

гр. ЕЕМ-22ск

АРХІПОВ	Електромеханічне	обладнання
Дмитро	летючих ножиць	в умовах проф.
Віталійович	блюмінгу ПАТ «АрселорМіттал	Титюк В.К
	Кривий Ріг»	

ЗАГАЛЬНА ЧАСТИНА

Розділ 1. АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЇ ТА ПРИНЦИПУ РОБОТИ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ ГІЛЬЙОТИННИХ НОЖИЦЬ

1.1 Загальні відомості про підприємство

Публічне акціонерне товариство «АрселорМіттал Кривий Ріг» є найбільшим металургійним підприємством України з повним металургійним циклом. Підприємство розташоване в місті Кривий Ріг Дніпропетровської області та входить до складу транснаціональної корпорації ArcelorMittal — світового лідера з виробництва сталі.

ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» спеціалізується на випуску довгомірного прокату, арматурної сталі, катанки, а також на виробництві напівфабрикатів — заготовок для подальшої переробки. Продукція підприємства експортується до понад 60 країн світу, що свідчить про високий рівень якості та надійності технологічних процесів.

Основні виробничі потужності підприємства включають: коксохімічне виробництво, агломераційне виробництво, доменний та сталеплавильний цехи, прокатні цехи, у тому числі блюмінг, а також допоміжні служби. Стратегічним напрямом розвитку підприємства є модернізація обладнання, впровадження енергозберігаючих технологій та автоматизованих систем керування.

Високий рівень автоматизації, використання сучасних електромеханічних систем і постійне оновлення технологічного обладнання забезпечують високу продуктивність, якість продукції та безпечні умови праці. Особлива увага приділяється екологічній безпеці та зниженню негативного впливу на навколишнє середовище.

1.2 Характеристика дільниці Блюмінг

Блюмінг є важливим структурним підрозділом ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг», що входить до складу прокатного виробництва. Основне його призначення — обробка сталевих зливків шляхом їх прокатування у напівфабрикати — сляби, які в подальшому спрямовуються до інших виробничих дільниць для виготовлення готової продукції.

Дільниця оснащена важким обтискним прокатним станом реверсивного типу, призначеним для виконання операцій чорнового прокатування. Обладнання, яке використовується в роботі Блюмінгу, включає механізми подачі зливків, нагрівальні печі, систему транспортних рольгангів, гідравлічні пристрої для позиціювання, а також гільйотинні ножиці для поділу заготовок на потрібну довжину. Схема розташування основного технологічного обладнання дільниці подана на рис. 1.2.1.

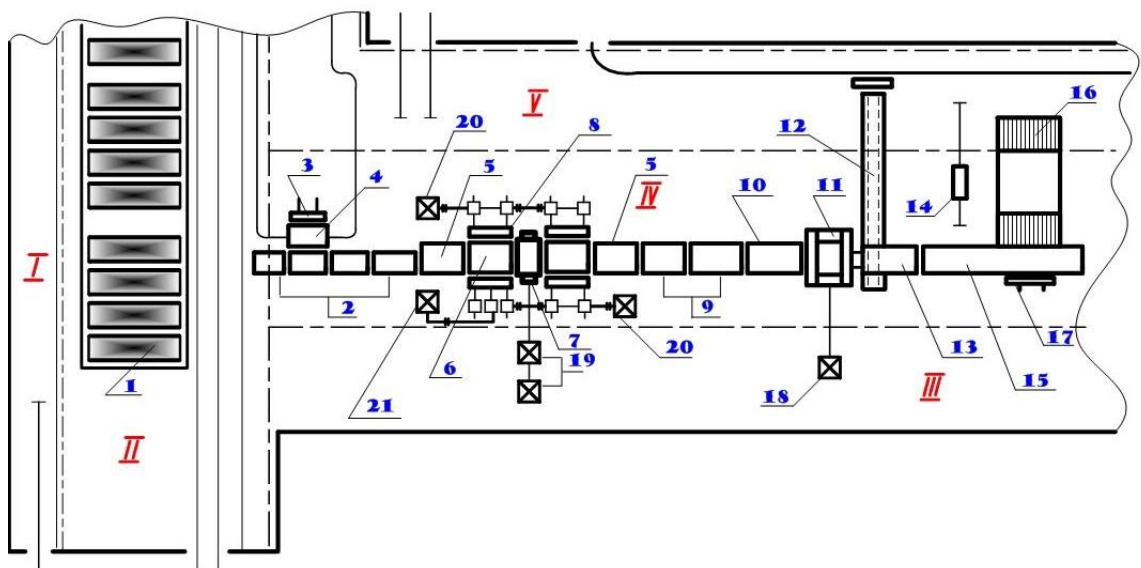


Рис. 1.2.1 - Схема розташування обладнання блюмінга

На рис.1.1 показана схема розташування обладнання блюмінга.

I, II – зони нагрівальних печей-шахт;

III - машинний відсік;

VI – робоча зона прокатного стану;

V – зона збору обрізків та обробки скрапу;

1- печі для нагрівання металевих злитків; 2- приймальний рольганг для подачі заготовок; 3- механізм зіштовхування злитків у піч; 4- візок для транспортування злитків; 5- розкатний рольганг перед і за станом; 6- робочий рольганг у вихідній і приймальній частинах кліті ; 7- прокатна кліть; 8- маніпуляторні напрямні; 9- проміжні рольганги; 10- рольганг перед вузлом різання; 11- ножиці; 12- конвеєр для збору обрізі; 13- вивідний рольганг за ножицями; 14- переміщувальний візок; 15- рольганги збору прокатної продукції; 16-устаткування для збирання готової продукції; 17- зіштовхувач готової заготовки; 18- електропривід вузла ножиць; 19- головні двигуни стану; 20- привід маніпулятора; 21- електродвигун кантувача.

Гільйотинні ножиці на дільниці відіграють важливу роль у фінальній стадії прокатування, забезпечуючи точне й ефективне розрізання розігрітих сталевих заготовок. Ефективність роботи всього Блюмінгу багато в чому залежить від технічного стану й надійності цього обладнання.

