

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний аграрний університет
Факультет механізації сільського господарства
Кафедра електротехнічних систем, технологій та автоматизації в АПК

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. завідувача кафедри
«Електротехнічні системи,
технології та автоматизація в АПК»
_____ проф. Стаднік М. І.
«___» _____ 2016 р.

**Оптимізація режимів роботи приводу різання деревини
по критерію питомих енерговитрат**

пояснювальна записка до магістерської кваліфікаційної роботи
з спеціальності 8.10010101 «Енергетика сільськогосподарського
виробництва»

Розробив: студент гр. 61 ЕЕС – Маг
Бородянець Ярослав Григорович

(підпис)

Керівник: д.т.н професор каф. ЕСТА
Стаднік Микола Іванович

(підпис)

ЗМІСТ

ЗАВДАННЯ.....	2
ВІДОМІСТЬ ПРОЕКТУ.....	5
ВСТУП.....	6
1.КОРОДКА ХАРАКТЕРИСТИКА ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ І КРУГЛОПИЛЬНОГО ВЕРСТАТА.....	8
1.1. Електропривод та його елементи. Основні поняття та визначення.....	8
1.1.1. Загальні характеристики об'єкта дослідження.....	11
1.1.2. Технічні характеристики.....	13
1.2. Електрична схема та режими роботи електропривода.....	13
2. РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРОПРИВОДУ КРУГЛОПИЛЬНОГО ВЕРСТАТА І ЙОГО ОПТИМІЗАЦІЯ	17
2.1. Розрахунок механічних характеристик круглопильного верстата ...	17
2.2.Приведення моментів статичного опору і моментів інерції до вала електродвигуна.....	21
2.3. Попередній вибір двигуна та перевірка його за нагрівом та перевантаженням	23
2.4. Розрахунок динамічних параметрів електроприводу.....	26
2.5. Розрахунок електромеханічних характеристик електродвигуна.....	29
3. РОЗРАХУНОК І ВИБІР СИЛОВИХ ЕЛЕМЕНТІВ ПЕРЕТВОРЮВАЛЬНОГО АГРЕГАТА.....	31
3.1 Розрахунок і вибір силового трансформатора.....	31
3.2 Розрахунок і вибір вентилів.....	34
3.3 Розрахунок індуктивності згладжувального дроселя.....	36
3.4 Розрахунок і вибір елементів захисту силового кола.....	38
4. РОЗРАХУНОК ТА ПОБУДОВА ХАРАКТЕРИСТИЧНИХ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОДВИГУНА.....	40
4.1 Розрахунок зовнішніх характеристик.....	40
4.2. Налаштування регулятора струму.....	43
4.3.Налаштування регулятора швидкості.....	47

5. РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ТА ТЕХНІКО – ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ВИБОРУ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ.....	52
5.1.Розробка математичної моделі системи електроприводу.....	52
5.2 Техніко – економічне обгрунтування вибору систем електроприводу	57
6. Охорона праці.....	54
Винюков.....	68
Список використаної літератури.....	69
Додатки	71

ВСТУП

Віддавна на території України широко використовується деревина для задоволення різноманітних потреб населення (будівництво житла; виготовлення кріпильних матеріалів, меблів, посуду, господарського начиння; опалювання приміщень та ін.). Сукупність технологічних процесів, завдяки яким деревина та вироби з неї набувають заданих форм, розмірів і властивостей, називають деревообробкою, або дерево обробленням. Найчастіше деревообробку здійснюють завдяки механічному впливу різальних інструментів на матеріал.

Найбільше ділової деревини (круглих лісоматеріалів) використовує лісопильна промисловість, яка слугує сировинною базою для подальшої деревообробки. Одночасно ця промисловість здійснює спеціальну підготовку пиломатеріалів перед відправкою до споживача (сортування, сушіння, складування тощо). Підприємства деревообробної промисловості виготовляють товари народного споживання та продукцію, яка використовується в різних галузях господарювання (будівництві, транспорті, меблевому виробництві, сільському господарстві та ін.).

Пріоритетними напрямками розвитку деревообробної промисловості є застосування ресурсозберігаючих технологій, запровадження сучасних технологій виготовлення конструкційних матеріалів, автоматизація виробництва, забезпечення підприємств якісною сировиною, розробка нових конструкційних матеріалів.

До основних виробничих процесів належать: спилування дерев і виготовлення пиломатеріалів; стругальне, фрезерувальне, токарне виробництво; свердління та пазування; лакування та фарбування; художня обробка (різьблення, маркетрі, інкрустація, розпис та ін.); облицювання (личкування крайок та ін.); подрібнення відходів деревообробки тощо.

Найбільшим споживачем деревини в Україні є будівельна промисловість. На промислове та житлове будівництво витрачають близько 60% пиломатеріалів і будівельного лісу. Високосортні пиломатеріали та інші деревинні матеріали використовують для спорудження й опорядження арен спортивного та соціально-

культурного призначення, житлових будинків. Деревину використовують для виготовлення якісних столярних виробів (вікон, дверей, паркету та ін.).

У зв'язку з цим гостро стоїть проблема енергозбереження деревообробних станків, в тому числі круглопильних верстатів, підвищення їх ефективності, розширення функціональних можливостей систем керування ними.

1.КОРОДКА ХАРАКТЕРИСТИКА ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ І КРУГЛОПИЛЬНОГО ВЕРСТАТА.

1.1. Електропривод та його елементи. Основні поняття та визначення

Електропривод (рис. 1.1) – це електромеханічна система, яка складається з: електродвигунного (ЕД), перетворювального (ПП), механічного передавального (МПП) та керуючого (КП) пристроїв і призначена для приведення в рух виконавчих органів робочих машин та керування цим рухом.

Основою будь-якого електропривода є один або декілька електродвигунів постійного або змінного струму, призначений для перетворення електричної енергії в механічну. Вони отримують живлення від джерела електроенергії (ДЕЕ) через перетворюючий пристрій, який перетворює регулює параметри електричної енергії (струм, напругу, частоту).

Як перетворюючі пристрої в електроприводі використовують автономні генератори з регулюванням в широких межах напруга на їх затискачах, керовані тиристорні випрямлячі автотрансформаторі перетворювачі частоти та ін.

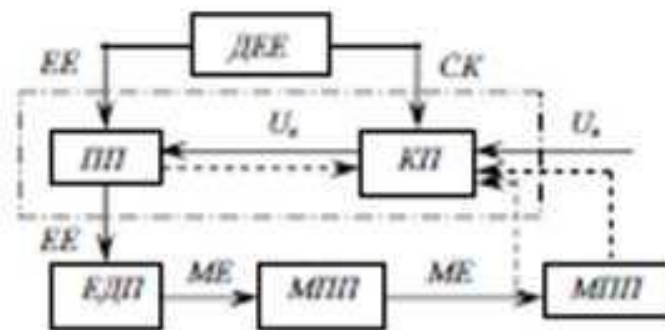


Рис. 1.1. Структурна схема автоматизованого електропривода

Механічний передавальний пристрій (МПП) передає механічну енергію від електродвигуна до виконавчого органу робочої машини та узгоджує вид та швидкість їх руху. В сучасних сільськогосподарських електроприводі найбільш поширені клинописові зубчасті та ланцюгові передачі а також різноманітні за своєю конструкцією з'єднувальні муфта

Керування процесом перетворення електричної енергії виконується керуючим пристроєм (КЦ), який виробляє керуючий сигнал U_k в функції заїзного сигналу v , і різних додаткових електричних сигналів, що містять інформацію про процес перетворення енергії реальні параметри механічного руху електроприводу і виконавчої машини та інше. Перетворювальний та керуючий пристрої утворюють систему керування (СК), яка разом з обмотками електродвигуна складає електричну частину електроприводу. До складу керуючих пристроїв належать апарати керування, захисту, сигналізації та різні підсилювачі, вимірювальні елементи, блоки порівняння дійсних і заданих значень робочих параметрів тощо.

Сучасні електроприводи класифікують за такими основними ознаками:

1. За видом руху електродвигуна і можливістю зміни його напрямку відрізняють електроприводи обертального і поступального руху. При цьому швидкість виконавчого органу може бути регульованою або нерегульованою, а сам рух - неперервним або дискретним, нереверсивним або реверсивним.

2. За кількістю робочих машин або виконавчих органів однієї робочої машини, які приводяться в рух одним електроприводом. - групові та індивідуальні електроприводи. Груповим називають електропривод, який забезпечує рух виконавчих органів кількох робочих машин чи кількох виконавчих органів однієї робочої машини, а індивідуальним - електропривод, що забезпечує рух одного виконавчого органу робочої машини.

3. За наявністю зв'язків з іншими електроприводами - незалежні, режими роботи яких практично не залежать від режимів роботи інших електроприводів і взаємозв'язані в яких два або кілька електроприводів електрично і механічно зв'язані між собою. При роботі взаємозв'язаних: електроприводів підтримується задане співвідношення їх швидкостей, навантажень або положення виконавчих органів робочих машин. Розрізняють два види взаємозв'язаних електроприводів: багато двигуні, з яких електродвигуні пристрої працюють разом на загальний вал, і електричні вали, з яких забезпечується синхронне обертання двох і більше електродвигунів, вали яких не мають механічного зв'язку.

4. За причиною зміни параметрів - регульовані електроприводи, параметри яких змінюються під впливом керуючого пристрою, і нерегульовані електроприводи,

параметри яких змінюються в результаті збурюючі впливів (зміна навантаження, напруги, частота, опору окремих кіл)

5. За рівнем автоматизації керування - неавтоматизовані. автоматизовані та автоматичні Неавтоматизованим називають електропривод, усі операції керування яким виконуються з участю людини. В автоматизованому електроприводі людина бере участь у створенні початкової керуючої дії а керування автоматичним електроприводом здійснюється без участі людини. Автоматизовані електроприводи поділяються на програмно-керовані. якими керують відповідно до заданої програми, і слідкуючі, що перемішують виконавчі органи робочих машин відповідно до заданого сигналу.

6. За видом перетворювального пристрою вентильні автотрансформатори, по системі генератор - двигун та ін. Вентильні електроприводи в свою чергу, поділяються на системи: випрямляч - двигун і перетворювач частота - двигун. Перетворювальними пристроями цих електроприводів заповідну є вентильно-напівпровідникові перетворювачі електричної енергії або регульовані випрямлячі та інвертори і регульовані перетворювачі частоти.

7. За родом механічного передавального пристрою розрізняють редукторний електропривод і без редукторних. привод з варіатором, з пасовою передачею, з фрикційною муфтою.

8. За родом струму - електроприводи постійного струму, в яких електродвигунами пристроями є електродвигуни постійного струму(незалежного, послідовного та змішаного збудження), і електроприводи змінного струму. В електроприводи змінного струму, електродвигунами пристроями є асинхронні електродвигуни або асинхронними електродвигуни.

9. За призначенням - головні, що забезпечують головний рух виконавчого органу робочої машини або основну операцію виконавчого процесу, та допоміжні, які забезпечують допоміжний рух або допоміжну операції виконавчого процесу.

1.1.3. Загальні характеристики об'єкта дослідження

Круглопильний верстат призначений для подовжнього, поперечного і кутового розпилювання дощок, брусів, деревних, плиткових і листових матеріалів. Круглопильний верстат застосовується в столярних цехах малої і середньої продуктивності.

Відмінні особливості круглопильного верстата:

1. жорстка зварна станина верстата коробчатої форми.
2. чавунний верхній робочий стіл.
3. направляюча лінійка посиленої конструкції кріпиться на столі;
4. наявність огорожі пили з патрубком для стружковитягу;
5. кігтевий захист від зворотного викиду заготовки;
6. супорт з приводом і механізм регулювання ступеня виступу пильного диска над столом верстата розташований усередині станини на підмоторній плиті;
7. каретка торцювання із збільшеним ходом служить для розпилювання заготовок упоперек волокон і під кутом.
8. розміри каретки дозволяють встановлювати і торцювати довгомірні заготовки;
9. на каретці встановлена направляюча лінійка.

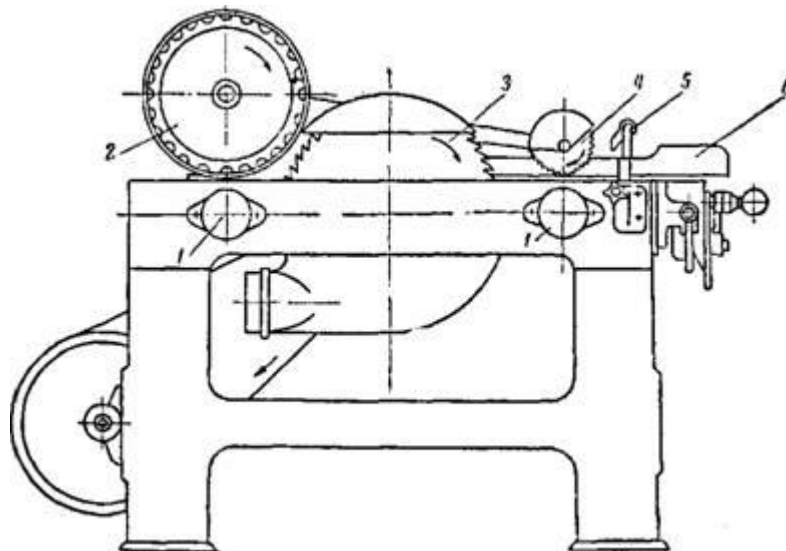


Рисунок 1.3 – Схема круглопильного верстату

1 - нижні падаючі рифлені вальці; 2 задній падаючий диск з рубчастим розклинюючим ножом; 3 пильний диск; 4 - передній зубчастий падаючий диск; 5 - гальмівні упори; 6 - напрямна лінійка

1.1.2. Технічні характеристики

Технічні характеристики круглопильного верстату, прийнятого за об'єкт згідно завдання на проектування, приведені в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 –Технічна характеристика круглопильного верстату

Найбільша ширина матеріалу, що розпилюється, мм	600
Найбільший товщина оброблюваного матеріалу, мм	150
Розміри основного столу, мм	1180×940
Розмір каретки торцювання, мм	680×510
Хід каретки торцювання, мм	1100
Діаметр пили, мм	450×50
Найбільший підйом пили, мм	100
Частота обертання пили, об/хв	2850
Потужність двигуна, кВт	4,0
Габарити, мм	1790×1900×1240
Маса, кг	650

1.2. Електрична схема та режими роботи електропривода

Режим роботи двигуна залежить від організації подачі: якщо брус поступає за брусом без перерви, то режим роботи тривалий S1, в іншому разі – переміжний режим роботи S6. Тривалий номінальний режим (S6) – режим роботи електродвигуна при незмінному навантаженні або навантаженні, що циклічно змінюється, причому за час роботи ($t_p > 3T_n$) перевищення температури усіх частин електродвигуна досягає устанавленого значення. Залежності потужностей електродвигуна $P(t)$, втрат $\Delta P(t)$, нагрівання електродвигуна - перевищення

температури $\tau(t)$ для режиму S1. Номінальний переміжний режим (S6) – це послідовність однакових робочих циклів, кожний з яких складається з періоду роботи постійним навантаженням і періоду холостого ходу. Тривалість цього періоду недостатня для досягнення теплової рівноваги за час одного робочого циклу. Цей режим характеризується тривалістю навантаження (ТН), яка визначається за формулою:

$$ТН\% = \frac{t_p}{t_p + t_{x..x}} * 100\%(1.1)$$

Де $t_{x..x}$ - тривалість періоду холостого ходу.

У цьому режимі тривалість циклу не перевищує 10 хв. Стандартна тривалість навантаження ТН: 15; 25; 40 і 60% вказують після умовного позначення. Наприклад S6 40%.

Типова схема електроприводу верстату приведена на рисунку 1.4.

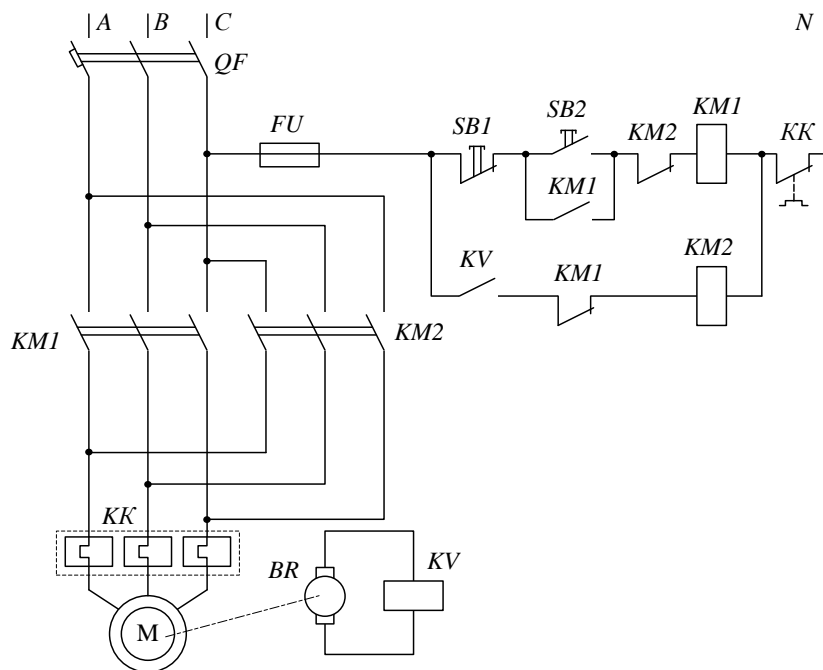


Рисунок 1.4 – Базова принципова електрична схема електроприводу 11 роторним вмиканням верстату

Напругу на схему управління (рисунок 1.4) подають автоматичним вимикачем QF. При пускові натискають кнопку SB2, замикаючи коло струму котушки

магнітного пускача КМ1, вмикається двигун і проходить розгін агрегату. Замикаючі блок-контакти КМ1 шунтують кнопку SB2, а розмикаючі відкриваються в колі катушки КМ2. Коли кутова швидкість складає 0,1 номінальної, закриваються замикаючі контакти реле контролю швидкості KV, що отримує живлення від тахогенератора BR, замикаючи коло катушки пускача КМ2. При натисненні кнопки SB1 знеструмлюється катушка магнітного пускача КМ1, закриваються розмикаючі блок-контакти КМ1, двигун переходить в режим гальмування 12роти вмиканням, його кутова швидкість різко знижується. Найбільш ефективний варіант настройки реле контролю швидкості KV при гальмуванні, коли воно розмикає свої контакти в момент, від якого до зупинки двигуна проходить час, рівний власному часу відключення гальмівного пускача КМ2 (приблизно 0,1 с). При такій настройці двигун відключається від мережі у момент зупинки ротора.

