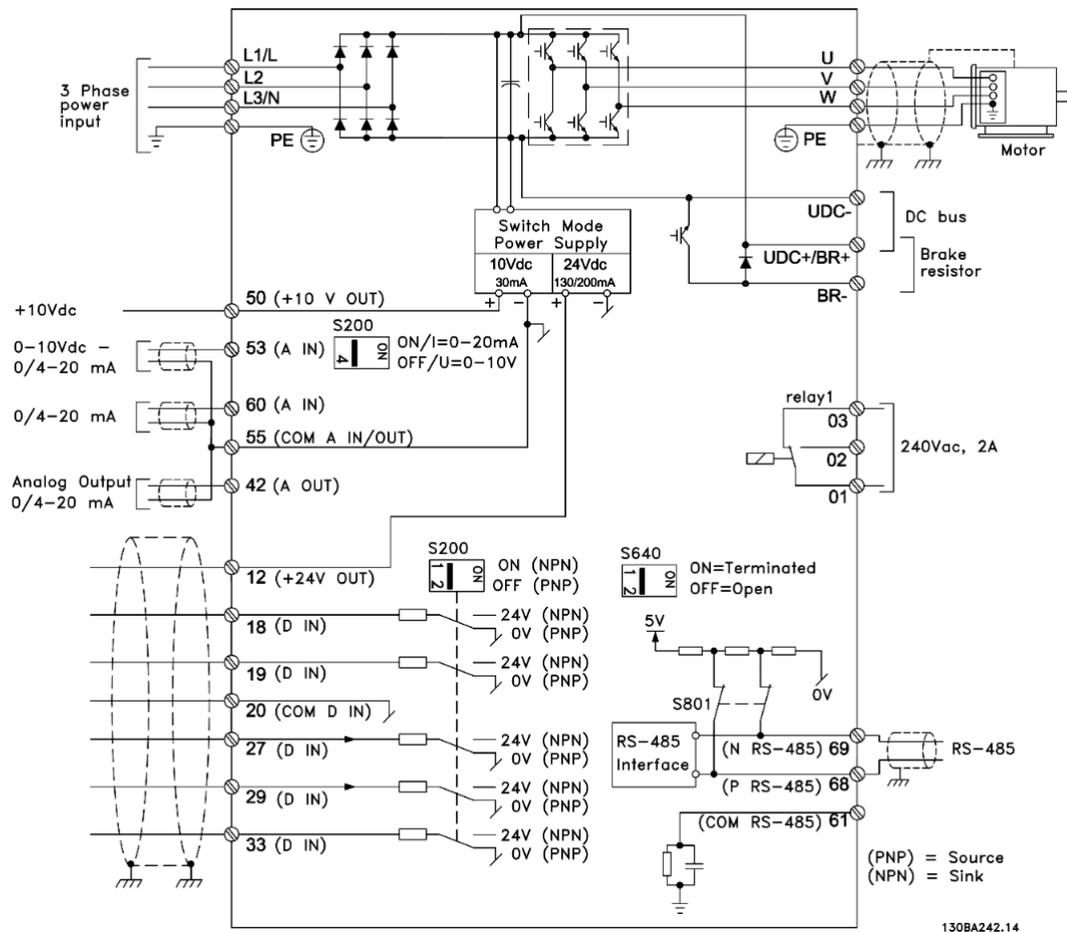


Рисунок 3.1 – Схема електричних з'єднань клем Danfoss Micro Drive FC51

Гальмівні резистори можна замовити у компанії Danfoss. Збільшення коефіцієнта потужності та поліпшення характеристик ЕМС може бути досягнуто шляхом встановлення додаткових мережних фільтрів Danfoss. Фільтри мережі Danfoss можна також використовувати для розділення навантаження.