Керування обладнанням дільниці реалізується за допомогою автоматизованої системи з елементами електроприводу, гідроприводу та пневматичних пристроїв. Персонал дільниці проходить спеціальну підготовку для роботи з обладнанням, що працює в умовах підвищених температур та навантажень.

Підвищення технічного рівня дільниці, своєчасна модернізація гільйотинних ножиць, їх приводу та системи керування є запорукою стабільної роботи

підприємства загалом.

1.3 Призначення гільйотинних важільно-планетарних ножиць та їх роль у технологічному процесі

Гільйотинні ножиці призначені для різання металопрокату — заготовок, плит, листів, слябів, прутків — на частини заданої довжини у поперечному або поздовжньому напрямку. Вони широко застосовуються в металургійній промисловості, особливо в цехах первинної обробки металу, таких як блюмінги, слябінги та прокатні стани. У процесі виробництва на Блюмінгу №3 гільйотинні ножиці відіграють ключову роль, забезпечуючи точне, швидке й безпечне розділення розігрітих металевих заготовок, що виходять після прокатки.

Ножиці цього типу дозволяють ефективно здійснювати обрізку кромek, поділ заготовок за розміром, видалення дефектних частин та підготовку продукції до подальших технологічних операцій. Їх використання значно підвищує продуктивність лінії, покращує якість кінцевого продукту, а також забезпечує дотримання технологічних норм і вимог.

Особливістю гільйотинних ножиць, які застосовуються на підприємстві, є наявність потужного електроприводу, що забезпечує високий тиск і швидкість різання, а також систем автоматизації, які синхронізують процес з іншими етапами обробки металу. Надійність та точність роботи гільйотинного обладнання безпосередньо впливає на ритмічність усього виробничого процесу, тому підтримання його у справному стані та модернізація мають суттєве значення для підприємства.

1.4 Задачі керування, вимоги до електропривода й автоматизації

Основною метою при проєктуванні та модернізації електричної схеми ножиць є досягнення вищих технічних, експлуатаційних та економічних показників порівняно з діючими аналогами. Це завдання може бути реалізоване через наступні підходи:

- а)** впровадження нових конструктивних елементів, матеріалів та вузлів з покращеними якісними характеристиками;
- б)** уніфікація вузлів і блоків, що дозволяє стандартизувати виробництво, спростити технічне обслуговування і скоротити час відновлення;
- в)** підвищення надійності в експлуатації та безпеки роботи електричної схеми в цілому;
- г)** зміна конструктивного виконання окремих вузлів для забезпечення можливості використання прогресивних технологій при серійному або масовому виробництві;
- д)** вдосконалення релейно-контакторних пристроїв автоматизованого керування, а також розробка нових систем на основі безконтактної дискретної елементної бази з використанням інтегральних мікросхем.

Вимоги до електропривода механізмів реверсивних станів гарячої прокатки:

- Повторно-короткочасний режим роботи з високою частотою вмикань (приблизно 40% часу протягом години);
- Велика інерційність механізму, що потребує відповідного вибору електродвигуна;

- Робота з упором — вимагає електропривода з механічною характеристикою екскаваторного типу, тобто з великою перевантажувальною здатністю та стабільною роботою при змінному навантаженні.

1.5 Обґрунтування доцільності застосування регулюємого приводу

Тип електродвигуна для приводу механізмів прокатних станів обирається, виходячи з режимів експлуатації та потреби в регулюванні швидкості обертання.

Механізми, що працюють у тривалому режимі без необхідності регулювання швидкості, зазвичай оснащуються асинхронними двигунами змінного струму, які є найбільш економічними та простими в експлуатації.

Для механізмів із повторно-короткочасним режимом роботи без вимог до зміни швидкості можуть використовуватись як двигуни змінного, так і постійного струму. Вибір типу приводу в такому випадку залежить від частоти включень протягом години. Зокрема, асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором мають високі пускові струми, що обмежує допустиму кількість включень через теплові навантаження.

З урахуванням вимог до приводу ножиць — повторно-короткочасний режим, необхідність регулювання швидкості, часті пуски — найоптимальнішим є двигун постійного струму, керований за допомогою тиристорного перетворювача (ТП).

Ця система має низку переваг:

- широкий діапазон регулювання швидкості (до 1:12) без додаткового обладнання;
- високу ефективність: ККД тиристорного перетворювача — 0,95...0,98 (для порівняння: ртутні випрямлячі — 0,8...0,92, електромагнітні перетворювачі — 0,75...0,85);

- низьке падіння напруги на відкритому тиристорі, що сприяє економії електроенергії;
- відсутність обертових частин означає низьке зношування, висока надійність, простота обслуговування;
- практично миттєвий запуск та готовність до роботи.

Таким чином, система ТП – Д (тиристорний перетворювач – двигун постійного струму) повністю відповідає технологічним вимогам приводу ножиць. Функціональна схема електропривода ножиць представлена на рис. 1.5.1