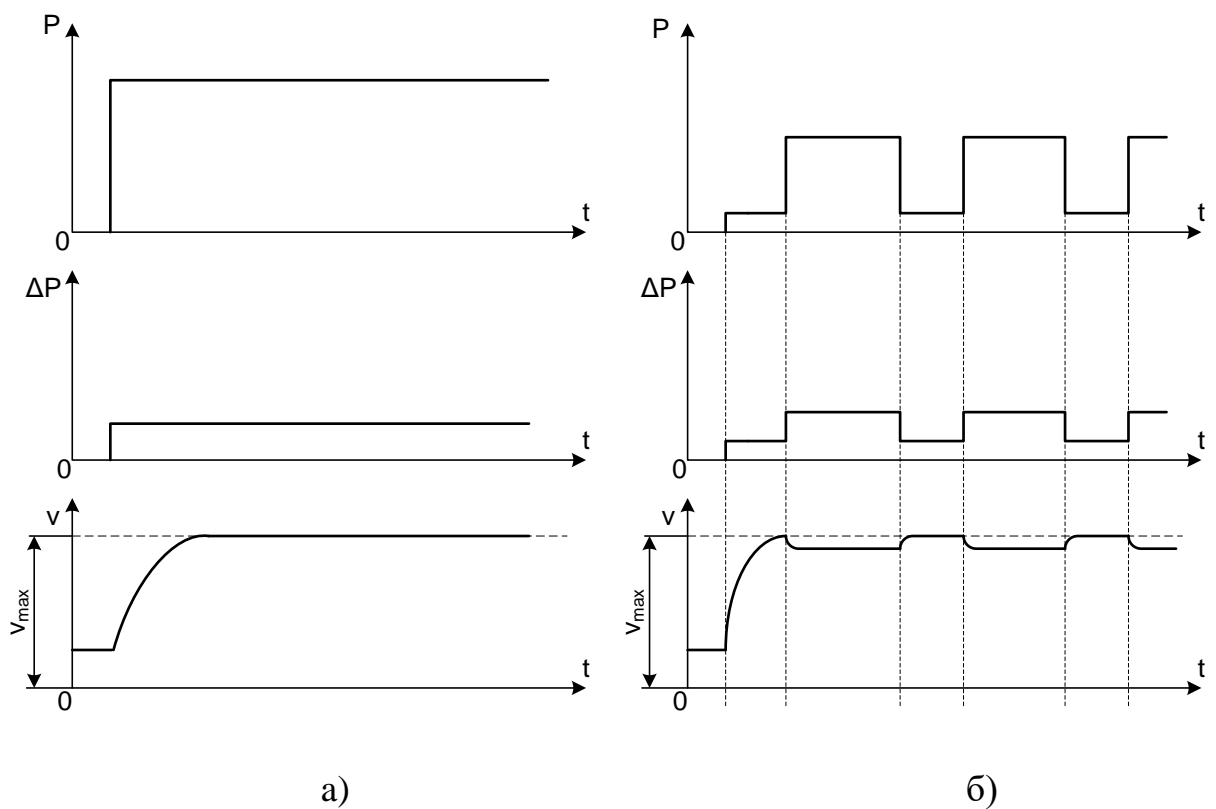


Рисунок 1.5 – Навантажувальні діаграми потужності, графіки втрат температури і в номінальних режимах S1 та S6

Висновок: розглянуто технічні характеристики та особливості роботи електроприводу круглопильного верстату

2. РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРОПРИВОДУ КРУГЛОПИЛЬНОГО ВЕРСТАТА І ЙОГО ОПТИМІЗАЦІЯ

2.1. Розрахунок механічних характеристик круглопильного верстата

При виборі методів технічної обробки, типів станків і інструментів, при розрахунку потужностей і зусиль потрібно враховувати основні властивості деревини: пластичність, подільність і міцність. Згідно технічних характеристик верстату, приведених в табл. 1.1 обчислюємо кутову швидкість обертання пильного диску:

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot n / 60, \quad (2.1)$$

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot 2850 / 60 = 298,45 \text{ (рад/с)}.$$

Швидкість подачі (м/с) залежить від допустимої подачі деревини на один зуб пилки:

$$u = u_z \cdot z \cdot \omega / (2 \cdot \pi \cdot 3000), \quad (2.2)$$

де u_z – подача деревини на один зуб пилки, мм (при подовжньому розпилюванні хвойних порід оптимальне значення $u_z = 0.05 \dots 0.07$ мм);

z – число зубів пилки, $z = 100$ зубів.

$$u = 0,07 \cdot 100 \cdot 298,45 / (2 \cdot \pi \cdot 3000) = 0,110 \text{ (м/с)}.$$

при подовжньому розпилюванні листових порід оптимальне значення $u_z = 0.02 \dots 0.05$ мм);

$$u = 0,05 \cdot 100 \cdot 298,45 / (2 \cdot \pi \cdot 3000) = 0,079 \text{ (м/с)}$$

і проти волокна $u_z = 0.07 \dots 0.12$ мм);

$$u = 0,12 \cdot 100 \cdot 298,45 / (2 \cdot \pi \cdot 3000) = 0,190 \text{ (м/с)}$$

Швидкість різання в круглопильних верстатах складає 33,55,75 м/с, в окремих випадках досягає 100 м/с і відповідає окружній швидкості передніх ріжучих кромки пилки. Розраховуємо лінійну швидкість різання:

$$v = \omega \cdot R, \quad (2.3)$$

де R – радіус пилки, $R = 0,2$ (м);

$$v = 298,45 \cdot 0,2 = 59,69 \text{ (м/с)}.$$

В процесі різання діють сили, що вдавлюють різець в деревину і створюють зону деформації, забезпечують відділення і деформацію стружки, сили тертя стружки і різця. Для розрахунків сили різання, необхідної для подолання опорів, що виникають при русі різця, слід визначити питомий опір різанню. Сумарне зусилля опору різання, приведені до одиниці площі поперечного перерізу (1 мм^2) стружки, нормального до площини різання в кожній точці траєкторії леза різця, називають питомим опором різанню (Н/мм^2). Робота, затрачена на перетворення 1 мм^3 деревини в стружку, називається питомою роботою різання ($\text{Н}\cdot\text{м/мм}^3$) і чисельно рівна опору. Питома робота різання дає можливість визначити потужність різання $P_{\text{різ}}$ (Вт) по секунднему шару знятої деревини, помноженому на допустимому швидкості подачі деревини:

$$P_{\text{різ}} = k \cdot b \cdot h \cdot u, \quad (2.4)$$

де k – питомий опір різанню, $k = 10 \dots 50 \text{ Н/мм}^2$ за експериментальними даними і залежить від подачі і породи деревини;

b – ширина стружки, $b = 5 \text{ мм}$;

h – товщина стружки, $h = 2 \text{ мм}$;

дані занесені в таблицю 1.1

Вид деревини	Твердість по Брінелю (кгс/мм ²)	Твердість в Ньютонах Н/мм ²
Сосна	2.49	24.4
Клен	2.5	24.5
Береза	3.5	34.3
Граб	3.7	36.26
Дуб	3.7	36.26
Ясен	4	39.2
Груша	4.2	41.16

визначаємо потужність різання сосни $k = 24.4 \text{ Н/мм}^2$ при швидкості обертання 33м/с

$$P_{\text{різ}} = 24.4 \cdot 5 \cdot 2 \cdot 0,11 / 33 = 0.8134 \text{ (кВт)}.$$

При швидкості 50м/с

$$P_{\text{різ}} = 24.4 \cdot 5 \cdot 2 \cdot 0,11 / 50 = 0.5368 \text{ (кВт)}.$$

швидкості 75м/с

$$P_{\text{різ}} = 24.4 \cdot 5 \cdot 2 \cdot 0,11 / 75 = 0.3578 \text{ (кВт)}.$$

При такій потужності визначаємо силу різання (Н):

$$F_{\text{різ}} = P_{\text{різ}} / v, \quad (2.5)$$

Коли $v=33(\text{м/с})$.

$$F_{\text{різ}} = 0.8134 / 33 = 0,024 \text{ (кН)}.$$

$v=55(\text{м/с})$.

$$F_{\text{різ}} = 0.5368 / 50 = 0,01 \text{ (кН)}.$$

$v=75(\text{м/с})$.

$$F_{\text{різ}} = 0.3578 / 75 = 0,004 \text{ (кН)}.$$

Діаграма сил при розпилюванні бруса приведена на рисунку 2.1.

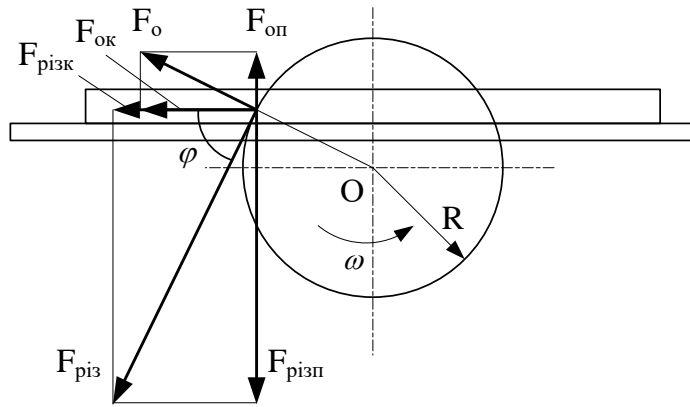


Рисунок 2.1 – Діаграма сил при розпилюванні бруса

Зусилля подачі (Н)

$$F_{\text{п}} = F_{\text{різ}} \cdot \cos \varphi + F_{\text{о}} \cdot \sin \varphi + (G + F_{\text{різ}} \cdot \sin \varphi - F_{\text{о}} \cdot \cos \varphi) \cdot f, \quad (2.6)$$

де $F_{\text{о}}$ – зусилля віджиму, що залежить від степені затуплення пилки, форми зуба, товщини стружки, Н, $F_{\text{о}} = 0,2 \cdot F_{\text{різ}} = 0,2 \cdot 0,024 = 0,048$ (кН). 1 режим

$$F_{\text{о}} = 0,2 \cdot F_{\text{різ}} = 0,2 \cdot 0,01 = 0,002 \text{ (кН)} - 2 \text{ режим}$$

$$F_{\text{о}} = 0,2 \cdot F_{\text{різ}} = 0,2 \cdot 0,004 = 0,0004 \text{ (кН)} 3 \text{ режим}$$

φ – кут між вектором зусилля різання $F_{\text{різ}}$, та напрямком подачі деревини (рис. 2.1), $\varphi = \pi / 3$;

G – вага матеріалу, що подається, кг, середня вага деревини визначається, виходячи з її густини 500...550 кг/м³, для розрахунку приймемо, що розпилюється дошка довжиною 3 м, шириною 30 см та товщиною 40 мм, тобто $G = 550 \cdot 3 \cdot 0,3 \cdot 0,04 = 19,8$ (кг).

f – коефіцієнт тертя деревини по столу (0.35...0.4 для сосни і дуба).

$$F_{\text{п}} = 0,024 \cdot \cos(\pi/3) + 0,048 \cdot \sin(\pi/3) + (19,8 + 0,024 \cdot \sin \varphi - 0,048 \cdot \cos(\pi/3)) \cdot 0,4 = 5.18 \text{ (кН)}.$$

$$F_{\text{п}} = 0,01 \cdot \cos(\pi/3) + 0,002 \cdot \sin(\pi/3) + (19,8 +$$

$$+ 0,01 \cdot \sin \varphi - 0,002 \cdot \cos (\pi/3)) \cdot 0,4 = 7,97 \text{ (кН)}.$$

$$F_{\pi} = 0,004 \cdot \cos (\pi/3) + 0,0004 \cdot \sin (\pi/3) + (19,8 +$$

$$+ 0,004 \cdot \sin \varphi - 0,0004 \cdot \cos (\pi/3)) \cdot 0,4 = 7,92 \text{ (кН)}.$$

Потужність подачі (Вт):

$$P_{\pi} = F_{\pi} \cdot u. \quad (2.7)$$

$$P_{\pi} = 5,18 \cdot 0,11 = 0,5698 \text{ (кВт)}.$$

$$P_{\pi} = 7,97 \cdot 0,11 = 0,8797 \text{ (кВт)}.$$

$$P_{\pi} = 7,92 \cdot 0,11 = 0,8712 \text{ (кВт)}.$$

Потужність приводного двигуна:

$$P_{\text{дв}} = (P_{\text{різ}} + P_{\pi}) / \eta_{\pi}, \quad (2.8)$$

де η_{π} – коефіцієнт корисної дії передачі, для клинопасової передачі приймаємо $\eta_{\pi} = 0,95$.

$$P_{\text{дв}} = (0,004 + 0,8712) / 0,95 = 0,9 \text{ (кВт)}$$

Необхідний момент, який повинен розвивати двигун:

$$M_{\text{дв}} = P_{\text{дв}} / \omega, \quad (2.9)$$

$$M_{\text{дв}} = 900 / 298,45 = 3,03 \text{ (Н·м)}.$$

Висновок: проведено попередній розрахунок потужності та моменту двигуна круглопилельного верстату при роботі з сосною.

2.2. Приведення моментів статичного опору і моментів інерції до вала електродвигуна

У зв'язку з застосуванням регульованого електроприводу в круглопилного верстаті, яке дає можливість оптимізувати енергоспоживання, в системі можливі перехідні режими з зміною швидкості обертання. В таких режимах в електромеханічній системі діють динамічні моменти, які слід враховувати при конструюванні та виборі перетворювального агрегату. Динамічний момент пропорційний швидкості зміни швидкості обертання та сумарному моменту інерції вала електродвигуна і приведених до нього рухомих мас круглопилного верстату.

Приведений до вала двигуна момент інерції круглопилного верстату відповідає моменту інерції пильного диску, оскільки передатне число між валом двигуна та валом пильного диску рівне 1 (див. рис. 1.2). Згідно теореми Штейнера, момент інерції диску визначається, як:

$$J'_d = J_d = \frac{1}{2} \cdot m \cdot R^2, \quad (2.10)$$

де m – маса ріжучого диску, $m = \pi \cdot R^2 \cdot h \cdot \rho_{ст} = 3,14 \cdot 0,2^2 \cdot 0,003 \cdot 7600 = 2,86$ кг;

$$J'_d = 0,5 \cdot 2,86 \cdot 0,2^2 = 0,05 \text{ (кг} \cdot \text{м}^2\text{)}. \quad (2.11)$$

Сумарний момент інерції пресу:

$$J_{\Sigma} = J'_d + J_{дв}, \quad (2.12)$$

$$J_{\Sigma} = 0,05 + 0,35 = 0,4 \text{ (кг} \cdot \text{м}^2\text{)}.$$

Динамічний момент розраховуємо за формулою :

$$M_{\text{дин}} = J_{\Sigma} \cdot \varepsilon, \quad (2.13)$$

де ε – допустиме кутове прискорення (приймаємо $\varepsilon = 5 \text{ рад/с}^2$).

$$M_{\text{дин}} = 0,4 \cdot 5 = 2 \text{ (Н}\cdot\text{м)}.$$

Отже, при пуску, зупинці та зміні робочої швидкості двигуна на нього з боку механізму круглопильного верстату буде діяти крім моменту статичного опору ($M_c = 3.03 \text{ Н}\cdot\text{м}$), ще і момент динамічного опору, максимальне значення якого складає ($M_{\text{дин}} = 2 \text{ Н}\cdot\text{м}$), який викликаний маховими масами механізму.

Проведемо остаточну перевірку вибраного двигуна за перевантаженням:

$$M_{\text{дв}} \geq M_c + M_{\text{дин}}, \quad (2.14)$$

$$17,5 \text{ (Н}\cdot\text{м)} \geq 3.03 + 2 = 5.03 \text{ (Н}\cdot\text{м)}.$$

Висновок: умова перевірки двигуна за перевантаженням виконується, двигун забезпечить стабільний розгін механізму з допустимим прискоренням та номінальним навантаженням на валу.

2.3. Попередній вибір двигуна та перевірка його за нагрівом та перевантаженням

При виборі потужності приводного двигуна круглопильного верстату вхідною величиною є статичне навантаження на валу механізму. Значення і характер навантаження круглопильного верстату визначаються силами, які діють на робочий орган.

Статична потужність на валу двигуна [4]:

$$P_{\text{дв.с}} = k_3 \cdot P_{\text{в}}, \quad (2.15)$$

де k_3 – коефіцієнт запасу, який враховує підлягаючі розрахункам фактори (для двигунів потужністю до 10 кВт $k_3 = 1,2$).

$$P_{\text{дв}} = 1,2 \cdot 4,103 = 4,92 \text{ (кВт)}.$$

По отриманому значенні $P_{\text{дв}}$ з урахуванням режиму роботи, системи електропривода і заданих технологічних умов (швидкість обертання – до 3000 об/хв) по каталожних даних вибираємо двигун за умови:

$$P_{\text{дв}} \leq P_{\text{ном,дв}} \quad (2.16)$$

На основі проведених розрахунків потужності електродвигуна та техніко економічному обґрунтуванні вибираємо двигун постійного струму паралельного збудження типу 4ПО112М2УХЛ4 з номінальними значеннями які представлені в таблиці 3.1

Таблиця 3.1 – Паспортні значення двигуна постійного збудження паралельного збудження 4ПО112М2УХЛ4

Найменування	Величина
Номінальна потужність на валу $P_{\text{н}}$, кВт	5,5
Номінальна напруга живлення $U_{\text{н}}$, В	220
Номінальний струм $I_{\text{н}}$, А	29
Номінальна частота обертання $n_{\text{ном}}$, об/хв	3000
Кількість полюсів $2p$, шт	2
Опір обмотки якоря $R_{\text{я}}$, Ом	0,34
Опір обмотки додаткових полюсів $R_{\text{дп}}$, Ом	0,132
Номінальна напруга обмотки збудження $U_{\text{нз}}$, В	220
Номінальний струм збудження $I_{\text{нз}}$, А	1,66
Момент інерції якоря $J_{\text{д}}$, кг·м ²	0,35
Максимальна допустима частота обертання n_{max} , об/хв	4000

Електродвигун при своїй роботі може нагріватися до визначеної температури, визначеною в першу чергу нагрівостійкістю застосованих матеріалів. Дотримання встановлених заводом обмежень по допустимій температурі нагріву, забезпечує нормальний термін його використання в межах 15...20 років. Перевищення температури веде до скорочення терміну служби електричного двигуна.