### 3.2 Вибір програмованого логічного контролера

Програмований контролер SIMATIC S7-1200 виробництва SIEMENS – це базовий контролер для вирішення різних завдань автоматизації малого та середнього рівня. Цей контролер має модульну конструкцію та

Універсальне призначення. Він здатний працювати у реальному масштабі часу, може використовуватися для побудови щодо простих вузлів локальної автоматики або вузлів комплексних систем автоматичного керування, що підтримують інтенсивний комунікаційний обмін даними через мережі Industrial Ethernet/PROFINET, і навіть PtP (Point-to-Point) з'єднання.

Програмований контролер S7-1200 має компактні пластикові корпуси зі ступенем захисту IP20 може монтуватися на стандартну 35 мм. профільну шину DIN або на монтажну плату та працює в діапазоні температур від 0 до +50 °C. Він здатні обслуговувати 24 дискретних та 12 аналогового каналу введення-виведення. центральний процесор [18].

Центральний процесор має високу продуктивність і забезпечує підтримку широкого набору функцій:

- Програмування мовами LAD (Ladder Diagram), FBD (Function Block Diagram) та SCL (Structured Control Language), вичерпний набір команд.
- Висока швидкодія, час виконання логічної операції не перевищує 0,1 мкс.
- Вбудована пам'ять, що завантажується, об'ємом до 4 Мбайт, що розширюється картою пам'яті ємністю до 4 Гбайт.
- Робоча пам'ять ємністю до 150 Кбайт.
- Енергонезалежна пам'ять ємністю 10 Кбайт для необслуговуваного збереження даних під час перебоїв у живленні контролера.
- Вбудовані дискретні входи універсального призначення, що дозволяють вводити потенційні чи імпульсні сигнали.
- Вбудований апаратний годинник реального часу із запасом ходу при перебоях у живленні 20 днів.

- Вбудовані швидкісні лічильники з частотою проходження вхідних сигналів до 1 МГц.
- Вбудовані імпульсні виходи з частотою проходження імпульсів до 1 МГц (тільки в CPU із транзисторними виходами).
- Підтримка функцій ПД регулювання.
- Підтримка функцій керування переміщенням відповідно до вимог стандарту PLCopen.
- Підтримка функцій поновлення операційної системи.
- Вбудований WEB – сервер, що дозволяє виконувати дистанційну діагностику програмованих контролерів з використанням стандартного Веб браузера.
- Парольний захист програми користувача.
- Комунікаційні модулі CM12xx та CP12xx для підключення контролера до мережі Industrial Ethernet, PROFIBUS DP, обміну даними через послідовні канали зв'язку, мобільну мережу GSM, канали зв'язку систем телекерування.

Основні характеристики програмованого логічного контролера SIMATIC S7-1200 представлені у таблиці 3.2.

Зовнішній вигляд ПЛК представлений рисунком 3.2.



Рисунок 3.2 – ПЛК SIMATIC S7-1200

Таблиця 3.2 – Основні характеристики контролерів

Основні характеристики	ОВЕН ПЛК 160	SIMATIC S7-1200	VIPA System 200V
Кількість входів/виходів	Дискретні входи - 16 Дискретні виходи - 12 Аналогові входи - 8 Аналогові виходи - 4	Дискретні - 24 I/O аналогові - 12 I/O	Дискретні – 12 I/O Податкові – 8 I/O
Обсяг пам'яті	8 Мбайт	150 Кбайт	32...128 Кбайт
Час виконання операції	1 мс	0,1 мкс	з бітами – 0,25 мкс зі словами - 1,2 мкс
Таймери/лічильники	Годинник реального часу з автономним акумуляторним живленням (точність ходу – не більше 3 хв на добу)	Вбудовані апаратний годинник реального часу із запасом ходу при перебоях у живленні 20 днів; вбудовані швидкісні лічильники з частотою вхідних сигналів до 1 МГц; вбудовані імпульсні виходи з частотою слідування імпульсів до 1 МГц (тільки в CPU з транзисторними виходами)	128/256
Програмування	ПО CoDeSys	LAD (Ladder Diagram), FBD (Function Block Diagram); SCL (Structured Control Language)	WinPLC7 від VIPA/STEP7 від Siemens
Протоколи	ОВЕН, Modbus RTU Modbus ASCII, Modbus TCP, DCON, GateWay (протокол CODESYS), Mass Storage Device	Industrial Ethernet/PROFINET, PtP (Point-to-Point) з'єднання.	ProfibusDP slave
Інтерфейс	RS-232, RS-485, Ethernet 10/100 Mbps	Ethernet/PROFINET	MP2I (MPI+PPI)

Оскільки ПЛК SIMATIC S7-1200 має більший обсяг пам'яті, можливість роботи в реальному масштабі часу та ширший спектр функцій, вибираємо саме його.