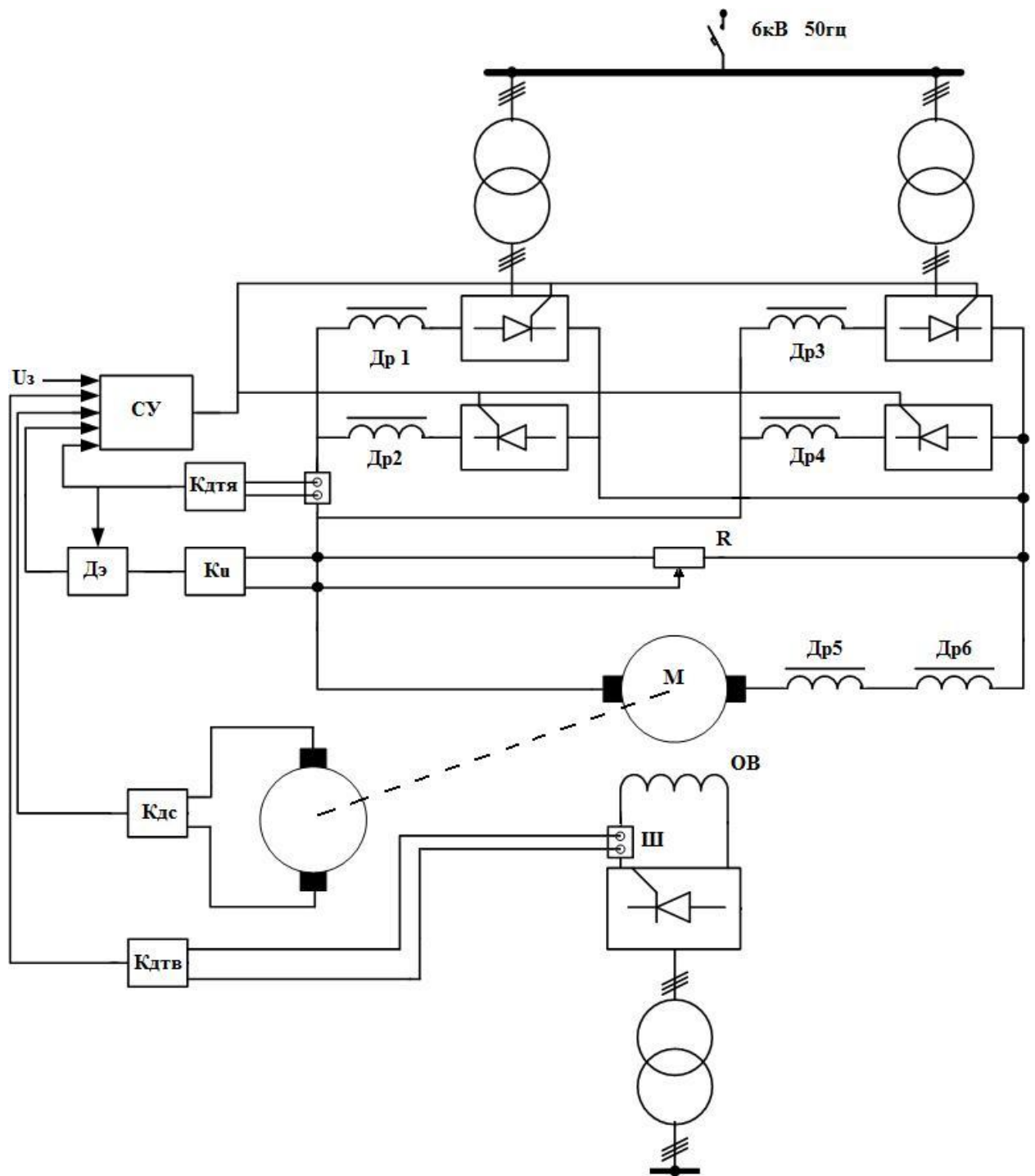


Рис. 1.5.1 - Функціональна схема електропривода ножиць

Розділ 2 КОНСТРУКТОРСЬКО-РОЗРАХУНКОВЕ ОБГРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОГО

ОБЛАДНАННЯ НОЖИЦЬ ЛЕТЮЧИХ ВАЖІЛЬНО-ПЛАНЕТАРНИХ

2.1 Розрахунок потужності і вибір електроприводу

Для визначення параметрів електропривода, зокрема потужності та швидкості обертання двигунів, необхідно виконати розрахунок зусиль і крутних моментів, які виникають у механізмах під час роботи ножиць.

Визначення зусилля різання:

Зусилля різання, необхідне для відокремлення заготовки, з інженерною точністю можна визначити за формулою:

$$P = \tau \times a$$

де:

a — площа поперечного перерізу металу, що підлягає розрізанню, мм²;

τ — **питомий опір різанню**, Н/мм², величина якого залежить від **відносної глибини порізу**.

Ідеальне значення τ визначається **експериментальним шляхом** і подається у вигляді **графічної залежності** (кривих) відносно параметра ε — відносної глибини різання.

$$E = \frac{h_0 - h}{h_0}$$

h_0 — початкова товщина металу перед розрізанням, мм;

h — поточна товщина металу в момент різання, мм;

$h_0 - h$ — глибина порізу, мм.

Для уточнення зусилля різання доцільно виразити його залежність від кута повороту кривошипа ножиць. З цією метою встановлюється функціональний зв'язок між кутом повороту та відотною глибиною різання.

Кінематичні елементи зв'язків для ножиців з нижнім різом, схематично показані на рис.2.1.

Рівняння переміщення ножів у такій системі має вигляд:

$$x = r(1 + \cos \alpha) + l(1 - \cos \beta)$$

Відстань між ножами:

$$h = 2r - x - h_n$$

де:

$h_n = 15$ мм – перекриття ножів.

$$h = r(1 + \cos \alpha) - l(1 - \cos \beta) - h_n$$

Тоді:

$$l \sin \beta = r \sin \alpha$$
$$l(1 - \cos \beta) = l \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{r}{l}\right)^2 \cdot \sin^2 \alpha} \right]$$

Враховуючи, що для ножиць з нижнім різом $\left(\frac{r}{l}\right) \leq 0,1$, можна приблизно прийняти:

Враховуючи, що для ножиць з нижнім різом значення $\left(\frac{r}{l}\right) \leq 0,1$, у розрахунках допустимо наближено прийняти спрощене рівняння кінематичного зв'язку у вигляді:

$$1 - \left(\frac{r}{l}\right)^2 \times \sin^2 \alpha \approx r \left(\frac{1}{2} \times \frac{r}{l} \times \sin^2 \alpha\right)$$

З цього маємо:

$$l(1 - \cos \beta) \approx r \left(\frac{1}{2} \times \frac{r}{l} \times \sin^2 \alpha\right)$$