Суть перевірки двигуна за нагрівом складається з співставлення допустимої для нього температури з тою, яку він має при роботі.

Довготривалий номінальний режим роботи S1 двигуна характеризується незмінним навантаженням на протязі часу, за який прогрів всіх частин досягає усталеного значення.

Перевірку вибраного електродвигуна здійснюємо методом еквівалентного моменту:

$$M_{\text{екв}} \leq M_{\text{ном}}, \quad (2.17)$$

В режимі S1 :

$$M_{\text{екв}} = M_{\text{с}}, \quad (2.18)$$

$$M_{\text{екв}} = 13,75 \text{ (Н}\cdot\text{м)}.$$

Номінальний момент двигуна визначаємо за формулою:

$$M_{\text{ном}} = 9550 \cdot P_{\text{ном,дв}} / n_{\text{ном}}, \quad (2.19)$$

де $n_{\text{ном}}$ – частота обертання двигуна ($n_{\text{ном}} = 3000$ об/хв).

$$M_{\text{ном}} = 9550 \cdot 5,5 / 3000 = 17,5 \text{ (Н}\cdot\text{м)}.$$

Перевіряємо за умовою (3.3):

$$13,75 \text{ (Н}\cdot\text{м)} \leq 17,5 \text{ (Н}\cdot\text{м)}.$$

Отже, умова нагріву виконується, тобто кількість теплоти що виділяється двигуном не перевищує допустимого значення температури електродвигуна під час роботи буде в нормі.

Висновок: в даному розділі було вибрано двигун постійного струму паралельного збудження серії 4ПО112М2УХЛ4 номінальною потужністю 5,5 кВт і частотою обертання 3000 об/хв та перевірено його за нагрівом.

2.4. Розрахунок динамічних параметрів електроприводу

Приймаємо відношення постійних втрат до змінних для двигуна з ізоляцією класу F таким, що дорівнює $\beta = 1,4$. Спад напруги в щітковому контакті двигуна приймаємо рівним 2 В на одну пару щіток, кількість пар щіток відповідає кількості пар полюсів, тому сумарний спад напруги в щітковому контакті приймаємо $\Delta U_{щ} = 2 \cdot p = 2 \cdot 4 = 8$ (В).

Опір кола якоря двигуна:

$$R_{я\Sigma} = \beta \cdot (R_{я} + R_{дп} + R_{ко}) + (2 \cdot \Delta U_{щ} / I_n), \quad (2.20)$$

де $R_{я}$ – опір якірної обмотки двигуна, Ом, $R_{я} = 0,34$ Ом;

$R_{дп}$ – опір обмотки додаткових полюсів, Ом, $R_{дп} = 0,132$ Ом;

$R_{ко}$ – опір компенсаційної обмотки, Ом, (відсутня).

$$R_{я\Sigma} = 1,4 \cdot (0,34 + 0,132) + (2 \cdot 8 / 32) = 0,937 \text{ (Ом)}.$$

Активний опір з'єднувального кабеля приймається 10% від сумарного опору кола якоря: $R_{каб} = 0,1 \cdot R_{я\Sigma} = 0,1 \cdot 0,937 = 0,094$ (Ом).

Активний опір головного кола електроприводу:

$$R_e = R_{я\Sigma} + R_{з,др} + 2 \cdot R_{тр} + R_{каб}, \quad (2.21)$$

$$R_e = 0,937 + 0,012 + 2 \cdot 0,083 + 0,094 = 1,218 \text{ (Ом)}.$$

Індуктивний опір головного кола електроприводу:

$$L_e = L_{я} + L_{з,др} + L_{тр}, \quad (2.22)$$

$$L_e = 0,006641 + 0,0042 + 0,0008527 = 0,012 \text{ (Гн)} = 14 \text{ (мГн)}.$$

Електромагнітна стала часу якірного кола:

$$T_{\text{я}} = L_{\text{я}} / R_{\text{я}\Sigma}, \quad (2.23)$$

$$T_{\text{я}} = 0,006641 / 0,937 = 0,007 \text{ (с)}.$$

Електромагнітна стала часу головного кола:

$$T_{\text{е}} = L_{\text{е}} / R_{\text{е}}, \quad (2.24)$$

$$T_{\text{е}} = 0,012 / 1,218 = 0,0096 \text{ (с)}.$$

Момент інерції електроприводу складає $J_{\Sigma} = 0,4 \text{ (кг}\cdot\text{м}^2)$ згідно (2.12)

Номінальна кутова швидкість двигуна:

$$\omega_{\text{н}} = (\pi \cdot n_{\text{н}}) / 30, \quad (2.25)$$

$$\omega_{\text{н}} = (\pi \cdot 3000) / 30 = 314,16 \text{ (рад/с)}.$$

Конструктивний коефіцієнт двигуна:

$$c\Phi_{\text{н}} = (U_{\text{н}} - I_{\text{н}} \cdot R_{\text{я}\Sigma} - \Delta U_{\text{ш}}) / \omega_{\text{н}}, \quad (2.26)$$

$$c\Phi_{\text{н}} = (220 - 29 \cdot 0,937 - 8) / 314,16 = 0,601 \text{ (В}\cdot\text{с)}.$$

Електромеханічна стала часу електроприводу:

$$T_{\text{м}} = J \cdot R_{\text{е}} / c(\Phi_{\text{н}})^2, \quad (2.27)$$

$$T_{\text{м}} = 0,4 \cdot 1,218 / 0,601^2 = 1,349 \text{ (с)}.$$

Приймаємо амплітуду опорної синусоїдної напруги $U_{\text{оп.макс}} = 10 \text{ В}$.

Коефіцієнт підсилення тиристорного перетворювача:

$$k_{\text{тп}} = E_{\text{d0}} / U_{\text{оп.мах}}, \quad (2.28)$$

$$k_{\text{тп}} = 285,85 / 10 = 28,85 \text{ (В)}.$$

Стала часу тиристорного перетворювача:

$$T_{\text{тп}} = 1 / (m_n \cdot f), \quad (2.29)$$

$$T_{\text{тп}} = 1 / (6 \cdot 50) = 0,003 \text{ (с)}.$$

Передавальна функція тиристорного перетворювача:

$$W_{\text{тп}}(p) = k_{\text{тп}} / (T_{\text{тп}} \cdot p + 1), \quad (2.30)$$

$$W_{\text{тп}}(p) = 28,85 / (0,003 \cdot p + 1).$$

Висновок: розраховано динамічні параметри системи електроприводу круглопильного верстату, здійснено вибір сенсорів та розраховано їх коефіцієнти підсилення.

2.5. Розрахунок електромеханічних характеристик електродвигуна

Кут комутації при номінальній напрузі:

$$\alpha' = \arccos (U_n / E_{d0}) \cdot (180 / \pi), \quad (2.31)$$

$$\alpha' = \arccos (220 / 285,85) \cdot (180 / \pi) = 39,68 \text{ (гр.ел.)}.$$

Рівняння електромеханічної характеристики двигуна:

$$\omega(I_{dd}) = \frac{U_n - I_{dd} \cdot R_{\Sigma}}{c\Phi_n}. \quad (2.32)$$

Рівняння електромеханічної характеристики електропривода:

$$\omega_{e\Pi}(I_{dd}) = \frac{E_{d0} \cdot \cos\left(\alpha' \cdot \frac{\pi}{180}\right) - I_{dd} \cdot R_{\Sigma}}{c\Phi_n}. \quad (2.33)$$

Розраховані за рівняннями (8.9) та (8.10) електромеханічні характеристики, приведені на рисунку 8.3.

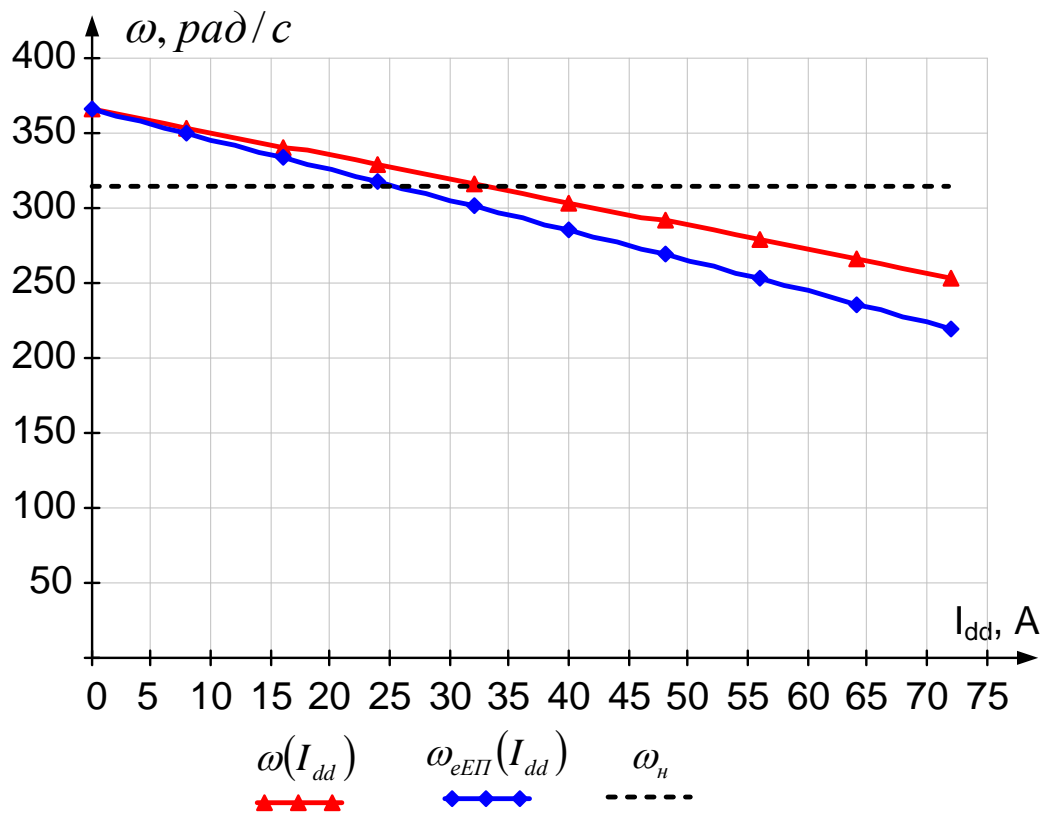


Рисунок 8.3 – Електромеханічні характеристики системи електроприводу

3. РОЗРАХУНОК І ВИБІР СИЛОВИХ ЕЛЕМЕНТІВ ПЕРЕТВОРЮВАЛЬНОГО АГРЕГАТА

3.1 Розрахунок і вибір силового трансформатора

Значення випрямленої потужності (за даними табл. 2.1):

$$P_d = U_H \cdot I_H, \quad (3.1)$$

$$P_d = 220 \cdot 29 = 6372,5 \text{ (Вт)}.$$

Типова потужність трансформатора:

$$S_T = k_s \cdot P_d, \quad (3.2)$$

де k_s – коефіцієнт схеми випрямлення за потужністю (для трифазної мостової схеми $k_s = 1,045$).

$$S_T = 1,045 \cdot 6372,5 = 6667,1 \text{ (Вт)}.$$

Вибираємо трансформатор типу ТСП 16 / 0,7-УХЛ4 виконання 1 [6].

Таблиця 3.1 – Номінальні дані трансформатора ТСП 16/0,7

Параметр	Значення
Номінальна потужність S_H , кВА	14,6
Номінальна напруга первинної обмотки U_1 , В	380
Номінальна напруга вентильної обмотки (вторинної обм.) U_2 , В	205
Напруга перетворювача, В	230
Струм перетворювача, А	50
Напруга короткого замикання $U_{кз}$, %	5,2
Струм холостого ходу $I_{хх}$, %	10
Потужність холостого ходу $P_{хх}$, Вт	140
Потужність короткого замикання $P_{кз}$, Вт	550

Коефіцієнт трансформації:

$$k_{\text{тр}} = U_{1\text{H}} / U_{2\text{H}}, \quad (3.3)$$

$$k_{\text{тр}} = 372,5 / 205 = 1,854.$$

Діючі значення струмів в обмотках трансформатора:

$$I_2 = I_d / \sqrt{m}, \quad (3.4)$$

$$I_2 = 50 / \sqrt{3} = 28,87 \text{ (A)}.$$

$$I_1 = \frac{1}{k_{\delta\delta}} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_d. \quad (3.5)$$

$$I_1 = (\sqrt{3} \cdot 50) / (1,854 \cdot 2) = 23,36 \text{ (A)}.$$

Номінальна первинна потужність трансформатора:

$$S_{1\text{H}} = 1,1 \cdot k_{s1} \cdot U_{\text{H}} \cdot I_{\text{H}}, \quad (3.6)$$

де k_{s1} – коефіцієнт схеми випрямлення за потужністю для первинної обмотки (для трифазної мостової схеми $k_{s1} = 1,045$).

$$S_{1\text{H}} = 1,1 \cdot 1,045 \cdot 220 \cdot 29 = 7333,81 \text{ (ВА)}.$$

Відносні втрати холостого ходу трансформатора:

$$\Delta P_{\text{м}\%} = (P_0 / S_{1\text{H}}) \cdot 100, \quad (3.7)$$

$$\Delta P_{\text{м}\%} = (140 / 7333,81) \cdot 100 = 1,73 \text{ \%}.$$

Активний опір однієї фази трансформатора:

$$R_{\text{тр}} = \frac{1,1 \cdot k_{s1} \cdot U_{\text{H}} \cdot \Delta P_{\text{м}\%}}{m_1 \cdot k_{i1}^2 \cdot I_{\text{H}} \cdot 100}, \quad (3.8)$$

де k_{i1} – коефіцієнт схеми випрямлення за струмом первинної обмотки (для трифазної мостової схеми $k_{i1} = 0,816$)

$$R_{\text{тр}} = 1,1 \cdot 1,045 \cdot 220 \cdot 1,73 / (3 \cdot 0,816^2 \cdot 29 \cdot 100) = 0,083 \text{ (Ом)}.$$

Для подальших розрахунків згідно [6] приймаємо коефіцієнт запасу k_3 , який враховує можливість несиметрії кутів відкривання тиристорів у фазах та забезпечує запас за напругою для номінальної швидкості двигуна таким, що дорівнює 5%, тобто $k_3 = 1,05$.

Мінімальне значення вторинної фазної ЕРС:

$$E_{2н} = k_3 \cdot \frac{U_n + \Delta U_T + 1,1 \cdot k_R \cdot R_{\text{тр}} \cdot I_n}{k_u \cdot \left(1 - \frac{\Delta U_{\%}}{100}\right) \cdot \cos\left(\alpha_{\text{min}} \cdot \frac{\pi}{180}\right) - \frac{k_x \cdot U_{\kappa\%}}{k_{i1} \cdot 100}}, \quad (3.9)$$

де ΔU_T – спад напруги на тиристорах (для мостових схем $\Delta U_T = 2 \text{ В}$);

$\Delta U_{\%}$ – відхилення напруги в мережі ($\Delta U_{\%} = 5 \%$);

α_{min} – мінімальний кут керування (для нереверсивної схеми $\alpha_{\text{min}} = 0^\circ$);

k_R – коефіцієнт схеми за числом груп вентилів, $k_R = 2$;

k_x – коефіцієнт схеми випрямлення, $k_x = 0,955$;

k_u – коефіцієнт схеми випрямлення за напругою, $k_u = 2,34$;

$$E_{2i} = 1,05 \cdot \frac{220 + 2 + 1,1 \cdot 2 \cdot 0,083 \cdot 29}{2,34 \cdot \left(1 - \frac{5}{100}\right) \cdot \cos\left(0 \cdot \frac{\pi}{180}\right) - \frac{0,955 \cdot 5,2}{0,816 \cdot 100}} = 122,16 \text{ (}\hat{\text{А}}\text{)}.$$

Індуктивний опір однієї фази трансформатора, приведений до вторинної обмотки:

$$X_{\text{тр}} = E_{2н} \cdot U_{\kappa\%} / (k_{i1} \cdot I_n \cdot 100), \quad (3.10)$$

$$X_{\text{тр}} = 122,16 \cdot 5,2 / (0,816 \cdot 29 \cdot 100) = 0,268 \text{ (Ом)}.$$

Індуктивність фази трансформатора:

$$L_{\text{тр}} = X_{\text{тр}} / (2 \cdot \pi \cdot f), \quad (3.11)$$

$$L_{\text{тр}} = 0,268 / (2 \cdot \pi \cdot 50) = 0,00085 \text{ (Гн)} = 0,85 \text{ (мГн)}.$$

3.2 Розрахунок і вибір вентилів

Середнє значення струму через вентиль:

$$I_{\text{в.ср}} = \lambda \cdot I_{\text{н}} / (m_{\text{п}} \cdot k_{\text{ох}}), \quad (3.12)$$

де λ – коефіцієнт перевантаження за струмом, $\lambda = 2,5$;

m – кількість пульсацій випрямленого струму, $m_{\text{п}} = 6$;

$k_{\text{ох}}$ – коефіцієнт охолодження, $k_{\text{ох}} = 0,35$.

$$I_{\text{в.ср}} = 2,5 \cdot 29 / (6 \cdot 0,35) = 34,52 \text{ (А)}.$$

Середнє значення випрямленої ЕРС при $\alpha = 0^\circ$.

$$E_{\text{d0}} = k_{\text{у}} \cdot E_{2\text{н}}, \quad (3.13)$$

$$E_{\text{d0}} = 2,34 \cdot 122,16 = 285,85 \text{ (В)}.$$

Максимальна зворотня напруга на тиристорі:

$$U_{\text{з.мах}} = k_{\text{зн}} \cdot k_{\text{у.мах}} \cdot E_{\text{d0}}, \quad (3.14)$$

де $k_{\text{зн}}$ – коефіцієнт запасу за напругою ($k_{\text{зн}} = 1,25$);

$k_{\text{у.мах}}$ – коефіцієнт схеми випрямлення за максимальною напругою (для трифазної мостової схеми $k_{\text{у.мах}} = 1,045$).

$$U_{\text{з.мах}} = 1,25 \cdot 1,045 \cdot 285,85 = 373,4 \text{ (В)}.$$

Вибираємо швидкодіючі імпульсні тиристори типу 50RIA60 в корпусі ТО-65 (рисунок 3.1) [7]:



Рисунок 3.2 – Тиристор 50RIA60 фірми International Rectifier (США)

Таблиця 3.2 – Характеристики тиристорів типу 50RIA60

Параметр	Значення
Допустиме значення прямого струму тиристора $I_{в.ср.доп}$, А	50
Амплітудне значення зворотної напруги $U_{з.доп}$, В	700
Напруга керування U_y , В	2,5
Струм керування I_y , мА	100
Допустимий ударний струм $I_{уд}$, А	1430

Струм короткого замикання в первинній обмотці трансформатора:

$$I_{1кз} = (I_1 / U_{к\%}) \cdot 100, \quad (3.15)$$

$$I_{1кз} = (23,36 / 5,2) \cdot 100 = 449,23 \text{ (А)}.$$

Коефіцієнт перевантаження тиристора:

$$k_{пер} = I_{уд} / I_{в.ср.доп}, \quad (3.16)$$

$$k_{пер} = 1430 / 50 = 28,6.$$

Перевірка:

$$I_{в.ср.доп} > I_{1кз} \cdot k_{тр} / (k_{пер} \cdot k_{i1}), \quad (3.17)$$

$$50 \text{ (A)} > 449,23 \cdot 1,854 / (28,6 \cdot 0,816) = 35,68 \text{ (A)}$$

$$I_H < I_{\text{в.ср.доп}}, \quad (3.18)$$

$$I_H = 29 \text{ (A)} < I_{\text{в.ср.доп}} = 50 \text{ (A)}.$$

Перевірка виконується. Вентилі вибрано вірно.