Оскільки вбудованих аналогових входів/виходів мало, то існує необхідність використання додаткових модулів введення/виведення аналогових сигналів.

### 3.3 Вибір комутаційної апаратури

Прилад призначений для перетворення вимірюваних аналогових сигналів у цифровий код та передачі результатів вимірювання в мережу RS-485. Призначається для побудови автоматизованих систем збору даних різних галузях промисловості, сільського та комунального господарства, на транспорті [18].

Як модуль аналогового введення вибираємо SM 1231 виробництва SIEMENS.

Зовнішній вигляд SM 1231 представлений рисунку 3.3.

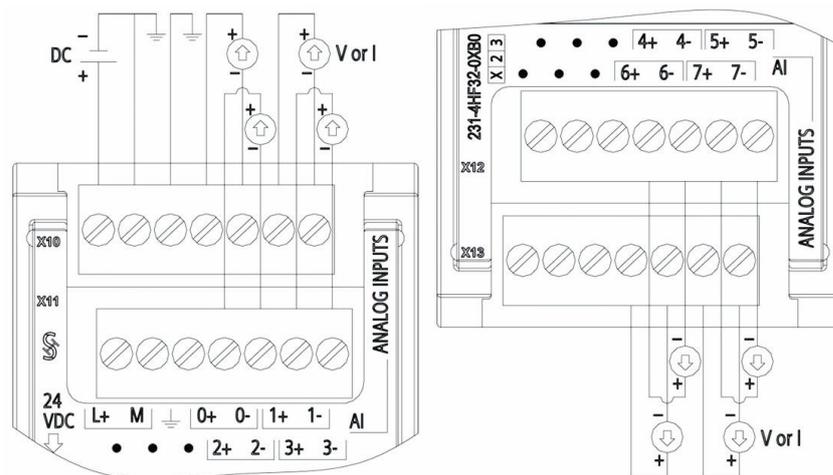


Рисунок 3.3 – Модуля аналогового введення SM 1231

Основні характеристики модуля аналогового введення SM 1231 наведено у таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Основні характеристики SM 1231

Найменування	Позначення	Технічні параметри	Маса, кг
Модуль аналогового введення	SM 1231	SIMATIC S7-1200, 4 AI, +/-10 В, +/-5 В, +/-2,5 В, АБО 0-20 МА 12 БІТ + ЗНАК (13 БІТ ADC)	0,172

Модуль аналогового виводу призначений для перетворення цифрових сигналів, що передаються по мережі RS-485, аналогові сигнали діапазоном від 4 до 20 мА і аналогові сигнали діапазоном від 0 до 10 В для керування виконавчими механізмами або передачі сигналів приладам реєстрації та самописцям.

Як модуль аналогового виводу вибираємо SM 1232 виробництва SIEMENS. Основні характеристики модуля аналогового виведення SM 1232 наведено у таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 - Основні характеристики SM 1232

Найменування	Позначення	Технічні параметри	Маса, кг
Модуль аналогового виведення	SM 1232	SIMATIC S7-1200, 4 AI, +/-10 В, +/-5 В, +/-2,5 В, АБО 0-20 МА 12 БІТ + ЗНАК (13 БІТ ADC)	0,169