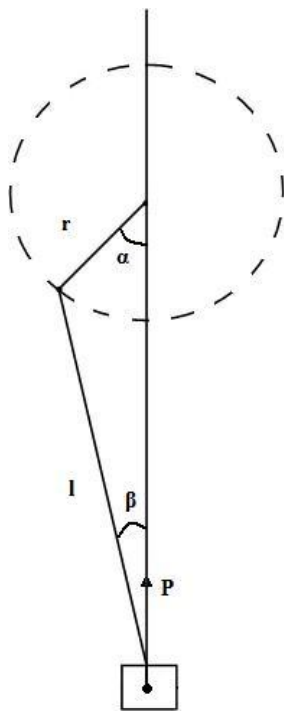


Рис 2.1 - Кінематичні елементи зв'язків для ножиць

Враховуючи кінематичні зв'язки, рівняння набуває спрощеного вигляду:

$$h = r \left(1 + \cos \alpha - 0,5 \frac{r}{l} \times \sin^2 \alpha \right) - h_n$$

У практичних розрахунках для визначення потужності електродвигуна ножиць, замість точного рівняння, часто використовують спрощену формулу:

$$h = r(1 + \cos \alpha) - h_n$$

де:

r - радіус кривошипа, мм;

h - відстань між ріжучими кромками ножів, мм;

Приймаємо:

$r = 250$ мм (відповідно до заданих умов);

Залежність поточної товщини металу h , що розрізається, від кута повороту кривошипа визначається на основі кінематичної схеми механізму та виражається рівнянням:

$$h = 0,25(1 + \cos 78^\circ) - 0,015 = 0,287 \text{ м}$$

Відносна глибину порізу:

$$E = \frac{h_0 - h}{h_0} = 0,045$$

Оскільки значення питомого опору різанню τ залежить від матеріалу заготовки, температури та відносної глибини різання, на підставі стандартних табличних даних приймаємо:

$$\tau = 13,85 \text{ Н/мм}^2$$

Підставляючи дані у формули, розраховуємо зусилля різання:

$$P = \tau \times a = 13,85 \times 300 \times 300 = 1246,5 \text{ Н}$$

Для визначення статичного моменту опору, який виникає на валу електродвигуна ножиць під час різання, доцільно скористатися наступною залежністю:

$$M_{c\omega} = \frac{PV}{\eta}$$

де:

M_c — статичний момент опору, Н·м;

P — зусилля різання, Н;

V — лінійна швидкість переміщення ножа, м/с;

η — ККД механічної передачі;

ω — кутова швидкість обертання вала, рад/с.

$$M_c = \frac{PV}{\eta\omega}$$

Переходячи до кутової швидкості на валу ножиців:

$$\omega_B = \frac{\omega}{i}$$

де:

i - передаточне число редуктора.

Враховуючи це, момент навантаження на валу електродвигуна ножиць буде:

$$M_c = \frac{1}{ni} \times \frac{PV}{\eta\omega}$$

Оскільки лінійна швидкість переміщення ножів V та кутова швидкість обертання вала ω_v дорівнюють похідним від переміщення ножів x та кута повороту вала ножиць α за часом), отримаємо:

$$M_c = \frac{P}{ni} \times \frac{dx}{d\alpha}$$

Згідно з кінематичними елементами зв'язків механізму ножиць, переміщення ножів x виражається як функція кута повороту кривошипа α . Таким чином, похідна від переміщення по куту повороту має вигляд:

$$\frac{dx}{d\alpha} = r \times \sin \alpha + l \sin \beta \times \frac{d\beta}{d\alpha}$$

На підставі отриманих кінематичних залежностей, рівняння може бути спрощене:

$$\frac{dx}{d\alpha} = r \times \sin \alpha \left[1 + \frac{r}{l} \times \frac{\cos \alpha}{\cos \beta} \left(\frac{d(l \sin \beta)}{d(r \sin \alpha)} \right) \right]$$

Враховуючи, що $\frac{r}{l} \frac{\cos \alpha}{\cos \beta} \leq 0,1$, з урахуванням $\frac{r}{l} \leq 0,1$ та $\left| \frac{\cos \alpha}{\cos \beta} \right| \leq 1$, а обертання у квадратних дужках дорівнює одиниці, у розрахунках потужності ЕП ножиців замість можна застосувати:

$$\frac{dx}{d\alpha} = r \sin \alpha$$

При цьому статичний момент знаходимо за формулою:

$$M_c = \frac{P \times r \times \sin \alpha}{ni} = 418,7 \text{ кН} \times \text{м}$$

Попередньо, для уточнення потужності електродвигуна ножиць, доцільно визначити середнє значення потужності для всього сортаменту заготовок, що обробляються.

У якості розрахункового приймається той випадок, для якого ця середня потужність виявляється максимальною, тобто є найбільш навантаженим режимом роботи приводу.

Робота пуску та гальмування приводу визначається через кінетичну енергію обертової системи за формулою:

$$A_{п.г} = 2J \frac{\omega_{xx}^2}{2} = 715,8 \text{ кН} \times \text{м}$$

J - момент інерції обертових частин, $\text{Н} \times \text{м}$;

ω_{xx} - кутова частота обертів, рад/с;

Момент інерції системи орієнтовно:

$$J_{\Sigma} = 1,5 \cdot J_H$$

J_H - момент інерції механізму ножиць, наведений до вала електродвигуна.

Робота, що витрачається безпосередньо на різання металу, визначається за формулою:

$$A_{рез} = \frac{P \times h_0 \times a}{\eta}$$

$$a = \int_0^{E_{отр}} \tau dE = 12,88$$

$$A_{рез} = \frac{100 \times 0,3 \times 12,88}{0,73} = 6616 \text{ кН} \times \text{м}$$

Робота, що витрачається під час холостого ходу механізму ножиць, є відносно незначною і може бути орієнтовно визначена за спрощеним виразом:

$$A_{xx} = 2\pi \times M_{xx} = 263,7 \text{ кН} \times \text{м}$$

де момент холостого ходу приймають рівним:

$$M_{xx} = (0,07 - 0,1)M_H = 42 \text{ кН} \times \text{м}$$

При заданій частоті різання $z = 10$ циклів за хвилину, повна тривалість одного циклу роботи ножиць становитиме:

$$t_y = \frac{60}{z} = 6 \text{ с}$$

Середня потужність, необхідна для забезпечення повного робочого циклу ножиць, визначається як:

$$P_{cp} = \frac{A_{п.т} + A_{рез} + A_{хх}}{t_y} \times 70^{-3} = 1300 \text{ кВт}$$

У системі керування ножицями (наприклад, за допомогою регулятора струму) забезпечується стабільність робочого моменту електродвигуна в усіх фазах роботи: пуску, різанні, гальмуванні. Величина цього моменту становить λ ,

де:

λ - коефіцієнт перевантаження (стислість робочого моменту).