3.3 Розрахунок індуктивності згладжувального дроселя

Індуктивність якоря двигуна:

$$L_{\text{я}} = k \cdot 30 \cdot U_H / (\pi \cdot p \cdot n_H \cdot I_H), \quad (3.19)$$

де k – коефіцієнт, що враховує скомпенсованість машини (наявність компенсаційної обмотки), при відсутній компенсаційній обмотці приймаємо $k = 0,55$.

$$L_{\text{я}} = 0,55 \cdot 30 \cdot 220 / (\pi \cdot 2 \cdot 3000 \cdot 29) = 0,006641 \text{ (Гн)} = 6,641 \text{ (мГн)}.$$

Амплітудне значення гармонічної складової випрямленої напруги:

$$E_{\text{кр}} = 1,35 \cdot U_{2H} \cdot \frac{2 \cdot \cos\left(\alpha \cdot \frac{\pi}{180}\right)}{(k_2 \cdot m_n)^2 - 1} \cdot \sqrt{1 + (k_2 \cdot m_n)^2 \cdot \text{tg}^2\left(\alpha \cdot \frac{\pi}{180}\right)}, \quad (3.20)$$

де k_2 – кратність гармоніки випрямленої напруги, $k_2 = 1$;

α – кут регулювання при максимальному значенні гармонічної складової, $\alpha = 72,5^\circ$;

m_n – кількість пульсацій випрямленої напруги (для трифазної мостової схеми $m_n = 6$).

$$E_{кр} = 1,35 \cdot 205 \cdot \frac{2 \cdot \cos\left(80 \cdot \frac{\pi}{180}\right)}{(1 \cdot 6)^2 - 1} \cdot \sqrt{1 + (1 \cdot 6)^2 \cdot \operatorname{tg}^2\left(80 \cdot \frac{\pi}{180}\right)} = 93,48 \text{ (В)}.$$

Індуктивність згладжувального дроселя:

$$L_{з,др} = 100 \cdot E_{кр} / (\sqrt{2} \cdot k_z \cdot m_n \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \delta\% \cdot I_d) - k_R \cdot L_{тр} - L_{я}, \quad (3.21)$$

де $\delta\%$ – допустиме значення основної гармоніки, $\delta\% = 5 \%$.

$$L_{з,др} = 100 \cdot 93,48 / (\sqrt{2} \cdot 1 \cdot 6 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 5 \cdot 50) - 2 \cdot 0,00085 - 0,006641 = \\ = 0,005678 \text{ (Гн)}$$

Вибираємо дросель ФРОС-65/0,5 У3 на струм 320 А з параметрами [6], що представлені в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Номінальні дані згладжуючого дроселя ФРОС-320/0,5 У3

Параметр	Значення
Номінальна індуктивність $L_{з,др}$, мГн	4,2
Опір при номінальному струмові, $R_{з,др}$, мОм	11,5
Номінальний струм, А	320
Діапазон робочої частоти, кГц	1,4- 65
Діапазон робочих струмів, А	0,65 – 9,5
Діапазон робочої температури, C^0	-40 - 105

3.4 Розрахунок і вибір елементів захисту силового кола

Ємність R-C кола:

$$C_{RC} = 10 \cdot 10^{-6} \cdot I_{в.ср.доп} / U_{з.доп}, \quad (3.22)$$

$$C_{RC} = 10 \cdot 10^{-6} \cdot 50 / 700 = 7,143 \cdot 10^{-7} \text{ (Ф)} = 0,7143 \text{ (мкФ)}.$$

Вибираємо конденсатор типу К73-17 1 мкФ 630 В з ємністю 1 мкФ.

Опір R-C кола:

$$R_{RC} = 10 \cdot U_{з.доп} / I_{в.ср.доп}, \quad (3.23)$$

$$R_{RC} = 10 \cdot 700 / 50 = 140 \text{ (Ом)}.$$

Вибираємо резистор типу С2-23 0,25 Вт 150 Ом з номіналом 150 Ом.

Вибір автоматичних вимикачів здійснюється таким чином, щоб виконувались умови:

$$U_{на} \geq U_{мер}, \quad (3.24)$$

$$I_{на} \geq I_{1н}, \quad (3.25)$$

де $U_{на}$ – номінальна напруга автоматичного вимикача, В;

$U_{мер}$ – номінальна напруга первинної обмотки трансформатора, В;

$I_{на}$, $I_{1н}$ – відповідно номінальні струми автоматичного вимикача та первинної обмотки трансформатора, А.

За розрахованим діючим значенням струму з довідника [9] вибираємо автоматичні вимикачі ЕТІ С32 та ЕТІ С63 (Чехія) з параметрами, які занесені в таблицю 3.5.

Таблиця 3.5 – Номінальні параметри автоматичних вимикачів ЕТІ

Місце встановлення	Параметр	Значення
сторона змінного струму А9F7833 2	Номінальний струм I_{a3} , А	6000
	Номінальна напруга U_{na} , В	660
	Номінальний струм розчеплювача $I_{нрозч.}$, А	32
сторона постійного струму А9F7826 3	Номінальний струм I_{a3} , А	6000
	Номінальна напруга U_{na} , В	660
	Номінальний струм розчеплювача $I_{нрозч.}$, А	63

Висновок: проведено вибір апаратури силового кола електроприводу круглопильного верстату, в тому числі апаратів захисту та живильного трансформатора.

4. РОЗРАХУНОК ТА ПОБУДОВА ХАРАКТЕРИСТИЧНИХ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОДВИГУНА.

4.1 Розрахунок зовнішніх характеристик

Спад напруги на тиристорному перетворювачі приймаємо рівним 1 В, тобто $\Delta U_{\text{тп}} = 1 \text{ В}$.

Еквівалентний опір розімкненої системи електроприводу:

$$R_{\text{e.p}} = R_{\text{e}} - R_{\text{я}\Sigma} - R_{\text{каб}}, \quad (4.1)$$

$$R_{\text{e.p}} = 1,218 - 0,937 - 0,094 = 0,188 \text{ (Ом)}.$$

Задаємося діапазоном зміни струму в досліджуваній системі в межах від 0 до $\lambda \cdot I_{\text{н}}$. Тобто $I_{\text{dd}} = 0 \dots 72,5 \text{ А}$. Кут відновлення властивостей закривання тиристорів $\chi = 2^\circ$.

Напруга безпечного інвертування:

$$U_{\text{di}} = -E_{\text{d0}} \cdot \cos(\chi \cdot \pi / 180) + R_{\text{e.p}} \cdot I_{\text{н}}, \quad (4.2)$$

$$U_{\text{di}} = -285,85 \cdot \cos(2 \cdot \pi / 180) + 0,188 \cdot 29 = -280,22 \text{ (В)}.$$

Задаємося для аналізу зовнішніх характеристик значеннями кутів відкривання тиристорів $\alpha_{\text{T}} = 0^\circ, 30^\circ, 50^\circ, 70^\circ, 90^\circ, 110^\circ, 130^\circ$ та 150° .

Для вказаних значень обчислюємо значення вихідної напруги за рівнянням зовнішньої характеристики:

$$U_{\text{d.p}} = E_{\text{d0}} \cdot \cos(\alpha_{\text{T}} \cdot \pi / 180) - \Delta U_{\text{тп}} - R_{\text{e.p}} \cdot I_{\text{dd}}, \quad (4.3)$$

Значення вихідної напруги тиристорного перетворювача для відповідного кута відкривання тиристорів в діапазоні струмів $I_{\text{dd}} = 0 \dots \lambda \cdot I_{\text{н}}$ розраховані для рівняння (4.3). Зовнішні характеристики приведено на рисунку 4.1.

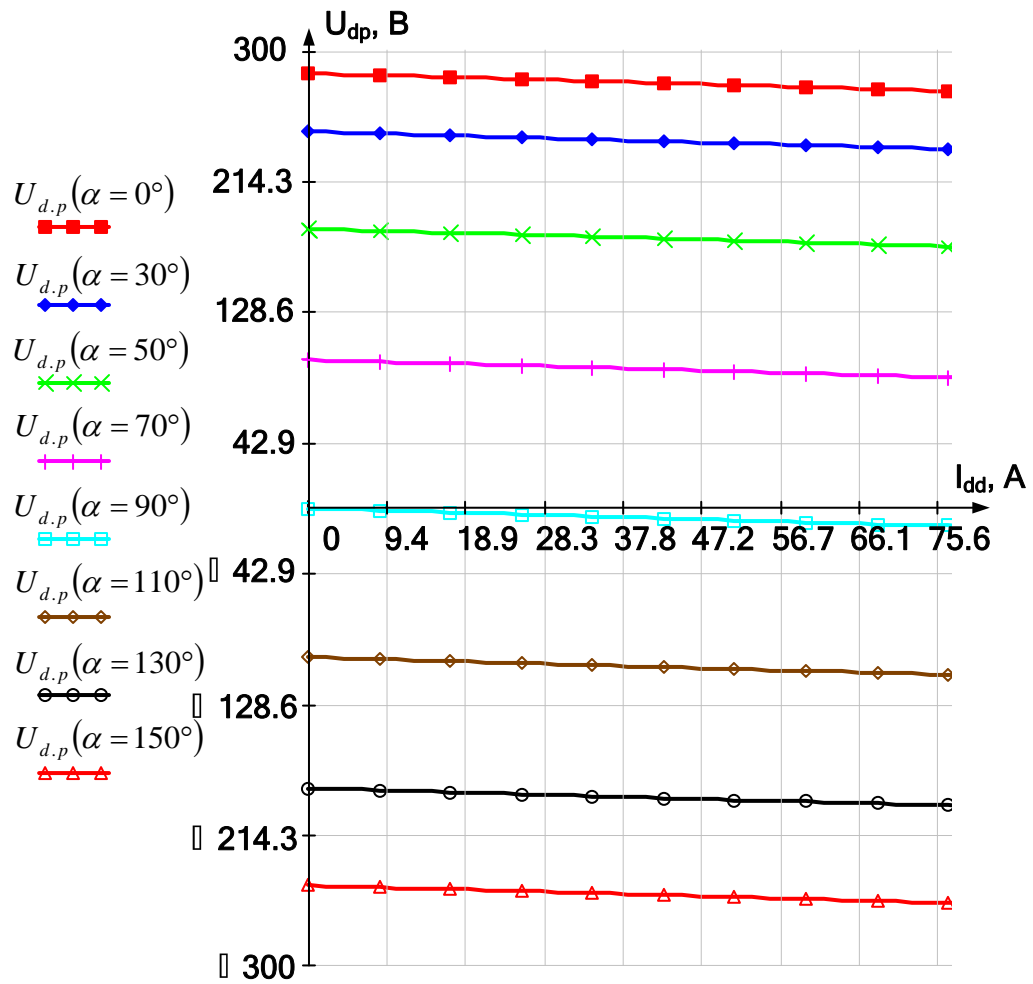


Рисунок 4.1 – Зовнішні характеристики системи електроприводу

Знайдемо кут комутації при максимальному струмі навантаження та куті відкриття тиристорів $\alpha = 30^\circ$.

$$\gamma = \arccos \left(\cos \left(\alpha \cdot \frac{\pi}{180} \right) - \frac{X_{mp} \cdot \lambda \cdot I_n}{\sqrt{2} \cdot E_{2n} \cdot \sin \left(\frac{\pi}{m} \right)} \right) \cdot \frac{180}{\pi} - \alpha \quad (4.4)$$

$$\gamma = \arccos \left(\cos \left(30 \cdot \frac{\pi}{180} \right) - \frac{0,243 \cdot 2,5 \cdot 29}{\sqrt{2} \cdot 122,16 \cdot \sin \left(\frac{\pi}{3} \right)} \right) \cdot \frac{180}{\pi} - 30 = 7,5 \text{ (гр. ел.)}$$

Максимальний кут комутації тиристорів:

$$\alpha_{\max} = 172,5 - (\chi + \gamma), \quad (4.5)$$

$$\alpha_{\max} = 172,5 - (2 + 7,5) = 170,5 \text{ (гр.ел.)}.$$

Теоретичний діапазон зміни кута відкривання тиристорів $\alpha_T = 0 \dots 180^\circ$.

Реальний діапазон зміни кута відкривання тиристорів $\alpha'_T = 0 \dots \alpha_{\max}$.

Рівняння регулювальної характеристики:

- теоретичної

$$U_{d,p} = E_{d0} \cdot \cos(\alpha_T \cdot \pi / 180) - \Delta U_{TH} - R_{e,p} \cdot I_H, \quad (4.6)$$

- практичної

$$U_{d,p1} = E_{d0} \cdot \cos(\alpha'_T \cdot \pi / 180). \quad (4.7)$$

Розраховані регулювальні характеристики для вказаних діапазонів кутів відкривання тиристорів за рівняннями (4.6) та (4.7) представлені на рисунку 4.2.

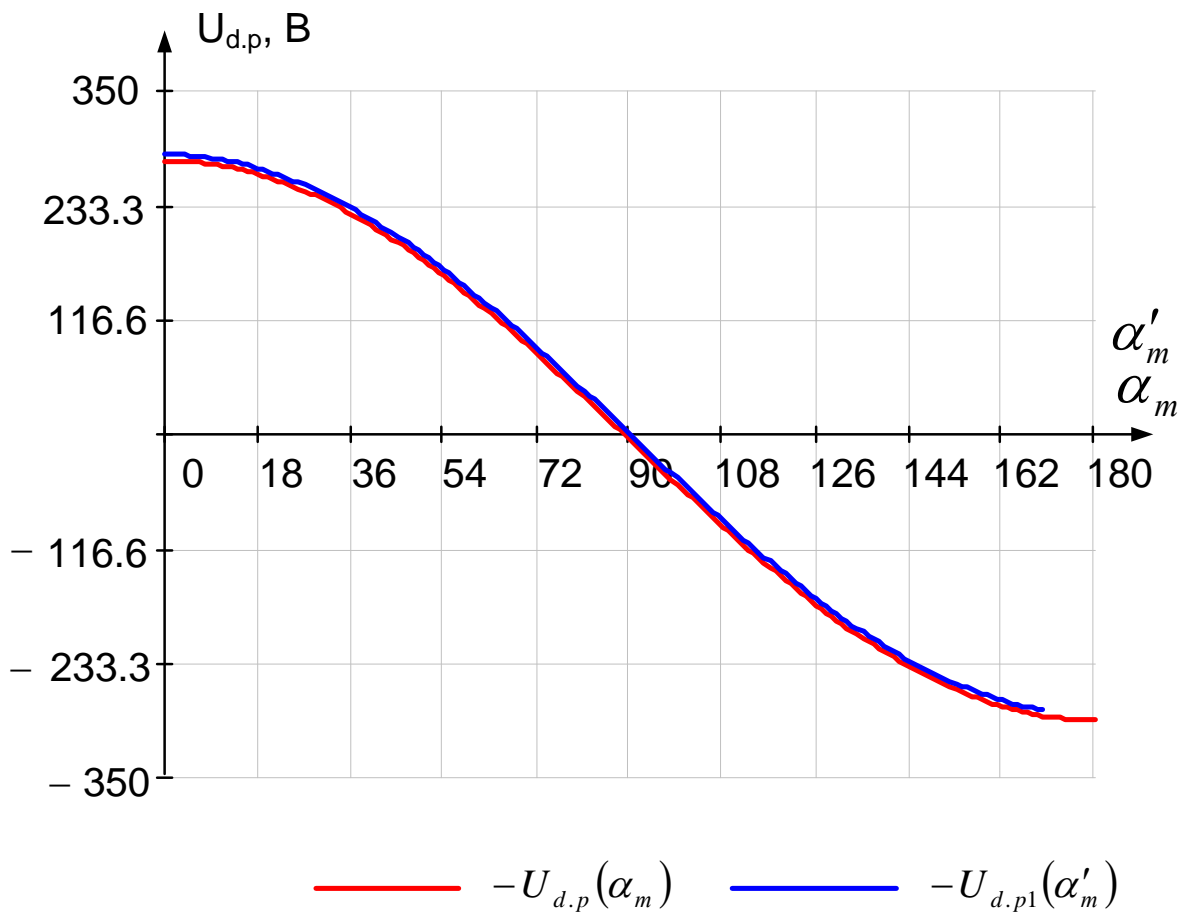


Рисунок 4.2 – Регулювальні характеристики системи електроприводу

4.2. Настройка регулятора струму

Напруга завдання максимального струму:

$$U_{z.max} = \lambda \cdot I_H \cdot k_{cc}, \quad (4.8)$$

$$U_{z.max} = 2,5 \cdot 29 \cdot 0,133 = 9,66 \text{ (В)}.$$

Приймаємо значення граничної частоти смуги пропускання фільтра $\omega_g = 500$ рад/с.