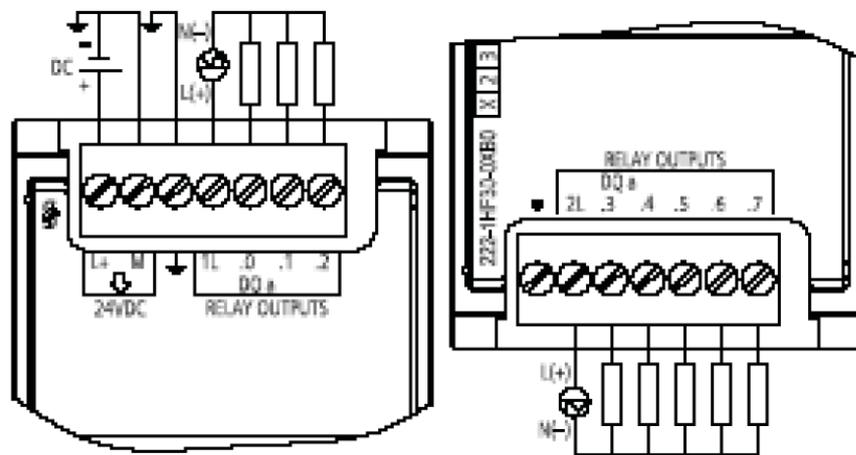


Рисунок 3.4 – Модуля аналогового виведення SM 1232

Для візуалізації проходження ТП, відображення поточних параметрів, завдання вхідних величин та індикації каналу аварії застосуємо сенсорну графічну панель оператора SIPLUS HMI Basic Panel виробництва SIEMENS (рис. 3.16), яка може використовуватися для вирішення задач оперативного керування та моніторингу на локальному рівні у всіх областях промислового виробництва, а також у системах автоматизації будівель [18].

Основні характеристики панелі оператора SIPLUS HMI Basic Panel наведено у таблиці 3.5.

Таблиця 3.5 – Основні характеристики SIPLUS HMI Basic Panel

Найменування	Позначення	Технічні параметри	Маса, кг
Панель оператора	SIPLUS HMI Basic Panel	КТР600 BASIC COLOR PN 5,7," ДІАПАЗОН РОБОЧИХ ТЕМПЕРАТУР -25...+60 ГРАД. ЦЕЛЬСІЯ, 3 КОНФОРМНИМ ПОКРИТТЄМ НА ОСНОВІ 6AV6647-0AD11-3AX0 . 5,7" TFT ДИСПЛЕЙ, 256 КОЛЬОРІВ, ІНТЕРФЕЙС ETHERNET	1,07

Зовнішній вигляд SIPLUS HMI Basic Panel представлений рисунку 3.5.



Рисунок 3.5 – Панель оператора SIPLUS HMI Basic Panel

Для живлення модулів введення, виведення, ПЛК та панелі оператора виберемо блок живлення PM1207 виробництва SIEMENS.

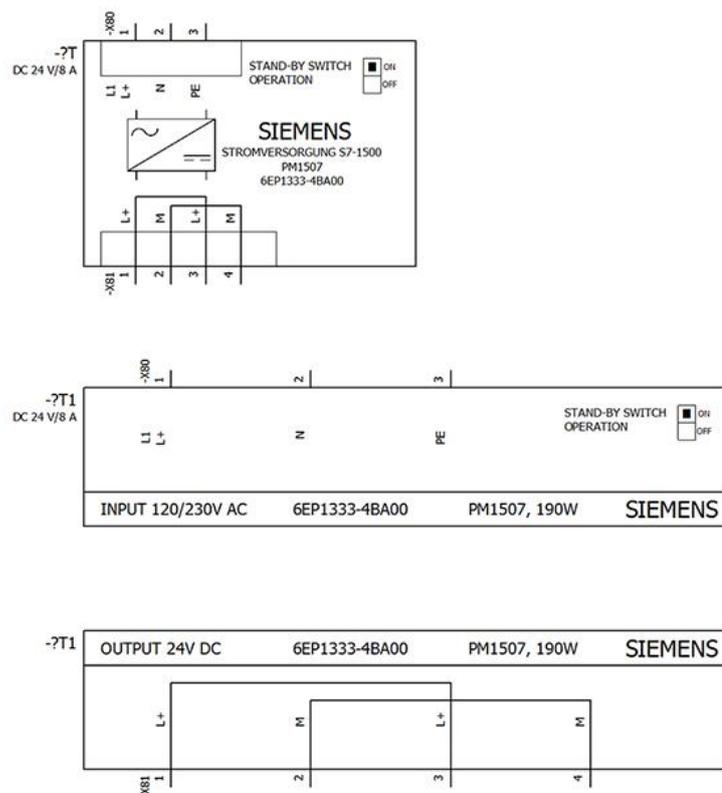
Блок живлення PM1207 (Power Module) є оптимальним для нової серії контролерів SIMATIC S7-1200 з дизайну та функціональності та забезпечує зовнішнє живлення входів і виходів, коли потужності, вбудованого в ЦПУ джерела харчування, мало [18].