Для забезпечення нормального теплового режиму роботи двигуна необхідно виконання умови:

$$M_H \geq M_t$$

$$M_H \geq M_{cp} \times \lambda \left(\frac{\omega_{хх}}{\omega_H} \right)^2$$

Беручи до уваги, що $\lambda = \lambda_H \times \frac{\omega_{хх}}{\omega_H}$

де:

Коефіцієнт λ — стислість робочого моменту, що характеризує відношення робочого моменту до номінального моменту електродвигуна:

$$M_H \geq \lambda_H \times M_{cp} \frac{\omega_{хх}}{\omega_H}$$

Значення λ_H зазвичай приймається в межах 1,3 – 1,7.

Згідно з:

$$M_H \times \omega_H \geq \lambda_H \times M_{cp} \times \omega_{хх} > \lambda_H (M \times \omega)_{cp}$$

Потужність електродвигуна ножиць повинна забезпечувати стійку роботу у всіх режимах навантаження та визначається з урахуванням наступної нерівності:

$$P_H > \lambda_H P_{cp}$$

Враховуючи, що методика розрахунку має орієнтовний характер і не передбачає високої точності через складність реальних умов роботи, потужність електродвигуна доцільно вибирати з запасом близько 25%:

З урахуванням усіх поправочних коефіцієнтів, включаючи запас на перевантаження, остаточна формула для визначення необхідної потужності електродвигуна ножиць матиме вигляд:

$$P_n > 1,25\lambda_n \times P_{cp} = 1,25 \times 1,5 \times 1300 = 2437,5 \text{ кВт}$$

Система тиристорний перетворювач – двигун постійного струму (ТП–Д) має низку конструктивних і функціональних переваг, що визначають її доцільність для застосування у приводі ножиць:

Вибір двигуна:

Підбір двигуна постійного струму для приводу летючих ножиць здійснюється на підставі попередніх інженерних розрахунків потужності, а також з урахуванням кінематичних характеристик і динамічного навантаження, що виникає під час роботи вузлів механізму. Обране електроустаткування повинно забезпечувати стабільну роботу ріжучого обладнання в умовах високих механічних і температурних впливів.

У даному випадку доцільним є використання двигуна типу П24/160–2,5, що має наступні технічні параметри:

Основні технічні параметри двигуна:

- Номінальна напруга живлення: 660 В;
- Електрорушійна сила: 528 В;
- Номінальна потужність: 2500 кВт;
- Номінальна частота обертання вала: 23 об/хв;
- Кутова швидкість: 2,4 рад/с;
- Номінальний струм: 4275 А;
- Струм при випробуваннях: 368 А;
- Номінальний момент на валу: 1042 кН·м.

Електричні параметри обмоток:

- Повний опір якоря: 0,0165 Ом;
- Опір обмотки збудження: 0,19 Ом;
- Опір колекторного кола: 0,0058 Ом;
- Опір короткозамкненого кола: 0,0052 Ом;
- Додатковий опір (перехідний): 0,00133 Ом.

Механічні дані:

- Маса якоря: 945 кг;
- Падіння напруги на щітковому вузлі: 2 В;
- Кількість пар полюсів: 7 ($2p = 14$).

2.2 Вибір тиристорного перетворювача

Для ефективної роботи електропривода ножиць необхідно підібрати тиристорний перетворювач, параметри якого будуть узгоджені з характеристиками електродвигуна. Основними критеріями при виборі є:

Вихідна напруга перетворювача повинна бути не нижчою за номінальну напругу двигуна:

$$U_{dн} \geq U_n$$

Вихідний струм перетворювача має бути не меншим за номінальний струм якоря двигуна:

$$I_{dн} \geq I_{я.н}$$

Виходячи з розрахункової потужності приводу та необхідності забезпечити реверсивність руху, було обрано дванадцятипульсний реверсивний тиристорний перетворювач, постачання якого передбачає наявність вбудованого силового трансформатора.

Обраний тип — КТЕ 6300/660 0121-01-П У4, який має наступні характеристики:

- Номінальний вихідний струм: 6300 А;
- Номінальна випрямлена напруга: 660 В;
- Максимально допустимий струм: 12600 А;
- Коефіцієнт пульсацій: 72.

До складу комплекту входять:

- струмообмежуючий реактор,
- згладжуючий дросель, що дозволяє значно зменшити амплітуду пульсацій і забезпечити стабільність живлення двигуна при змінних навантаженнях.

Для забезпечення стабільної роботи електропривода ножиць з урахуванням високої потужності двигуна, тиристорний перетворювач КТЕ 6300/660 01-П У4 укомплектовується додатковими елементами згладжування та обмеження струму, які є критичними для зниження пульсацій та динамічного навантаження на ланцюг живлення.

Параметри реактора ТРОС – 1600:

Технічні характеристики струмообмежуючого реактора (ТРОС–1600):

- Ноомінальний струм: 2500 А
- Активні втрати потужності: 13,6 кВт
- Індуктивність: 0,8 мГн
- Опір: $2,18 \times 10^{-3}$ Ом

Характеристики згладжуючого дроселя (ФРОСЗ–5000):

- Номінальний струм: 500 кА
- Потужність втрат: 6 кВт
- Індуктивність: 0,32 мГн
- Опір: $0,24 \times 10^{-3}$ Ом

2.3 Вибір силового трансформатора

Для живлення тиристорного перетворювача обрано трансформатор типу ТМПД 5000/10–У2, який відповідає як по потужності, так і по вторинній напрузі, необхідній для коректної роботи перетворювального устаткування.