Стала часу фільтру в колі зворотного зв'язку за струмом:

$$T_{\phi c} = 1 / \omega_g, \quad (4.8)$$

$$T_{\text{фс}} = 1 / 500 = 0,002 \text{ (с)}.$$

Задаємося ємністю фільтра контуру струму $C_{\text{фс}} = 1 \text{ (мкФ)} = 1 \cdot 10^{-6} \text{ (Ф)}$.
 вибираємо конденсатор [6] типу К53а 1 мкФ х 29 В. Тоді опір фільтра в колі
 зворотного зв'язку за струмом:

$$R_{\text{фс}} = 1 / (\omega_g \cdot C_{\text{фс}}), \quad (4.9)$$

$$R_{\text{фс}} = 1 / (500 \cdot 1 \cdot 10^{-6}) = 2000 \text{ (Ом)}.$$

Для фільтра контуру струму вибираємо два резистори по 1 кОм типу MF-2-
 1,0 К.

Мала некомпенсована стала часу струму:

$$T_{\text{мс}} = T_{\text{тп}} + T_{\text{фс}}, \quad (4.10)$$

$$T_{\text{мс}} = 0,003 + 0,002 = 0,005 \text{ (с)}.$$

Контур струму синтезуємо на підставі використання модульного критерію.
 Тому передаточна функція замкненого оптимізованого за модульним критерієм
 контуру струму:

$$\Phi(p) = \frac{I_d(p)}{U_{з.с}(p)} = \frac{1/K_c}{1 + 2T_{\text{мс}}p + 2T_{\text{мс}}^2 p^2}. \quad (4.11)$$

Коефіцієнт передачі регулятора струму:

$$k_{\text{рег.с}} = T_e \cdot R_e / (2 \cdot T_{\text{мс}} \cdot k_{\text{тп}} \cdot k_{\text{сс}}), \quad (4.12)$$

$$k_{\text{рег.с}} = 0,0097 \cdot 1,218 / (2 \cdot 0,005 \cdot 28,58 \cdot 0,133) = 0,288.$$

Стала часу регулятора струму:

$$T_{\text{рег.с}} = T_e / k_{\text{рег.с}}, \quad (4.13)$$

$$T_{\text{рег.с}} = 0,0097 / 0,288 = 0,033 \text{ (с)}.$$

Передаточну функцію корегуючого пристрою можна реалізувати за допомогою типового ПІ-регулятора, принципова схема ввімкнення якого зображено на рисунку 4.3.

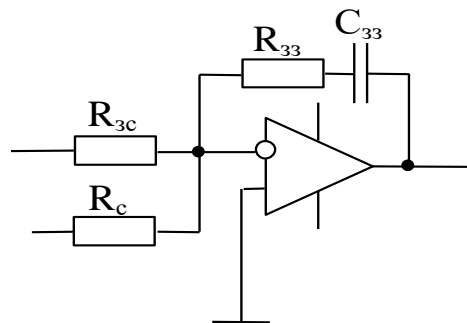


Рисунок 4.3 – Принципова схема ПІ-регулятора

Передаточна функція ПІ-регулятора:

$$R(p) = \frac{1 + R_{33} \cdot C_{33} \cdot p}{R_{33} \cdot C_{33} \cdot p}. \quad (4.14)$$

Задаємося ємністю в колі зворотного зв'язку регулятора струму $C_{\text{зз.рег.с}} = 1$ (мкФ) $= 1 \cdot 10^{-6}$ (Ф). Вибираємо конденсатор [6] типу К53а 1 мкФ х 29 В.

Опір кола зворотного зв'язку регулятора струму:

$$R_{\text{зз.рег.с}} = T_e / C_{\text{зз.рег.с}}, \quad (4.15)$$

$$R_{\text{зз.рег.с}} = 0,0097 / 1 \cdot 10^{-6} = 9597,92 \text{ (Ом)}.$$

Вибираємо резистор на 10 кОм типу Series K5W 10 K.

Опір входу завдання регулятора струму:

$$R_{\text{зад,рег.с}} = T_{\text{рег.с}} / C_{\text{зз,рег.с}}, \quad (4.16)$$

$$R_{\text{зад,рег.с}} = 0,033 / 1 \cdot 10^{-6} = 33356,14 \text{ (Ом)}.$$

Вибираємо резистор на 35 кОм типу Series K5W 35 К, тобто приймаємо $R_{\text{зад,рег.с}} = 35 \cdot 10^3 \text{ (Ом)}$.

Вхідний опір регулятора струму:

$$R_{\text{рег.с}} = 2 \cdot T_{\mu\text{с}} \cdot R_{\text{зз,рег.с}} \cdot k_{\text{тп}} \cdot k_{\text{сс}} / (T_e \cdot R_e), \quad (4.17)$$

$$R_{\text{рег.с}} = 2 \cdot 0,005 \cdot 10 \cdot 10^3 \cdot 28,85 \cdot 0,133 / (0,0097 \cdot 1,218) = 34753,5 \text{ (Ом)}.$$

Вибираємо резистор на 35 кОм типу Series K5W 35 К, тобто приймаємо $R_{\text{рег.с}} = 35 \cdot 10^3 \text{ (Ом)}$.

Оскільки передбачається обмеження напруги регулятора швидкості, то приймаємо другу ступінь вхідного опору регулятора струму (що відповідає ділянці обмеження характеристики) рівною опору каналу зворотного зв'язку регулятора струму, тобто $R'_{\text{рег.с}} = R_{\text{зз,рег.с}} = 10 \text{ (кОм)} = 1 \cdot 10^4 \text{ (Ом)}$.

Вибираємо резистор на 10 кОм типу Series K5W 10 К.

4.3. Настройка регулятора швидкості

Приймаємо фільтр в колі зворотного зв'язку за швидкістю таким же, як і в колі зворотного зв'язку за струмом. Значення ємності фільтра швидкості: $C_{фшв} = C_{фс} = 1 \text{ (мкФ)} = 1 \cdot 10^{-6} \text{ (Ф)}$, значення сталої часу фільтра швидкості: $T_{фшв} = T_{фс} = 0,002 \text{ (с)}$.

Приймаємо малу некомпенсовану сталу часу контуру швидкості вдвічі більшою відповідної сталої часу контуру струму (для забезпечення достатньої стійкості зовнішнього контуру керування).

$$T_{\mu шв} = 2 \cdot T_{\mu с} + T_{фшв}, \quad (4.18)$$

$$T_{\mu шв} = 2 \cdot 0,005 + 0,002 = 0,013 \text{ (с)}.$$

Статична помилка контуру регулювання швидкості:

$$\Delta\omega_{ст} = I_H \cdot R_e \cdot 2 \cdot T_{\mu шв} / (сФ_H \cdot T_M), \quad (4.19)$$

$$\Delta\omega_{ст} = 29 \cdot 1,218 \cdot 2 \cdot 0,013 / (0,601 \cdot 1,349) = 1,104 \text{ (рад/с)}.$$

Для стійкості системи вибираємо діапазон зміни швидкості таким, щоб мінімальна швидкість була не меншою статичної помилки, тобто $\omega_{\min} = \Delta\omega_{ст} = 1,104 \text{ (рад/с)}$.

Відповідно до заданого діапазону регулювання $D = 100$ максимальна швидкість:

$$\omega_{\max} = D \cdot \omega_{\min}, \quad (4.20)$$

$$\omega_{\max} = 100 \cdot 1,104 = 110,4 \text{ (рад/с)}.$$

З обмеженням верхньої межі швидкості обертання (не вище номінальної), фактичний діапазон регулювання швидкості:

$$D_{\phi} = \omega_n / \omega_{\min}, \quad (4.21)$$

$$D_{\phi} = 314,16 / 1,104 = 284,57.$$

Результуючий коефіцієнт підсилення регулятора швидкості:

$$k_{\text{рег.шв}} = k_{\text{сс}} \cdot J / (2 \cdot T_{\mu\text{шв}} \cdot k_{\text{шв}} \cdot c\Phi_n), \quad (4.22)$$

$$k_{\text{рег.шв}} = 0,133 \cdot 0,4 / (2 \cdot 0,013 \cdot 0,032 \cdot 0,601) = 110,005.$$

Контур швидкості синтезуємо на підставі використання модульного критерію.

Передаточну функцію корегуючого пристрою можна реалізувати за допомогою типового П-регулятора, принципова схема ввімкнення якого зображено на рисунку 4.4.

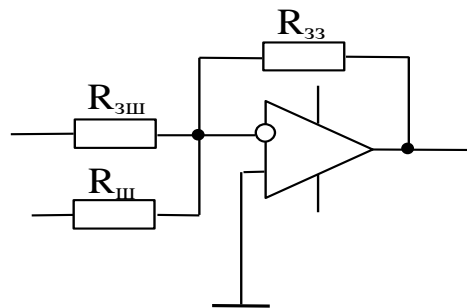


Рисунок 4.4 – Принципова схема П-регулятора

Задаємося опором резистора для кола завдання регулятора швидкості номіналом 30 кОм типу MF-2-30K: $R_{\text{зад.рег.шв}} = 30 \text{ (кОм)} = 30 \cdot 10^3 \text{ (Ом)}$. Тоді опір каналу зворотного зв'язку П-регулятора швидкості:

$$R_{\text{зз.рег.шв}} = k_{\text{рег.шв}} \cdot R_{\text{зад.рег.шв}}, \quad (4.23)$$

$$R_{\text{зз.рег.шв}} = 110,005 \cdot 30 \cdot 10^3 = 3,3 \cdot 10^6 \text{ (Ом)}.$$

Вибираємо резистор типу SMD 3,5 МОм 0805 5% з опором 3,5 МОм, тому уточнене значення опору каналу зворотного зв'язку регулятора швидкості $R_{зз,рег.шв} = 3,5 \text{ (МОм)} = 3,5 \cdot 10^6 \text{ (Ом)}$.

Вхідний опір регулятора швидкості:

$$R_{рег.шв} = R_{зад,рег.шв} \cdot k_{гг} / k_{шв}, \quad (4.24)$$

$$R_{рег.шв} = 30 \cdot 10^3 \cdot 0,7 / 0,032 = 6,6 \cdot 10^5 \text{ (Ом)}.$$

Вибираємо резистор типу SMD 750 кОм 0805 5% з опором 750 кОм, тому уточнене значення опору каналу зворотного зв'язку регулятора швидкості $R_{рег.шв} = 750 \text{ (кОм)} = 7,5 \cdot 10^5 \text{ (Ом)}$.

Вибираємо операційний підсилювач типу LF157 [14] для виконання функцій регулятора.

Контур швидкості синтезуємо на підставі використання модульного критерію.

Передаточну функцію корегуючого пристрою можна реалізувати за допомогою типового ПІ-регулятора, принципова схема увімкнення якого зображено на рисунку 9.1.

При встановленні фільтра на вході ПІ-регулятора швидкості потрібно вибрати два резистори по 15 кОм (MF-2-15K) з розподіленою схемою увімкнення, як показано на рисунку 4.5.

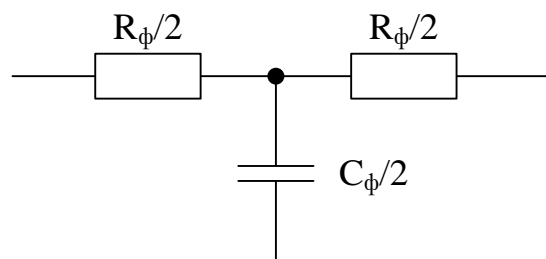


Рисунок 4.5 – Схема увімкнення вхідного опору фільтра швидкості ПІ-регулятора

Ємність в колі зворотного зв'язку регулятора швидкості:

$$C_{\text{зз.рег.шв}} = 4 \cdot T_{\text{мшв}} / R_{\text{рег.шв}}, \quad (4.25)$$

$$C_{\text{зз.рег.шв}} = 4 \cdot 0,013 / 7,5 \cdot 10^5 = 6,756 \cdot 10^{-8} (\Phi) = 0,06756 (\text{мк}\Phi).$$

Вибираємо конденсатор типу К53-1а:0,1мкфх10В з номінальною ємністю 0,1 мкФ [6]. Тобто уточнене значення ємності в колі зворотного зв'язку регулятора швидкості: $C_{\text{зз.рег.шв}} = 1 \cdot 10^{-7} (\Phi) = 0,1 (\text{мк}\Phi)$.

Номінальний момент двигуна:

$$M_{\text{н}} = P_{\text{н}} / \omega_{\text{н}}, \quad (4.26)$$

$$M_{\text{н}} = 5500 / 314,16 = 17,5 (\text{Н}\cdot\text{м}).$$

Стала часу задавача інтенсивності:

$$T_{\text{зІ}} = J \cdot \omega_{\text{н}} / M_{\text{н}}, \quad (4.27)$$

$$T_{\text{зІ}} = 0,4 \cdot 314,16 / 17,5 = 7,178 (\text{с}).$$

Ємність фільтра завдання швидкості:

$$C_{\text{фзІ}} = 16 \cdot T_{\text{мшв}} / R_{\text{зад.рег.шв}}, \quad (4.28)$$

$$C_{\text{фзІ}} = 16 \cdot 0,013 / 30 \cdot 10^3 = 6,756 \cdot 10^{-6} (\Phi) = 6,756 (\text{мк}\Phi).$$

Вибираємо конденсатор типу К53-14:6,8мкфх10В. Тобто уточнене значення ємності в колі фільтра задатчика інтенсивності: $C_{\text{фзІ}} = 6,8 \cdot 10^{-6} (\Phi) = 6,8 (\text{мк}\Phi)$.

Висновок: проведено вибір елементної бази регуляторів струму та швидкості системи електроприводу, визначено їх параметри настройки відповідно до модульного критерію оптимізації.

5. РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ТА ТЕХНІКО – ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ВИБОРУ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ

5.1. Розробка математичної моделі системи електроприводу

Перехідним чи динамічним режимом електропривода називається режим роботи привода при переході з одного усталеного стану до другого, який відбувається під час пуску, гальмуванні реверсу.

У перехідному режимі електропривода одночасно і взаємопов'язано між собою діють перехідні механічні, електромагнітні і теплові процеси. При процесах, які швидко протікають, зміна теплового стану електропривода у більшості випадків несуттєво впливає на інші процеси, тому в подальшому при побудові графіків перехідних процесів зміну теплового стану не будемо враховувати. У цьому випадку мають на увазі протікання тільки механічних і електромагнітних процесів, які в сукупності називаються електромеханічними перехідними процесами.

Проаналізувавши режим роботи при переході з одного усталеного стану в інший, який відбувається під час пуску, гальмування, реверсу, було побудовано відповідні залежності. ($\omega = f(t)$; $M = f(t)$; $I = f(t)$).

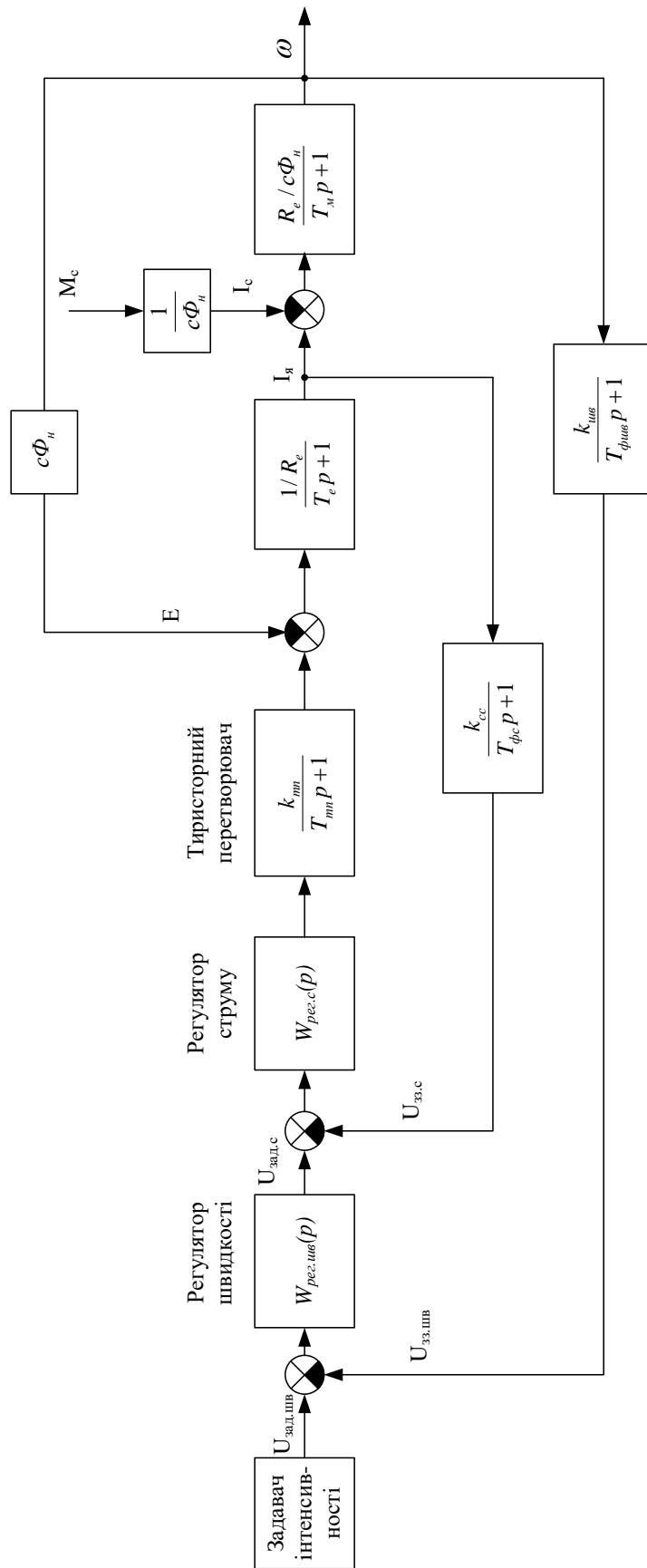


Рисунок 5.1 – Структурна схема електропривода системи ТП – Д круглошпильного верстату Ц-6

За даними структурної схеми складаємо математичну модель з врахуванням отриманих в п. 4.2 та 4.4 коефіцієнтів і сталих часу.