Основні характеристики блока живлення PM1207 представлені в таблиці 3.6.

Таблиця 3.6 – Основні характеристики SIPLUS PM1207

Найменування	Позначення	Технічні параметри	Маса, кг
Блок живлення	PM1207	СТАБІЛІЗОВАНИЙ БЛОК ЖИВЛЕННЯ, ВХІД: ~120/230 В, ВИХІД: =24 В/2,5 А	0,30

Зовнішній вигляд PM1207 представлений рисунку 3.6.



Малюнок 3.16 – Блок живлення PM1207

Для здійснення технологічної сигналізації скористаємося блоком технологічної сигналізації ПТС-64.

Блок технологічної сигналізації призначений для узагальненої та поканальної сигналізації параметрів технологічних процесів, значення яких у процесі роботи перевищують ті чи інші технологічні уставки.

Використовується в локальних та комплексних системах промислової автоматизації виробничих процесів у схемах технологічної та аварійної сигналізації. Прилад технологічної сигналізації ПТС-64 складається з одного блоку ПТС-2 (провідний пристрій або прилад узагальненої сигналізації) та одного або кількох блоків ПТС-8 (відомий пристрій або поканальний прилад сигналізації).

Функціональні можливості:

Світлодіодна індикація спрацювання поканальної (ПТС-8) та узагальненої сигналізації (ПТС-2);

Підключення зовнішніх світлодіодних індикаторів (через клемний з'єднувач або роз'єм ПТС-Б);

Вибір типу сигналу сигналізації – статичний сигнал (постійне світіння) або динамічний із частотою F1 або F2. Використання F1 та F2 спрямовано на два різні (за тоном, силою звучання) звукові пристрої;

Квітування (зняття) сигналізації здійснюється за допомогою кнопки, що підключається до клем ПТС-2; Перевірка (тестування) сигналізації здійснюється за допомогою кнопки, що підключається до клем ПТС-2.

### **3.4 Розробка алгоритму роботи системи**

Виходячи з недоліків базової системи та вимог технічного завдання замінимо систему керування з релейно-контакторної на мікропроцесорну. Керування здійснюватиметься через пульт оператора та кнопкову панель. Усі операції керування механізмів прес-ножиць здійснюється в ручному та автоматичному режимах. Ручний режим є допоміжним, а автоматичний

режим є основним. Вибір режиму керування здійснюється оператором. Ручний режим передбачається для проведення ремонтно-налагоджувальних робіт, випробування (ручного роздільного керування після завершення налагоджувальних робіт), ліквідації аварійних та позаштатних ситуацій.

Для виконання цих функцій на пультах посту керування прес-ножиць передбачено відповідний набір органів керування, включаючи кнопку вибору режиму керування.

Після того, як системі керування буде подано сигнал на автоматичну роботу і буде завантажена партія металобрухту, і виходячи з початкового стану (спираючись на дані безконтактних вимикачів), система керування може повністю провести цикл різання металобрухту. У разі порушень технологічного процесу оператор має можливість втрутитися в роботу та внести відповідні корективи.