Технічні характеристики трансформатора:

- Вторинна лінійна напруга: 660 В
- Номінальний струм вторинної обмотки: 6300 А
- Первинна лінійна напруга: 6 кВ
- Вторинна фазна напруга: 577 В
- Потужність короткого замикання: 17 МВА
- Схема з'єднання: $\Delta/\Delta - 0$, група зсуву — 11
- Напруга холостого ходу ($U_{до}$): 780 В
- Повна потужність: 2570 кВА
- Фазні струми:
 - $I_{1\text{нф}} = 247 \text{ А}$
 - $I_{2\text{нф}} = 1484 \text{ А}$
- Відносна напруга короткого замикання:
 - $e_k = 0,072 \text{ од.}$
 - $e_{k.c} = 0,087 \text{ од.}$
- Активний опір вторинного кола: $R_t = 0,00248 \text{ Ом}$
- Еквівалентна індуктивність обмотки: $L_a = 0,107 \times 10^{-3} \text{ Гн}$
- Електричний опір: $R_{\Sigma} = 0,0108 \text{ Ом}$

Принципова схема силової частини ЕП зображена на рис. 2.3

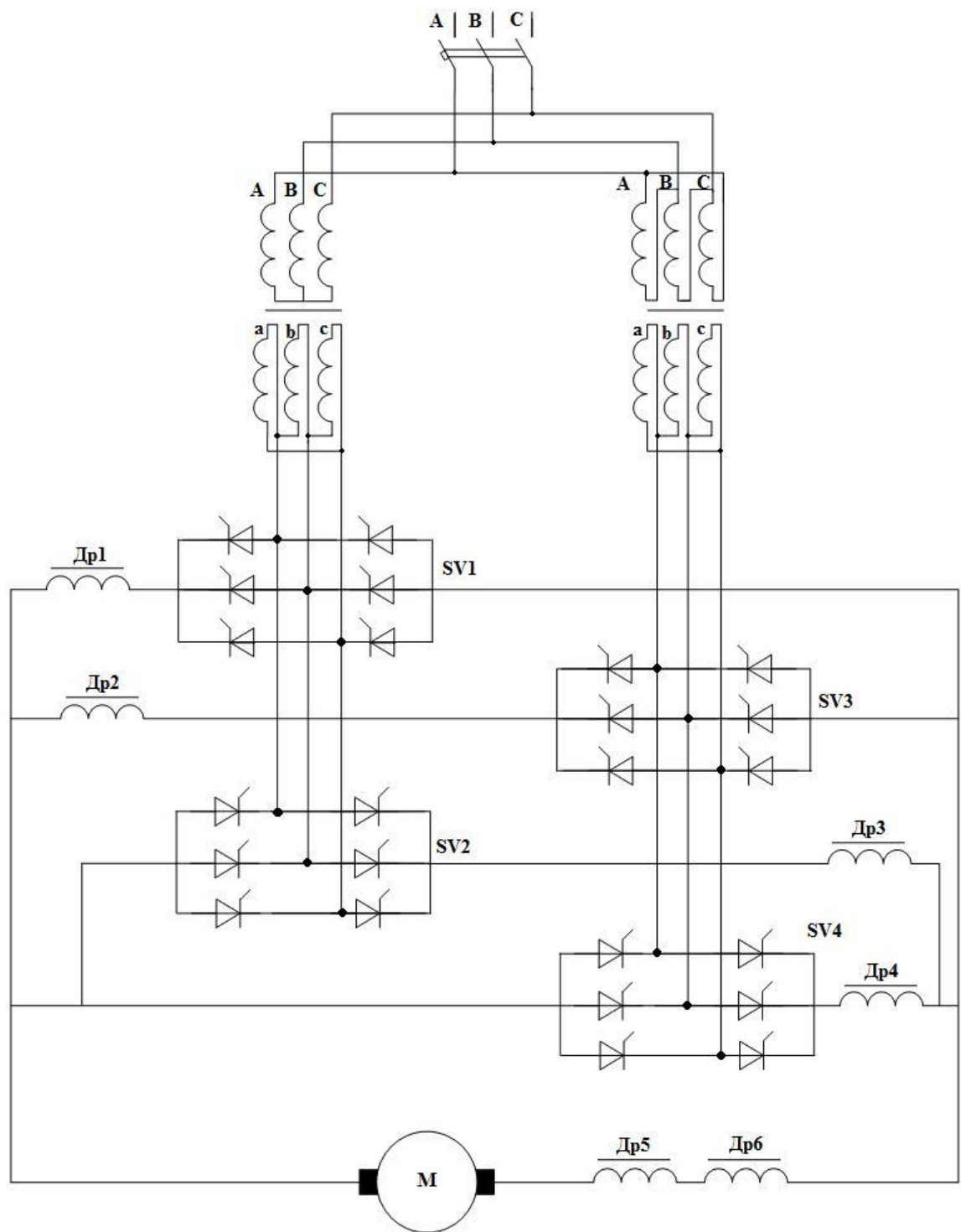


Рис 2.3 - Принципова схема силової частини ЕП

2.4 Складання схеми заміщення, математичний опис і розрахунок швидкісної й механічної характеристик

Після завершення вибору всіх основних елементів силової частини електропривода — а саме:

- електродвигуна,
- тиристорного перетворювача,
- понижувального трансформатора,
- реактора,
- згладжуючого дроселя

необхідно перейти до розрахунків незмінної (статичної) частини ЕП, що працює в складі приводу ножиць.

Відповідно до принципової схеми, складається еквівалентна схема заміщення електропривода постійного струму в системі ТП–Д, яка враховує основні параметри кожної складової. Еквівалентна схема для механізму ножиць наведена на рис. 2.4.

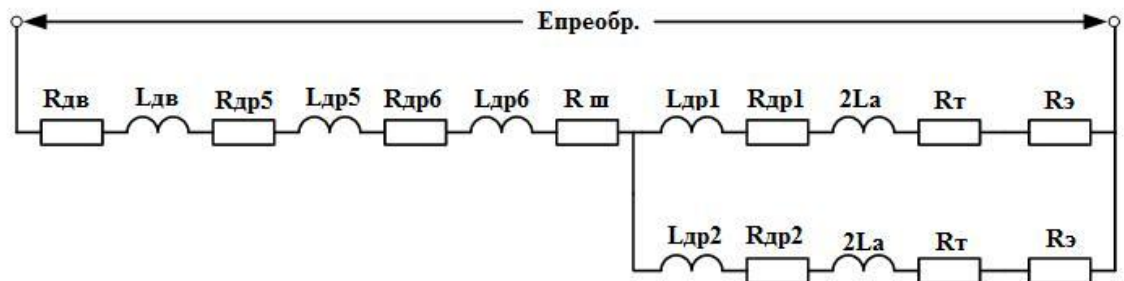


Рис 2.4 - Еквівалентна схема заміщення електропривода (ЕП) в системі ТП–Д

На основі представленої схеми заміщення визначаються електричні параметри приводу.