Аналіз і моделювання процесів проведено в ППП Matlab.

Модель ТП – Д в ППП Matlab зображено на рисунку 5.2

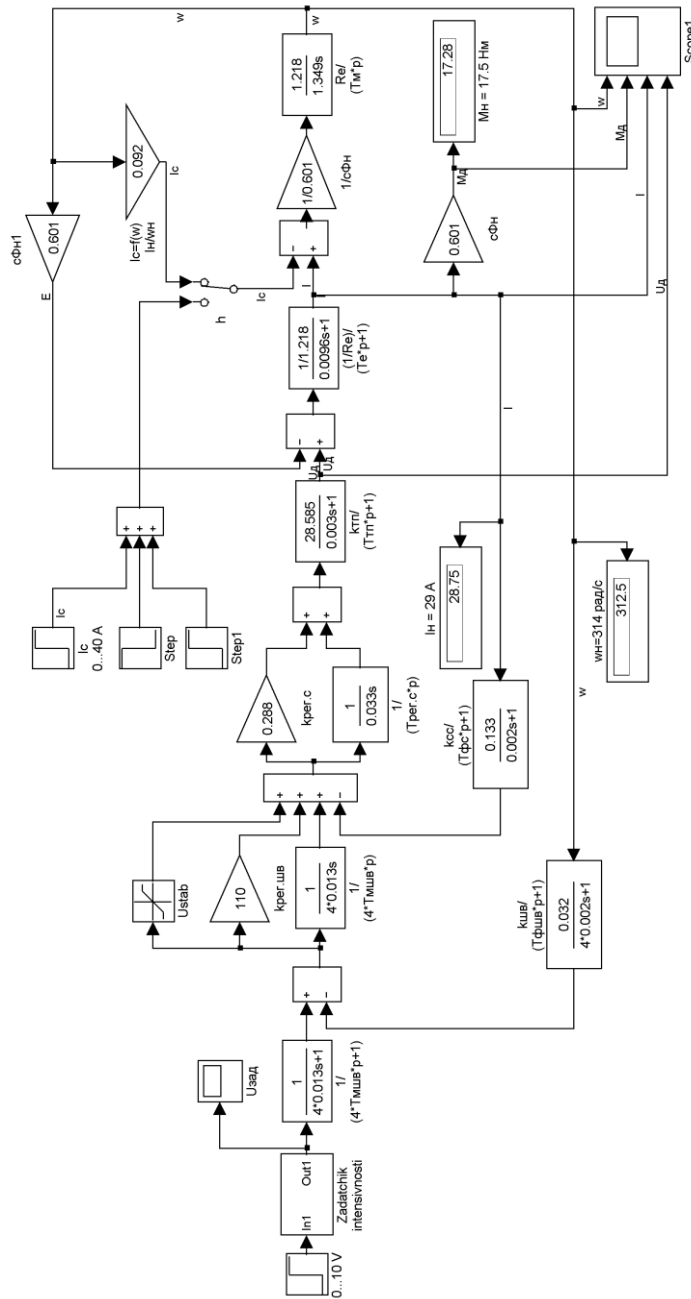


Рисунок 5.2 – Модель системи ТП- Д в ППП Matlab

Результати моделювання приведенно на рисунках 5.3-5.4.

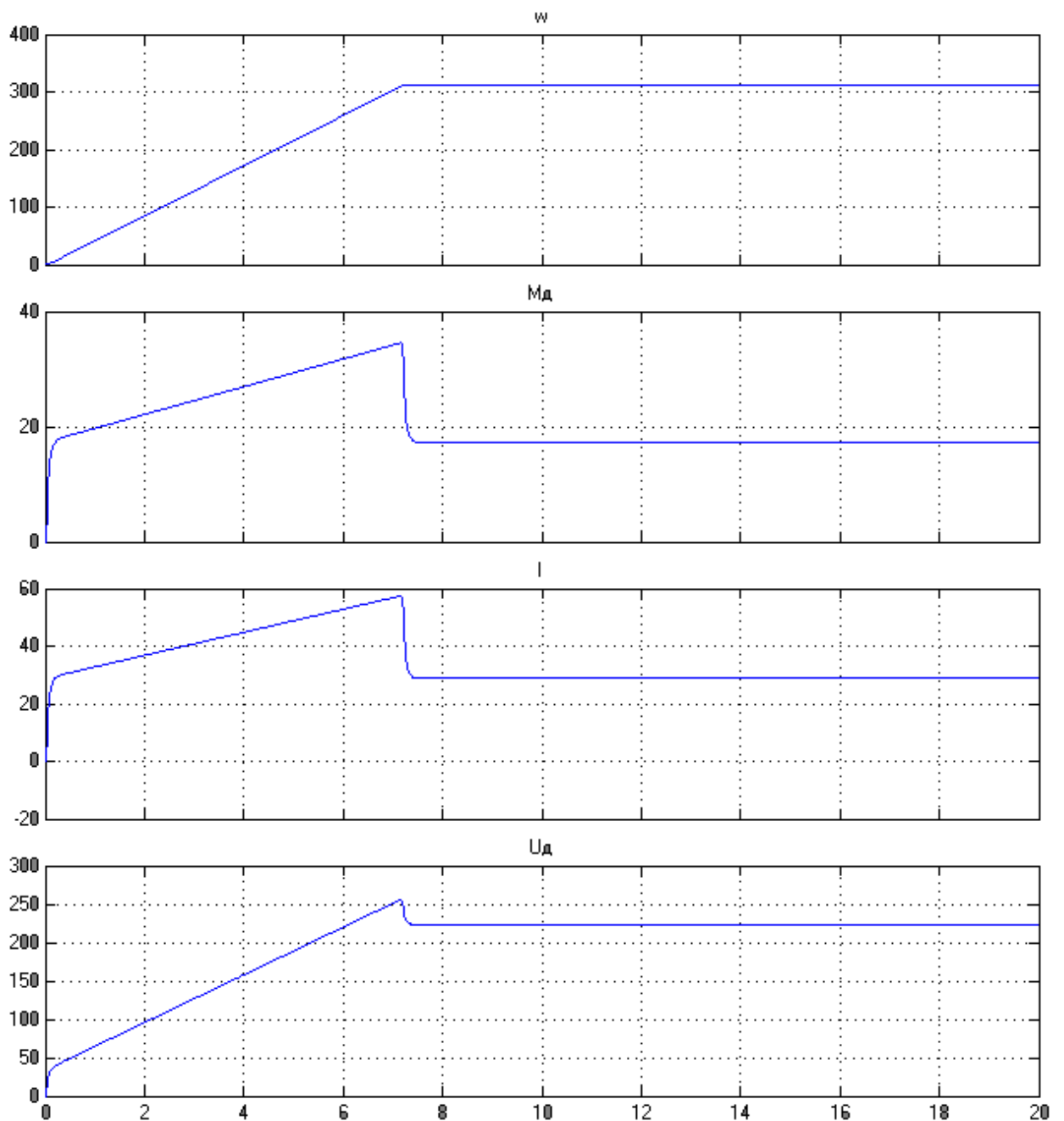


Рисунок 5.3 – Моделювання роботи системи ТП-Д з лінійною залежністю $M = f(\omega)$ в тривалому режимі роботи S1

На рисунку 5.3: ω – швидкість електроприводу, рад/с; M_d – момент двигуна, Н·м; I – струм якоря двигуна, А; U_d – вихідна напруга тиристорного перетворювача, В.

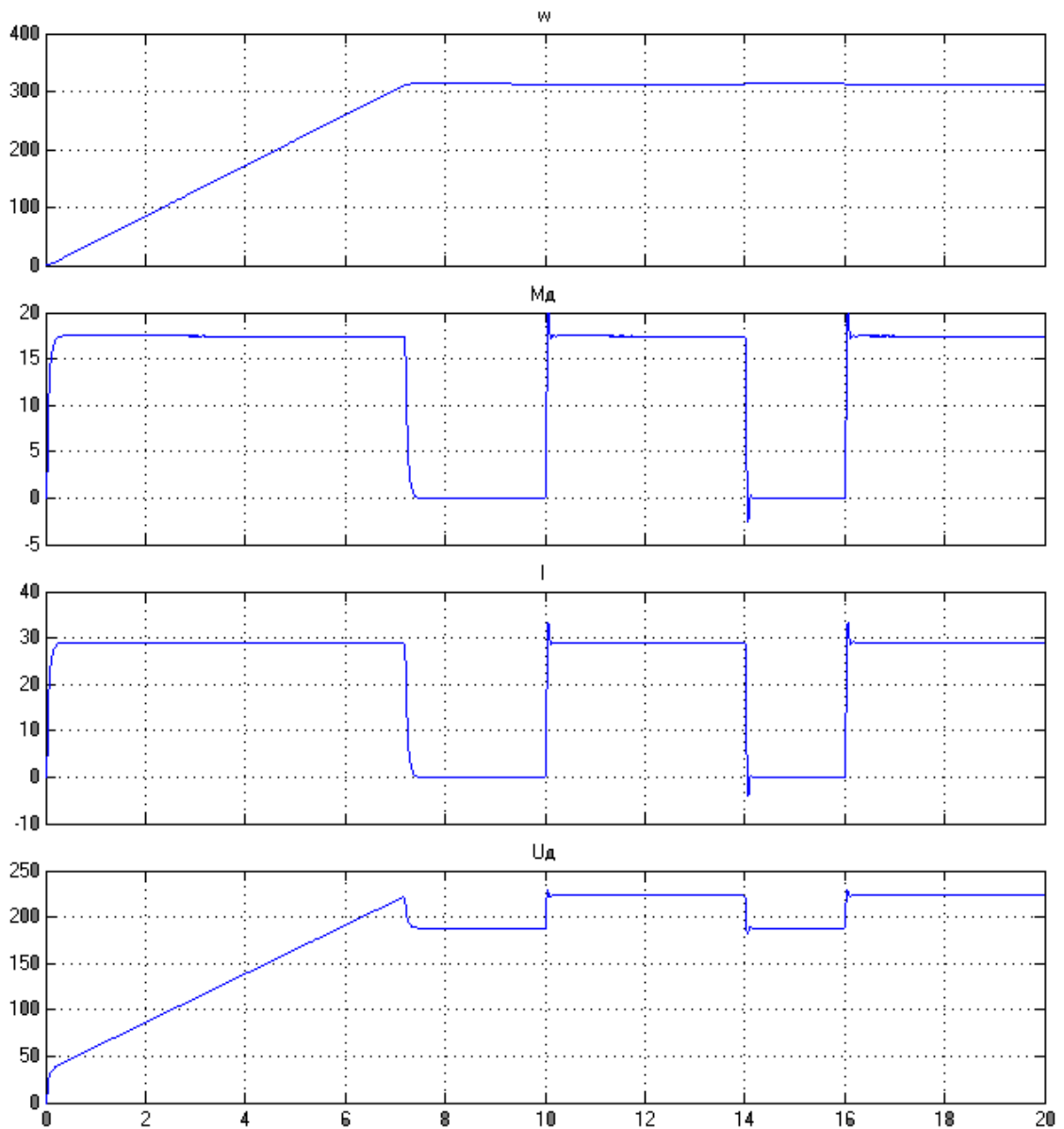


Рисунок 5.4 – Моделювання системи ТП-Д в переміжному режимі S6

На рисунку 5.4: w – швидкість електроприводу, рад/с; M_d – момент двигуна, Н·м; I – струм якоря двигуна, А; U_d – вихідна напруга тиристорного перетворювача, В.

Висновок: як видно з графіків перехідних процесів, внаслідок введення регуляторів система плавно переходить на номінальний режим роботи при пуску без коливань швидкості, тобто система працює стабільно.

5.2 Техніко – економічне обґрунтування вибору систем електроприводу

Для шестерних круглопильного верстату переважно застосовують двигуни постійного струму і асинхронні електродвигуни. і з вологостійкою ізоляцією. Вони розраховані на тривалий номінальний режим роботи S1, який вимагає сам технологічний процес.

Двигуни постійного струму мають широке застосування в промисловості де потрібне широке і плавне регулювання швидкості обертання. Іншою системою електроприводу постійного струму є система тиристорний перетворювач – двигун (ТП-Д). Суттєвою перевагою тиристорного перетворювача є його досить мала інерційність по відношенню до генератора постійного струму. Це полегшує формування необхідних динамічних характеристик електроприводу.

АД з контактними кільцями і ФР в порівнянні з АД з КЗ ротором мають дещо більші габаритні та металоємні розміри, більш дорогі, складніші за конструкцією, однак вони дозволяють забезпечувати плавність пуску і гальмування і змінювати в достатніх розмірах пускові моменти, допускають регулювання швидкості, мають менші втрати енергії в обмотках при перехідних процесах. Основна їх особливість – можливість зменшення при допомозі реостата пускового струму при одночасному збільшенні пускового моменту. Тому ці двигуни найбільш розповсюджені в механізмах такого типу.

Двигуни з короткозамкнутим ротором застосовуються в електроприводі, де не вимагається регулювати частоту обертання, або в якості другого (допоміжного) двигуна для одержання знижених швидкостей. Недоліком електродвигунів з короткозамкнутим ротором є великий пусковий струм, який у 5...7 разів перевищує струм двигуна при роботі в номінальному режимі.

Перетворювач частоти (ПЧ – АД) дозволяє плавно регулювати швидкість двигуна 5...7 в широкому діапазоні, а отримані характеристики мають високу жорсткість з високими показниками і малими втратами. Хоча процес регулювання частоти в цій системі має свої недоліки. Для створення перетворювача необхідно чотири електричних машини, розраховані на повну потужність споживача, що визначає габаритність установки і її вартість, особливо при великих потужностях.

Тиристорний регулятор напруги (ТРН-АД), має широке розповсюдження за рахунок великого ККД, простоти в обслуговуванні і дозволяє реалізувати різні функції по керуванню і оптимізації режимів ЕП, а також може змінювати напрям швидкості АД, тобто реверс. Недоліком є те, що зміна напруги живлення суттєво впливає на критичний момент, в результаті чого штучна характеристика має криві, що мало придатні для регулювання швидкості, так як по мірі зниження навантаження різко зменшується критичний момент двигуна і тим самим його переважувальні властивості, а діапазон регулювання швидкості дуже малий.

Використовуючи критерій приведених затрат визначаємо використання якої з розглянутих систем ЕП буде найбільш економічно вигідним для даного механізму.

Розраховуємо варіант системи електроприводу ТП-ДПС.

Визначаємо споживану потужність системи електроприводу:

$$P_1 = P_n / \eta_n, \quad (5.1)$$

$$P_1 = 5,5 / 0,9 = 6,11 \text{ (кВт)}.$$

Втрати потужності:

$$\Delta p = P_1 - P_n, \quad (5.2)$$

$$\Delta p = 6,11 - 5,5 = 0,61 \text{ (кВт)}.$$

Приймаємо тривалість роботи системи електроприводу рівною одній робочій зміні, що відповідає режиму роботи підприємства, тобто $t_{\text{год}} = 8$ год. Тривалість роботи обладнання на рік складає $t_d = 240$ днів згідно календарного плану роботи звичайного підприємства.

Тоді тривалість роботи обладнання на рік:

$$t_p = t_{\text{год}} \cdot t_d, \quad (5.3)$$

$$t_p = 8 \cdot 240 = 1920 \text{ (год/рік)}.$$

Розрахуємо річну вартість втрат електроенергії в системі електроприводу, виходячи з тривалості роботи обладнання, величини втрат потужності та діючого тарифу на електроенергію.

$$\Delta w = \Delta p \cdot t_p \cdot T, \quad (5.4)$$

де T – тариф на електроенергію, $T = 1.23$ грн/кВт·год за даними Національної комісії регулювання електроенергетики України (постанова №1216 від 1.10.15 р – для підприємств 1 класу напруг вище 27,5 кВ – 0.79 коп/кВт·год, для підприємств 2 класу напруг нижче 27,5 кВ – 123 коп/кВт·год).

$$\Delta w = 1.23 \cdot 1920 \cdot 0,78 = 1842.04 \text{ (грн/рік)}.$$

Таблиця 5.1 – Розрахунок затрат на утримання електроприводу

Система електроприводу	ДПС	АД-РКС	ТП-Д	ТРН-АД	ПЧ-АД
Потужність двигуна, кВт	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5
ККД двигуна та системи	0,78	0,75	0,9	0,82	0,95
Спожита потужність двигуна, кВт	7,05	7,33	6,11	6,71	5,79
Тривалість роботи, год/добу	8	8	8	8	8
Тривалість роботи, днів/рік	240	240	240	240	240
Тривалість роботи, год/рік	1920	1920	1920	1920	1920
Втрати потужності, кВт	1,55	1,83	0,61	1,21	0,29
Тариф електроенергії, грн/кВт год	1.23	1.23	1.23	1.23	1.23
Вартість втрат електроенергії, грн/рік	1815,36	2143,3	714,43	1417,15	339,65
Вартість двигуна Д, грн	12000	20700	12000	4602	4602
Вартість системи С, грн	1359	1680	7200	1446	2665
Нормовані затрати на амортизацію 15%(С+Д)	2046	5357	2880	2473	4538
Експлуатаційні затрати (ремонт + тех. обслуг)	570	240	240	150	120
Вартість експлуатації електроприводу, грн	5307,5	8819	7469,45	7439,9	11701
Базовий варіант з максимальними втратами, грн	6329,3	6329,3	6329,3	6329,3	6329,3
Прибуток від зменшення втрат (пор. з базовим), грн/рік	327,94	0	1428,87	726,15	1803,65
Термін окупності, р	13,18	–	4.17	9,25	5,79

Визначаємо нормовані затрати на амортизацію (оновлення основних засобів виробництва) в сумі 15% від вартості системи електроприводу.

$$A = 0,15 \cdot (D + C), \quad (5.5)$$

де D – вартість електродвигуна, $D = 12000$ (грн);

C – вартість системи керування, $C = 7200$ (грн).

$$A = 0,15 \cdot (12000 + 7200) = 2880 \text{ (грн/рік)}.$$

Вартість впровадження та експлуатації системи електроприводу:

$$Z = D + C + A + E, \quad (5.6)$$

де E – експлуатаційні затрати, $E = 240$ грн/рік;

$$Z = 1200 + 7200 + 2880 + 240 = 11920 \text{ (грн)}.$$

Економічну ефективність розрахуємо відносно базового варіанту з максимальною річною вартістю втрат електроенергії – виходячи з таблиці 4.1 таким варіантом є система електроприводу АДФР, для якої $\Delta w_6 = 2143,3$ (грн/рік). Тоді річний економічний ефект порівняно з базовим варіантом складатиме

$$P_e = \Delta w_6 - \Delta w, \quad (5.7)$$

$$P_e = 4286 - 1428 = 2858 \text{ (грн/рік)}.$$

Термін окупності коштів, що затрачені на впровадження та експлуатацію системи електроприводу:

$$T_o = Z / P_e, \quad (5.8)$$

$$T_o = 11920 / 2858 = 4.17 \text{ (років)}.$$

Розрахунок систем електроприводів ДПС-РКС, АДФР-РКС, ТРН – АД та ПЧ – АД проведено за (4.1) – (4.8) і приводиться в таблиці 4.1.