Аварійний зупинка виконується у разі виникнення нештатних або аварійних ситуацій при роботі установки прес-ножиць, а також для запобігання аварійним ситуаціям, що загрожують безпеці обслуговуючого персоналу.

Системою керування установкою передбачено:

- ключ-бірка, встановлена на пульті керування - без переведення даного ключа в робоче положення оператор не може виконувати керування стендом;
- захист ланцюгів живлення електрообладнання автоматичними вимикачами;
- аварійна зупинка стенду за допомогою кнопки «Аварійний стоп», встановленої на пульті керування;
- включення світлової та звукової сигналізації на пульті керування при виникненні аварійних ситуацій (реалізується через панель оператора).

Керування роботою стенду здійснюється з пульта керування. На кришці пульта будуть розміщені такі органи керування та індикації:

- світловий індикатор білий, «Напруга подано», вказує на те, що на пульт керування подано напругу;

- ключ-бірка, з фіксацією, на 2 положення, «ключ – бірка», без переведення даного ключа в робоче положення оператор не може виконувати керування станом;

- кнопка натискна, червона, «Аварійний стоп», служить для аварійного зупинення роботи стану;

- світловий індикатор червоний, «Аварія», вказує на те, що під час роботи стану сталася аварія;

- звуковий сигнальний пристрій, «Звуковий сигнал», подача звукового сигналу вказує на те, що під час роботи стану сталася аварія;

- кнопкові панелі, служать для керування установкою прес-ножиць.

#### Висновок за розділом

Вибрали перетворювач частоти Danfoss Micro Drive FC51, який зручний в налаштуванні, володінні неперевершеною надійністю, оптимальним набором функцій і гранично простий при введенні в експлуатацію. Вибрали програмований логічний контролер SIMATIC S7-1200. Сімейство S7-1200 є серією ПЛК, за допомогою яких можна вирішувати широкий спектр завдань автоматизації. Компактна конструкція, низька вартість і потужний набір команд роблять S7-1200 дуже придатним для безлічі додатків в області керування. Для обраного контролера підібрали сучасну комутаційну апаратуру.

## ВИСНОВКИ

У результаті проведеного дослідження були виконані поставлені завдання.

У першому розділі проаналізували процес різання металу. Виявили, що прес-ножиці є одним з найпопулярніший метод різання металу. Комбіновані прес-ножиці є найбільш популярним типом. Провели огляд системи керування електроприводом прес-ножиць та виявили недоліки у його роботі.

У другому розділі провели розрахунки потужності двигуна. За результатами побудови механічних та електромеханічних характеристик електропривода та навантаження при векторному керуванні обрали двигун 4A180S4У3. Після проведеного аналізу типів перетворювачів частоти обрали спосіб керування – векторне керування без датчика швидкості, діапазон регулювання 20. Розробили структурну схему силового каналу. Виконали синтез та аналіз лінеаризованої САК електроприводом прес-ножиць.

У третьому розділі вибрали перетворювач частоти Danfoss Micro Drive FC51, який зручний в налаштуванні, володінні неперевершеною надійністю, оптимальним набором функцій і гранично простий при введенні в експлуатацію. Вибрали програмований логічний контролер SIMATIC S7-1200. Сімейство S7-1200 є серією ПЛК, за допомогою яких можна вирішувати широкий спектр завдань автоматизації. Компактна конструкція, низька вартість і потужний набір команд роблять S7-1200 дуже придатним для безлічі додатків в області керування. Для обраного контролера підібрали сучасну комутаційну апаратуру.

Використання сучасних методів керування технологічним процесом, а також новітніх технічних засобів автоматизації надасть можливість реалізувати якісно нову технологію керування електроприводом прес-ножиць.