Еквівалентний опір всієї системи тиристорного електропривода (ТП–Д), з урахуванням опору окремих її елементів, визначається за виразом:

$$R_{\text{екв}} = R_{\text{дв}} + \frac{R_e}{2} + \frac{R_{\text{д1}}}{2} + 2R_{\text{др2}} + \frac{R_m}{2} + R_{\text{ш}} + 2R_{\text{к}}$$

де:

$R_{\text{дв}}$ - опір якорного ланцюга електроодвигуна, Ом;

R_e - опір випрямляючого ланцюга, який враховує еквівалентне комутаційне падіння реактора напруги, Ом;

$R_{\text{д1}}$ - активний опір ТРОС 1600, Ом;

$R_{\text{др}}$ - активний опір згладжуючого дроселя ФРОС 3 – 5000, Ом;

R_m - активний опір трансформатора, приведений до ланцюга випрямленого струму, Ом;

$R_{\text{ш}}$ - опір підвідних шин двигуна дорівнює:

$$R_{\text{ш}} = (1 + 0,004(tp - 15^\circ)) \times \frac{\rho l}{S} = 0,34 \times 10^{-3} \text{ Ом}$$

при $tp = 40^\circ \text{ C}$, $S = 4(10 \times 120)$; $l = 50 \text{ м}$; $\rho = 1/34$;

$R_{\text{к}}$ - активний опір підвідних проводів трансформатора на одну фазу, Ом.

$$R_{\text{к}} = \rho \times \frac{lk}{S} = \frac{1}{20} \times \frac{20}{1480} = 0,4 \times 10^{-3} \text{ Ом}$$

Після урахування всіх елементів силової частини електропривода, загальний еквівалентний опір системи ТП–Д для механізму ножиць визначається як:

$$\begin{aligned} R_{\text{екв}} &= R_{\text{дв}} + \frac{R_e}{2} + \frac{R_{\text{д1}}}{2} + 2R_{\text{др2}} + \frac{R_m}{2} + R_{\text{ш}} + 2R_{\text{к}} \\ &= 0,0153 + 0,0054 + \frac{0,00218}{2} + 2 \times 0,24 \times 10^{-3} + \frac{0,00248}{2} \\ &\quad + 0,34 \times 10^{-3} + 2 \times 0,4 \times 10^{-3} = 0,025 \text{ Ом} \end{aligned}$$

Інші значення опорів (опір обмотки якоря, дроселя, трансформатора тощо) приймаються згідно з паспортними даними відповідного електроустаткування.

$$L_{\text{екв}} = L_{\text{дв}} + L_a + \frac{L_{\text{др1}}}{2} + 2L_{\text{др2}}$$

де:

$L_{\text{дв}}$ - індуктивний опір двигуна;

$$L_{\text{ДВ}} = \frac{\kappa \times U_n \times 30}{I_n \times \pi \times \rho \times n_n} = 0,97 \times 10^{-3} \text{ Гн}$$

$L_{\text{Др1}}$ - індуктивність реактора, Гн;

$L_{\text{Др2}}$ - індуктивність згладжуючого дроселя ФРОС 3 – 5000, Гн;

L_a - індуктивність розсіювання трансформатора, з урахуванням мережі, приведена до однієї фази, Гн.

Таким чином, остаточний вираз для загальної індуктивності якірного ланцюга виглядає так:

$$L_a = \frac{I_{\text{кс}}}{\omega c} \times \frac{U_{2\text{фн}}}{I_{2\text{фн}}} = 0,107 \text{ мГн}$$

Еквівалентна індуктивність якірного ланцюга електропривода системи ТП–Д визначається як сумарна індуктивність усіх активних елементів ланцюга, приведених до одного електричного рівня:

$$\begin{aligned} L_{\text{экв}} = L_{\text{ДВ}} + L_a + \frac{L_{\text{Др1}}}{2} + 2L_{\text{Др2}} &= 0,92 \times 10^{-3} + 0,107 \times 10^{-3} + \frac{0,8 \times 10^{-3}}{2} + \\ &+ 2 \times 0,32 \times 10^{-3} = 2,07 \text{ мГн}; \end{aligned}$$

Номінальний коефіцієнт потоку збудження електродвигуна визначає зв'язок між магнітним потоком у якірному колі та струмом збудження, і є важливим параметром для розрахунку електромеханічної характеристики двигуна постійного струму.

Цей коефіцієнт приймається за паспортними даними двигуна або визначається за допомогою формули:

$$\kappa_{\text{Фн}} = \frac{U_n}{\omega_n} - \frac{I_n R_n}{\omega} = 245,6$$

Електромагнітна стала часу характеризує інерційність електромагнітного процесу в якорному колі двигуна та визначає швидкість встановлення струму при зміні напруги.

Розраховується за формулою:

$$T_e = \frac{Le}{Re} = \frac{2,07 \times 10^{-3}}{0,025} = 0,084 \text{ с}$$

Електромеханічна стала часу характеризує інерційність механічної частини системи та визначає швидкість зміни частоти обертання вала при прикладенні обертового моменту.

Розраховується за формулою:

$$T_M = J\varepsilon \frac{Re}{(k\Phi_H)^2} = 83750 \frac{0,025}{245,6^2} = 0,034 \text{ с}$$

2.5 Аналіз і розрахунок механічних та швидкісних характеристик системи ТП–Д

Для забезпечення оптимального режиму роботи електропривода та його ефективного використання в процесі прокатки, необхідно здійснити аналітичне дослідження механічної та швидкісної характеристик електроприводної системи типу тиристорний перетворювач – двигун постійного струму (ТП–Д).