Висновок: з врахуванням техніко-економічних розрахунків термін окупності системи ТП-Д є найнижчим, тому вибираємо вказану систему як оптимальний варіант електроприводу круглопильного верстату.

Охорона праці

Сучасне деревообробне устаткування оснащено швидкодіючими різальними інструментами і механізмами подачі, тому при роботі на ньому треба суворо дотримуватись правил техніки безпеки, бо порушення їх може призвести до нещасних випадків.

При роботі на деревообробних верстатах треба знати такі загальні правила безпеки:

не можна розпочинати роботу на верстаті, не вивчивши його будови, експлуатації та основних правил техніки безпеки;

працювати можна тільки на цілком справному верстаті;

різальний інструмент і всі рухомі частини мають бути надійно закріплені і захищені;

захисні пристрої мають бути простими, легко зніматись і відкриватись, не ускладнювати спостереження за процесом роботи;

перед початком кожної зміни пристрої треба оглядати і перевіряти;

не можна працювати на верстаті із знятими або несправними захисними пристроями;

при зміні розмірів оброблюваного матеріалу захисні пристрої мають регулюватися швидко і легко без застосування спеціального інструменту;

механічна подача має бути заблокована з пусковим пристроєм різальних інструментів, щоб унеможливити її вмикання до пуску різальних інструментів;

частини деревообробних верстатів, які швидко повертаються у вихідне положення, мають забезпечуватись надійними гальмівними пристроями;

забороняється гальмувати різальні інструменти та інші рухомі частини сторонніми предметами;

важелі, педалі і рукоятки для зупинки верстата мають діяти безвідказно і бути на найкоротшій відстані від робітника;

органи керування верстатом (кнопки, важелі, ручки) мають бути на висоті 0,8—1,2 м від рівня підлоги, не далі як за 0,6 м від верстатника і в такому місці, щоб до них був вільний доступ (самовільне або випадкове вмикання їх слід зробити неможливим);

при кнопковій системі керування треба, щоб кнопка «пуск» була втоплена в оправу не менш ніж на 5 мм, а кнопка «стоп» яскраво червоного кольору була поруч, але не ближче ніж за 50 мм і виступала з оправу не менше як на 3 мм;

при роботі на верстаті треба бути уважним, не розмовляти з сторонніми;

не можна видаляти відходи, чистити і змащувати верстат під час роботи (для цього його треба зупинити і відключити від електромережі);

на кожному робочому місці має бути ящик або шафа для зберігання інструментів, перевірених пристроїв і пристосувань;

не можна класти ключі, лінійки та інші інструменти на будь-які органи верстата;

всі електрифіковані верстати мають бути надійно заземлені;

верстати, в яких у процесі роботи потрібний постійний нагляд за правильністю виконання операцій (фрезерні, шипорізні та ін.), повинні мати місцеве освітлення;

на робочому місці не має бути нічого зайвого; проходи біля верстатів не слід захарашувати; підлога має бути рівною, але не слизькою;

при виключенні верстата не можна відходити від нього до повної його зупинки;

по закінченні роботи (зміни) верстат треба почистити і змастити, а про виявлені недоліки доповісти майстрові зміни або змінному верстатникові.

При роботі на круглопилкових верстатах для поперечного розкрою:

пилка має бути добре підготовлена, встановлена і захищена автоматично діючим пристроєм; не можна стояти поблизу пилки проти напряму обертання пилкового диска;

подавати заготовки можна лише тоді, коли пилка у вихідному положенні; перед подачею до пилки кінці заготовок можна вирівнювати на відстані від передніх зубців пилки не меншій ніж 0,5 м. Якщо заготовки підрівнюються на каретці, то її треба відтягнути від пилки і закріпити собачкою або гачком, щоб вона знову не прикотилась до пилки; каретка для подачі матеріалу має бути забезпечена щитками, які б закривали передню частину пилки, що виходить за упор.

На круглопилкових верстатах для поздовжнього розкрою:

при ручній подачі частина пилки, що знаходиться над столом, має бути захищена надійним кожухом, який автоматично опускається на розпилюваний матеріал будь-якої товщини і закриває всі зубці; нижню частину пилки (під столом) захищають двома щитами, які розміщені один від другого на відстані не більш ніж 100 мм і виступають за лінію вершин зубців не менш ніж на 100 мм. Ці захисні пристрої не мають утруднювати зміну пилки і видалення тирси;

розклинювальний ніж встановлюють за пилкою на відстані не менш ніж 10 мм від її зубців, а по висоті — на 10—15 мм вище від зубців пилки. Товщина розклинювального ножа має бути на 0,5 мм більше ширини розводу зубців;

на верстаті з ручною подачею при допилюванні кінців дощок необхідно користуватись колодкою-штовхачем;

при поперечному розпилюванні на універсальних верстатах каретка має бути забезпечена надійними затискачами, а стіл — упорами, які б не давали матеріалу повертатися або вилітати з каретки, а також упорами, що обмежують рух каретки.

На стрічкопилкових верстатах:

кожен верстат має бути забезпечений швидкодіючими гальмівними пристроями для раптової зупинки пилкових шківів;

верхні напрямні ролики пилкової стрічки встановлюють так, щоб при регулюванні їх за висотою різку залишалась відкритою тільки різальна частина пилкової стрічки;

стрічкопилкові верстати столярного типу повинні мати роликовий упор, щоб запобігти сповзанню пилкової стрічки в бік подачі розпилюваного матеріалу;

для очищення нижнього пилкового шківа від тирси верстат забезпечують автоматично діючою щіткою.

На фугувальних верстатах:

на верстаті з ручною подачею треба закривати ножовий вал автоматично діючим віяловим захистом, який в процесі фрезерування відкриває тільки ту частину ножового валу, по якій проходить заготовка;

на краях плит стола, що біля ножового вала, мають бути сталі накладки на відстані 3—5 мм від кола, що описують ножі, для підпору волокон у процесі фрезерування;

при поздовжньому фрезеруванні деталей, коротших за 400 мм, вузких за 50 мм і тонших за 30 мм, при ручній подачі матеріалу необхідно користуватись колодкою-штовхачем;

ножі з вала мають виступати не більш як на 2 мм;

короткі і криволінійні деталі можна фрезерувати тільки при застосуванні спеціальних шаблонів;

фугувальні верстати забороняється застосовувати для профільного фрезерування.

На рейсмусових верстатах:

одночасне фрезерування двох і більше деталей різної товщини допускається тільки за умови надійного притискування подавальними вальцями кожної з них;

запобіжні упори слід встановлювати в усіх верстатах незалежно від наявності подавальних секційних валиків;

на передньому краю стола додатково встановлюють завісу із планок;

рифлені валики не повинні мати тріщин, вибитих ребер, спрацьованих поверхонь;

оброблювані заготовки не мають бути коротшими за відстань між центрами подавальних валиків (передніх і задніх).

На чотиристоронніх верстатах:

перед подавальними пристроями верстата треба встановити обмежувачі, які пропускають заготовки відповідної товщини;

не слід пропускати через верстат одночасно більше ніж одну заготовку;

найменша довжина оброблюваних заготовок має дорівнювати відстані між суміжними подавальними вальцями плюс 50 мм;

кожна ножова головка верстата повинна мати екстаустерний приймач, з'єднаний із загальною екстаустерною магістраллю;

в чотиристоронній стругальний верстат не можна пропускати крижасті криві або пожелоблені заготовки.

На фрезерних верстатах з нижнім розміщенням шпинделя і ручною подачею:

різальний інструмент має бути забезпечений автоматично діючими захисними пристроями;

перед початком роботи слід перевірити кріплення всіх рухомих частин, особливо фрез і ножових головок;

при роботі по копіру заготовку треба міцно закріпити в кулазі;

при фрезеруванні коротких деталей по лінійці необхідно застосовувати напрямні колодки або спеціальні пристрої з швидкодіючими затискачами.

На верстатах з верхнім розміщенням шпинделів:

всі рухомі частини верстата мають бути захищені так, щоб доступ до них був тільки з боку робочого місця;

перед початком роботи обов'язково слід перевірити стан затис-них пристроїв, упорів, штифтів і т. ін. (в разі виявлення недоліків користуватись копіром не можна;

на копіювальному верстаті деталі закріплюють у кулагах до відказу ексцентриковими, гвинтовими або іншими притискачами. Притискні пристрої мають бути цілком справними;

компресорні установки для карусельно-фрезерних верстатів з пневматичними притискувачами не можна залишати без нагляду.

На рамних шипорізних верстатах:

перед пуском верстата необхідно перевірити гостроту і кріплення різального інструменту, захисних пристроїв, ексгаустерних приймачів і притискних пристроїв;

особливо треба бути обережним при роботі на односторонніх верстатах з ручною подачею; у двосторонніх шипорізних верстатах перед пилками має бути закріплений щиток, який регулює положення деталі на конвеєрі, а в кінці — автоматичний скидач або нахилені площини, що приймають з конвеєра оброблені деталі.

На ящиківих шипорізних верстатах:

весь різальний інструмент, а також подавальні ланцюги і зірочки конвеєра мають бути надійно захищені; для закріплення оброблюваних заготовок при ручній і

навіть автоматичній подачі шипорізні верстати повинні мати надійні пристрої, щоб запобігти викиданню заготовок різальними інструментами; перед верхніми притискачами встановлюють запобіжний пристрій, щоб рука робітника не потрапляла між деталей і притискачі;

двосторонні шипорізні верстати повинні мати автоматичні скидачі або нахилені площини для приймання оброблюваних заготовок з конвеєра; на нерухомій частині двостороннього шипорізного верстата перед торцевими пилками повинен бути щиток для регулювання положення заготовок на подавальному ланцюгу.

На свердлильних верстатах:

Патрони для свердел мають бути гладенькими і обтічної форми; свердла мабуть бути захищені так, щоб при заглибленні їх в деревину або виході з деревини частина свердла, що знаходиться перед деревиною, була весь час закрыта; оброблювані деталі необхідно міцно закріплювати затискувачами.

На ланцюгодобвальних верстатах:

робоча частина різального ланцюга повинна мати захисний пристрій у вигляді коробки, яка опускається на оброблювану поверхню при-заглибленні ланцюга в деревину. Неробоча частина ланцюга і зірочки захищені суцільним металевим кожухом;

стіл верстата має бути забезпечений надійними затискними пристроями для закріплення оброблюваного матеріалу. Він не повинен гойдатись ари переміщенні в горизонтальному або вертикальному положенні; деталь має бути надійно закріплена, а для довгих виробів необхідно мати підставку;

не можна працювати біля верстата без окулярів і запобіжного щитка перед ланцюгом.

На токарних верстатах:

перед встановленням заготовок на верстат їм треба надати відповідної форми (округлити);

не можна ставити у верстат заготовки з тріщинами, гниллю та сучками;

заготовки, склеєні з кількох частин, перед встановленням перевіряють на міцність і точність склеювання;

при обточуванні важких або склеєних заготовок необхідно застосовувати міцні металеві опорні пластинки для заднього центра і передньої гребінки. Для торцевих поверхонь застосовують пластинки з шипами.

На круглопалкових верстатах:

ножова головка і всі рухомі частини мають бути закриті металевим кожухом;

ножі мають бути добре нагострені і відбалансовані;

квадратний отвір для пропускання заготовок має бути таким, щоб заготовка не могла в ньому прокручуватись під час обробки.

На стрічкошліфувальних верстатах:

склеєну стрічку слід надівати на шків так, щоб шов був по ходу стрічки;

не можна застосовувати шліфувальні стрічки, погано склеєні або з надірваними краями;

працювати треба в рукавицях, не доторкаючись до рухомої шліфувальної стрічки.

На дискових шліфувальних верстатах:

неробоча частина диска має бути захищена;

упорну напрямну лінійку і стіл слід надійно кріпити;

зазори між супортом і площиною диска не мають перевищувати 5 мм;

колова швидкість дисків не має перевищувати 30 м/с;

забороняється застосовувати шліфувальну шкурку розміром

меншу за диск; кінці шкурки після закріплення на диску треба обрізувати;

при шліфуванні дрібних, криволінійних і фасонних деталей пальці верстатника мають бути захищені на пальниками;

при використанні дводискових верстатів як і одно дискових непрацюючий диск має бути захищений.

На циліндрових шліфувальних верстатах:

шліфувальні циліндри і щітки мають бути захищені кожухами з приймачами для відсмоктування пилу;

не можна подавати у верстат деталі з дефектами;

шліфувальну шкурку кріплять на циліндрі щільно, без складок і виступних кінців;

не можна працювати на верстаті з надірваною шкуркою, а в разі її розриву верстат відразу зупиняють;

не можна поправляти деталь, якщо її вже захопили вальці або конвеєр;

при виході деталей з верстата їх треба підтримувати.

При склеюванні деревини:

на робочому місці підлога має бути рівною і не слизькою (без клею);

посуд для клею повинен мати стійке дно, щоб не перекидався;

при роботі з клеями із синтетичних смол, крім загальної вентиляції, мають діяти додаткові відсмоктувачі повітря клейових розчинів;

кожний робітник - склеювальник повинен працювати в гумових рукавицях і прогумованому або шкіряному фартуху;

перед роботою і після роботи, особливо при застосуванні синтетичних клеїв, корисно змащувати обличчя і руки вазеліном з ланоліном, щоб зберегти шкіру від дії шкідливих речовин, які входять до складу деяких клеїв.

При роботі на гільйотинних ножицях:

ніж з боку подачі має бути захищений нерухомою лінійкою не менше ніж 100 мм завширшки;

лінійка має бути закріплена на відстані не більше ніж 5 мм від ножа I на висоті 30 мм від стола; з боку виходу шпону має бути відкидний запобіжний пристрій;

при розкроюванні шпону на гільйотинних ножицях товщина пачки не повинна перевищувати розмірів, зазначених в технічній характеристиці. При подачі пачки шпону не можна підсувати руки близько до ножа.

На кромкофугувальних верстатах:

леза ножів мають виступати не більш ніж на 2—3 мм;

притискна лінійка не повинна мати перекоосу і притискувати пачку шпону по всій довжині;

упорна лінійка має легко відводитись вгору кареткою при її робочому ході і плавно опускатись при поверненні каретки в попереднє положення;

каретка має бути захищена бар'єром по всій довжині верстата;

товщина оброблюваної пачки шпону не має перевищувати норм, зазначених у технічній характеристиці верстата.

На ребросклеювальних верстатах:

перед роботою слід перевірити справність верстата;

валик, що приводить в дію верхні живильні ролики, має бути без подряпин і вибоїн;

при подачі смуг шпону не можна підсувати руки близько до подавальних роликів.

На клейових вальцях:

руки робітника не повинні наближатись до вальців ближче ніж на 250 мм (для цього встановлюють спеціальний захисний пристрій);

не можна працювати при знятих й несправних захисних пристроях, а також без під'єднання верстата до загальної системи заземлення цеху;

не можна чистити і мити вальці під час їхньої роботи;

ремонт вальців провадиться при вимкненому електродвигуні;

підлога біля вальців має бути покрита дерев'яними решітками.

На гідравлічних пресах:

працювати можна тільки на справному пресі при справних контрольних вимірних приладах;

не завантажувати пакети під час піднімання плит преса;

виштовхувати облицьовані деталі з преса тільки за допомогою спеціальних виштовхувачів;

не ремонтувати прес при наявності гідравлічного тиску і при ввімкнених електродвигунах;

при зупинці преса або перерві в роботі підйомні столи опускати до упору;

не затягувати гайок і гвинтів деталей, які перебувають під тиском;

по закінченні роботи преса електродвигуни і систему керування відімкнути від мережі;

працювати на пресі можна тільки при наявності припливно-витяжної вентиляції для видалення шкідливих парів, що утворюються при гарячій полімеризації смоляних клеїв;

оскільки робочою рідиною є масло, слід особливу увагу приділяти протипожежній безпеці.

На пневматичних вайлах з електроогріванням:

металевий каркас вайли має бути заземлений» а нагрівачі й живильні проводи треба оберігати від пошкоджень;

з'єднані контакти мають бути за ізольовані;

на випадок пошкодження нагрівачів або проводів, а також в разі появи запаху гару нагрівач треба негайно вимкнути і повідомити майстра або чергового електрика про несправність;

налагодження і ремонт вайл дозволяється здійснювати тільки в тому разі, якщо в пневмокамері немає стиснутого повітря;

щоб уникнути опіків, не слід доторкуватись голою рукою до нагрівачів.

При складанні меблевих виробів:

всі пневматичні, механічні гідравлічні вайли та інші аналогічні механізми повинні мати захисні або запобіжні пристрої, які б

не допускали затискування рук робітника між деталлю і притискувачем;

пневматичні і гідравлічні системи вайл мають бути забезпечені регулювальною і запобіжною апаратурою;

органи керування мають бути змонтовані так, щоб не допустити довільного або випадкового включення вайл.