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Автоматизація технологічних процесів і системи автоматичного керування: Навчальний посібник /Барало О.В., Самойленко П.Г., Гранат С.Є., Ковальов В.О. – К.: Аграрна освіта, 2010. – 557 с.
2. Віштак І. В. Огляд обладнання для механічної обробки металу/ І. В. Віштак і Є. О. Кобилянський//ВМТ. 2016. вип. 2, С. 15–22.
3. Галай М. В. Імпульсні, цифрові та релейні системи автоматичного керування: навчальний посібник: – Полтава: ПолтНТУ, –2002. – 222 с.
4. Галай М. В. Лінійні неперервні системи автоматичного керування: навчальний посібник: – Полтава: ПолтНТУ, – 2001. – 140 с.
5. Голодний І.М., Червінський Л.С., Жильцов А.В., Санченко О.В. Романенко О.І. Г Моделювання регульованого електропривода: Підручник. – К.: Аграр Медіа Груп, 2019. – 266 с.
6. Грановский Г. И. Резание металлов. / Г. И. Грановский, В. Г. Грановский. – М. : Высшая школа, 1986. – 304 с.
7. Зеленов А. Б. Синтез та цифрове моделювання систем керування електроприводів постійного струму з вентильними перетворювачами : навчальний посібник / А. Б. Зеленов, І. С. Шевченко, Н. І. Андрєєва. – Алчевськ: ДГМІ, 2002. – 400 с.
8. Мазур М.П. Основи теорії різання матеріалів : підручник [для вищ. навч. закладів] / М.П. Мазур, Ю.М. Внуков, В.Л. Доброскок, В.О. Залога, Ю.К. Новосьолов, Ф.Я. Якубов ; під заг. ред. М.П. Мазура. – 2-е вид. перероб. і доп. – Львів : Новий світ-2000, 2011. – 422 с.
9. Колб Ант. А, Колб А. А. Теорія електроприводу: Навчальний посібник. – 2-е вид. перероб. і доп. – Д., Національний гірничий університет, 2011. – 540 с.
10. Онушко В.В., Шефер О.В. Електричні машини – Полтава: ПолтНТУ, 2015. – 536с.

11. Пересада С. М. Керування електроприводами: посібник / С. М. Пересада, Є. О. Ніконенко – КПІ імені Ігоря Сікорського, Київ. 2022. 396 с.

12. Півняк Г. Г. Сучасні частотно-регульовані асинхронні електроприводи з широтноімпульсною модуляцією / Г. Г. Півняк, О. В. Волков. – Дніпропетровськ, НГУ, 2006. – 470 с.

13. Речишников В. А. Системы автоматизированного проектирования режущих инструментов / В. А. Речишников. – М. : ВНИИТЭМР. Сер. 9, 1987. Вып. 2. – 52 с.

14. Сучасні перетворювачі частоти в системах електропривода: навч. посібник / М. В. Загірняк, Т. В. Коренькова, А. П. Калінов, А. І. Гладир, В. Г. Ковальчук. – 2-ге вид., переробл. і доповн. – Харків: Видавництво «Точка», 2017. – 206 с.

15. Толочко О. І. Аналіз та синтез електромеханічних систем зі спостерігачами стану навчальний посібник / О. І. Толочко. – Донецьк: ООО “НОРД Комп’ютер”, 2004. – 298 с.

16. Шибітченко В. Г., Шефер О. В., Бороздін М. К. Датчики й регулятори в автоматизованому електроприводі: навчальний посібник: Полтава: ПОЛТНТУ, 2011. - 88 с.

17. Яцун М.А. Електричні машини – Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2001. – 428 с .

18. SIMATIC S7-1200 - гнучке рішення Ваших завдань [Електронний ресурс] // siemens.com. – 2022. – Режим доступу до ресурсу: <https://new.siemens.com/ua/uk/produkty/avtomatyzatsiya-promyslovosti/systemy-avtomatyzatsiyi/systemy-promyslovoyi-avtomatyzatsiyi-simatic/plc-kontrolery-simatic/simatic-s7-1200.html>. – Дата звернення. – 22.11.2022.

19. Перетворювач частоти Micro Drive FC51 22кВт 3-ф/380 [Електронний ресурс] // Chastotnik – 2022. – Режим доступу до ресурсу: <https://chastotnik.com.ua/Danfoss-r-132F0061>. – Дата звернення. – 22.11.2022.