На автоматичних та напівавтоматичних лініях:

всі автоматичні та напівавтоматичні лінії повинні забезпечуватися центральним пультом керування;

верстати і агрегати, які знаходяться в лінії, повинні мати самостійні органи керування для їх запуску і зупинки;

всі верстати в лінії повинні розміщуватися послідовно відповідно до технологічного процесу і мати систему блокування для її дотримання;

будь-яке порушення роботи виконавчих механізмів лінії повинно супроводжуватись автоматично зупинкою всіх механізмів, передуючих в потоці зупиняючий верстат;

під час роботи лінії в автоматичному режимі доступ до рухомих частин можливий при наявності автоматичних засобів, які при порушенні цих умов зупиняють всю лінію;

для контролю за якісним виконанням технологічного процесу встановлюють контрольні прилади;

всі лінії повинні мати сигнальні пристрої, які повідомляють про порушення режимів роботи на будь-якій ділянці;

якщо лінії обслуговуються з обох поздовжніх сторін, то для безпечного переходу у відповідних місцях встановлюються перехідні мостики.

ВИСНОВКИ

В даній магістерській роботі було розроблено схему керування електроприводом круглопильного верстату. Цей агрегат деревообробного виробництва відноситься до ріжучих машин, які призначені для поперечного, поздовжнього та кутового розпилювання пиломатеріалів товщиною до 100 мм.

Виконано техніко-економічне обґрунтування вибору системи керування електроприводу, що враховує вартість втрат електроенергії та їх вплив на термін окупності оладнання системи електроприводу порівняно з базовим варіантом.

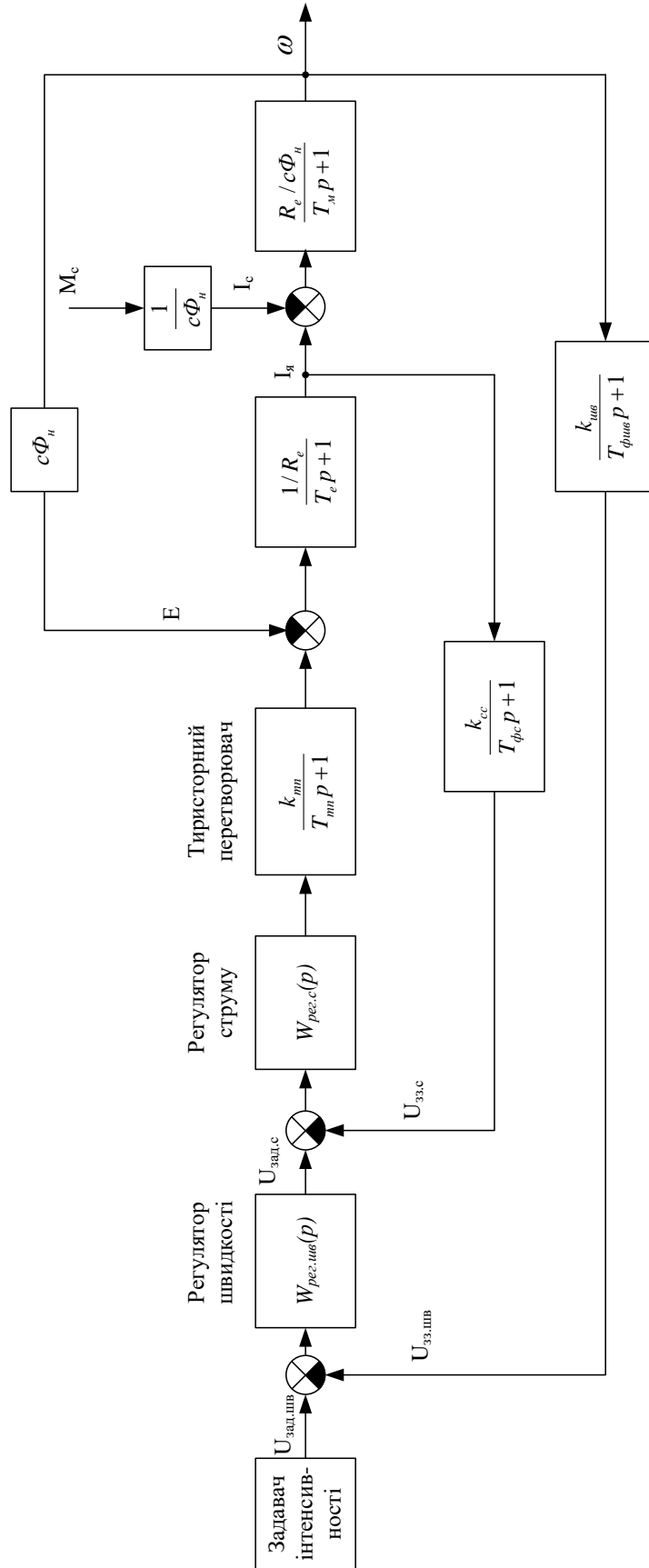
Розраховано та вибрано електродвигун, проведено розрахунок статичних моментів на валу двигуна, інерційних мас та моментів інерції. Досліджено характеристики в статистичному та динамічному режимах і розроблено схему автоматичного керування електроприводом.

В процесі роботи були вибрані елементи силового кола, комутуючі елементи та сенсори струму і швидкості. З використанням результатів розрахунків було розраховано передаточні коефіцієнти та постійні часу елементів системи та зворотних зв'язків, що стало підготовчим етапом для створення структурної схеми системи та математичної моделі у ППП “Matlab”.

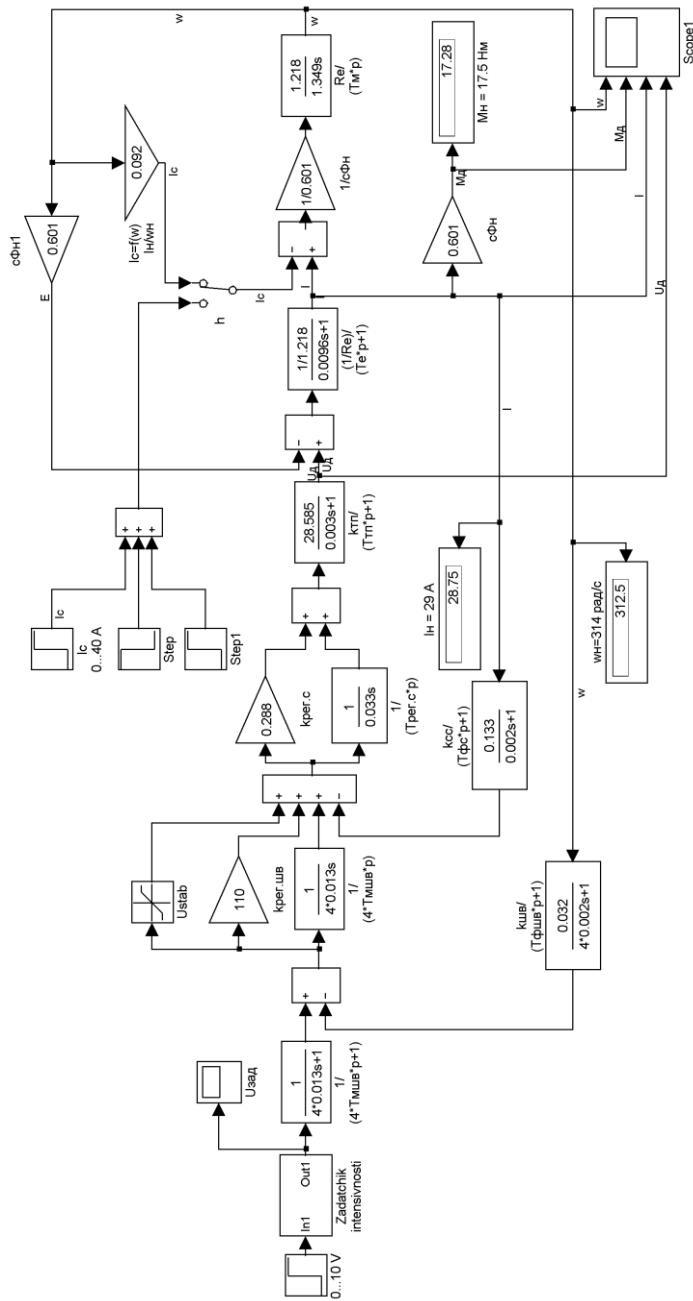
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Фоменков А. П. Электропривод сельскохозяйственных машин, агрегатов и поточных линий / А. П. Фоменков. – М.: Колос, 1984.–288 с.
2. Коломиец А. П. Электропривод и электрооборудование / А. П. Коломиец, Н. П. Кондратьева, И. Р. Владыкин, С. И. Юран. – М.: КолосС, 2006. – 328 с. – ISBN 978-5-9532-0596-2.
3. Белов М. П. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов: учебник для студ. вузов / М. П. Белов, В. А. Новиков, Л. Н. Рассудов. – М.: Изд. центр «Академия», 2007. – 576 с. – ISBN 978-5-7695-4497-2.
4. Коротков В. И. Деревообрабатывающие станки / В. И. Коротков. – М. : Академия. – 2006. – 304 с. – ISBN 5-7695-3247-5.
5. А. А. Иванов Справочник по электротехнике. – М.: Высш. школа. Головное изд- во, 1984. – 304 с.
6. Грабко В. В. Системи керування електроприводами. Розрахунок системи підпорядкованого керування електроприводом постійного струму. Курсове та дипломне проектування: навчальний посібник / В. В. Грабко, М. П. Розводюк, В. В. Грабко. – Вінниця: ВНТУ, 2010. – 89 с.
7. Тиристоры SCR: Phase Control Discrete. – [Електронний ресурс] – Режим доступу до каталогу: http://www.gaw.ru/html.cgi/txt/ic/IR/tiristor/diskrete/diskr_50.htm.
8. Р.М. Терещук и др. Полупроводниковые приемно-усилительные устройства: Справочник. – К.: Наук. Думка, 1989. – 72,50с.
9. ЕТІ. Автоматические выключатели на токи до 125А. Каталог 2010 – ЕТІ Corp, 2010 – ЕТІСАТРУ – 166 с.
10. А.П. Голуб, Б.І. Кузнецов, І.О. Опришко, В.П. Соляник Системи керування електроприводами: Навчальний посібник. - К.: НМК ВО, 1992.-352с.
11. В.П. Куропаткін Теорія автоматичного керування. – М.:”Высшая школа”, 1973. – 528 с.

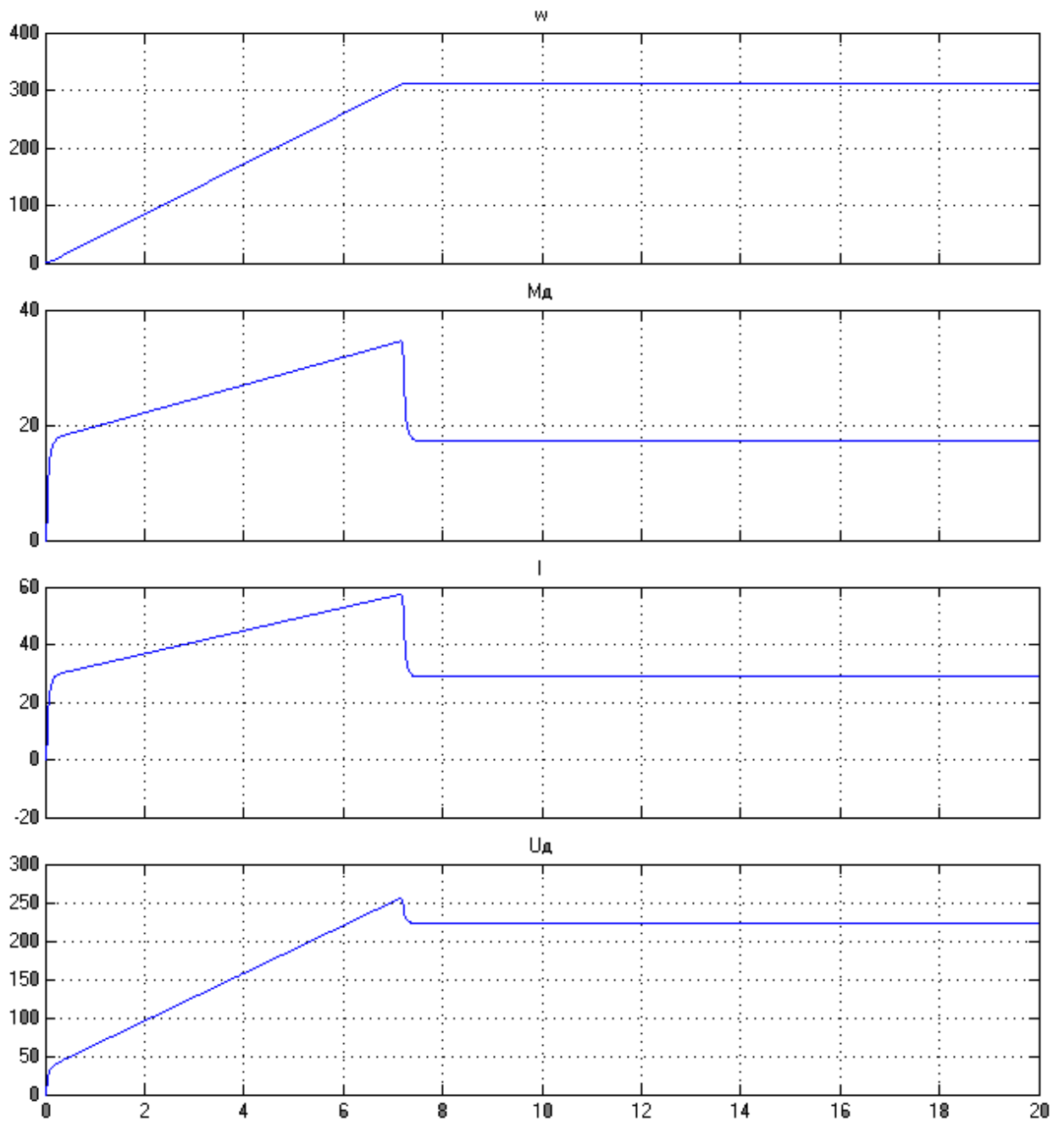
12. М.Г. Попович, О.В. Ковальчук Теорія автоматичного керування. – К.:
Либідь, 1997. – 544 с.



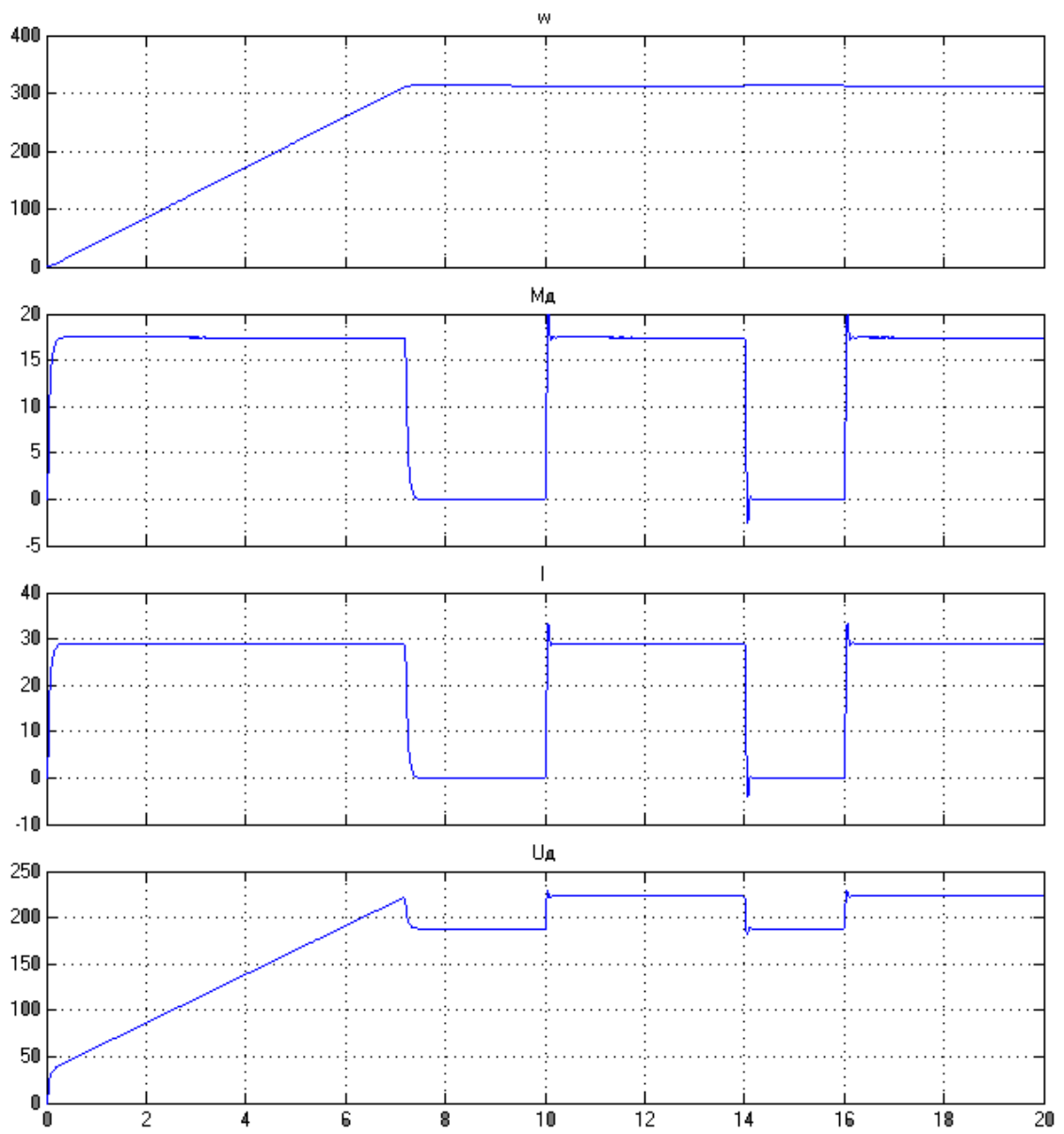
Структурна схема електропривода системи ТП – Д круглопильного верстату Ц-6



Модель системи ТП- Д в ППШ Matlab



Модельовання роботи системи ТП-Д з лінійною залежністю $M = f(\omega)$ в тривалому режимі роботи S1



Модельовання системи ТП-Д в переміжному режимі S6