Залежності швидкості та моменту електропривода в умовах розімкненого регулювання описують так:

$$\omega = \frac{U_{dm} \times \cos a}{k\Phi_H} - \frac{I_H Re}{k\Phi_H}$$

$$\omega = \frac{U_{dm} \times \cos a}{k\Phi_H} - \frac{M_H Re}{k\Phi_H}$$

. Розрахунок швидкості вала в умовах ідеального холостого режиму здійснюється за формулою:

$$\omega_{op} = \frac{U_{dm} \times \cos a}{k\Phi_H} = \frac{780 \times 0,846}{245,6} = 2,69 \text{ с}$$

$$\text{де } \cos \alpha = \frac{U_H}{U_{dm}} = \frac{660}{780} = 0,846.$$

Максимально допустиму задаючу напругу для забезпечення номінальної швидкості при відсутності навантаження визначають за наступним виразом:

$$U_{z \max} \times K_{np} \times K_{\partial v} = \omega_{op}, \text{ де } K_{np} = 71$$

$$K_{\partial v} = \frac{1}{k\Phi_H} = 0,00407$$

Підставивши дані отримаємо:

$$U_{3\max} = \frac{\omega_{op}}{K_{mn} \times K_{\partial v}} = \frac{2,69}{71 \times 0,004} = 9,3(\text{В})$$

Кут управління α дорівнює:

$$\alpha = \arccos\left(\frac{U_H}{U_{dm}}\right) = 32,3^\circ$$

Змінивши кут керування будемо статичні характеристики в умовах розімкнутої системи.

Будемо характеристики по двом точкам:

при $I = 0$ та при $I_H = 4275 \text{ А}$

при $M = 0$ та при $M_H = k\Phi_H \times I_H = 1042 \text{ кН} \times \text{м}$

при $\alpha = 32,3^\circ$ $\omega_{op} = 2,69$ $\omega_1 = 2,261$

при $\alpha = 50^\circ$ $\omega_{op2} = 2,04$ $\omega_2 = 1,16$

при $\alpha = 60^\circ$ $\omega_{op3} = 1,58$ $\omega_3 = 1,15$

при $\alpha = 70^\circ$ $\omega_{op4} = 1,08$ $\omega_4 = 0,65$

Просідання швидкості знаходимо з:

$$\Delta\omega_p = \frac{I_H Re}{k\Phi_H} = \frac{4275 \times 0,0247}{245,6} = 0,43 \text{ с}$$

Статизм розімкнутої системи знаходимо за формулою:

$$\Delta p_c = \frac{\Delta\omega_p}{\omega_{op}} = \frac{0,43}{2,69} \times 100\% = 116\%$$

Розраховуємо механічні характеристики системи аналогічно швидкісним.

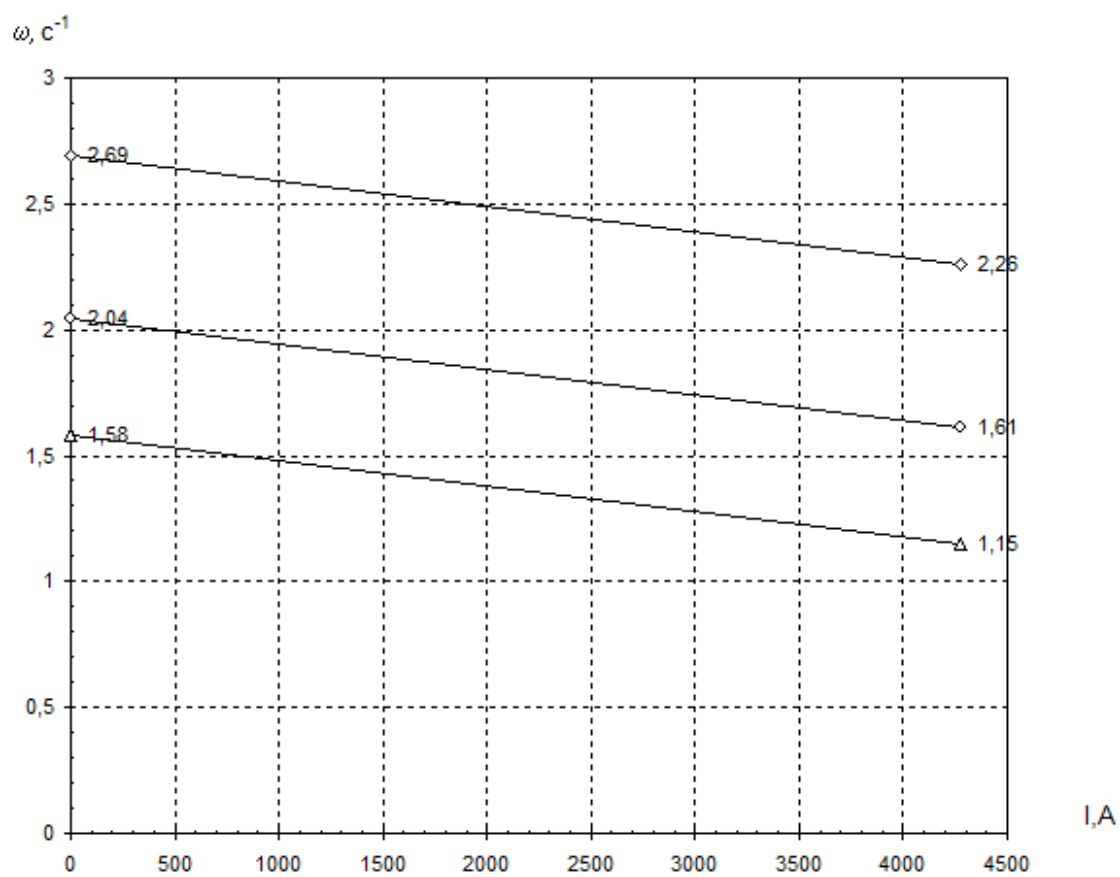


Рис 2.4 - Швидкісні характеристики розімкнутої системи ЕП

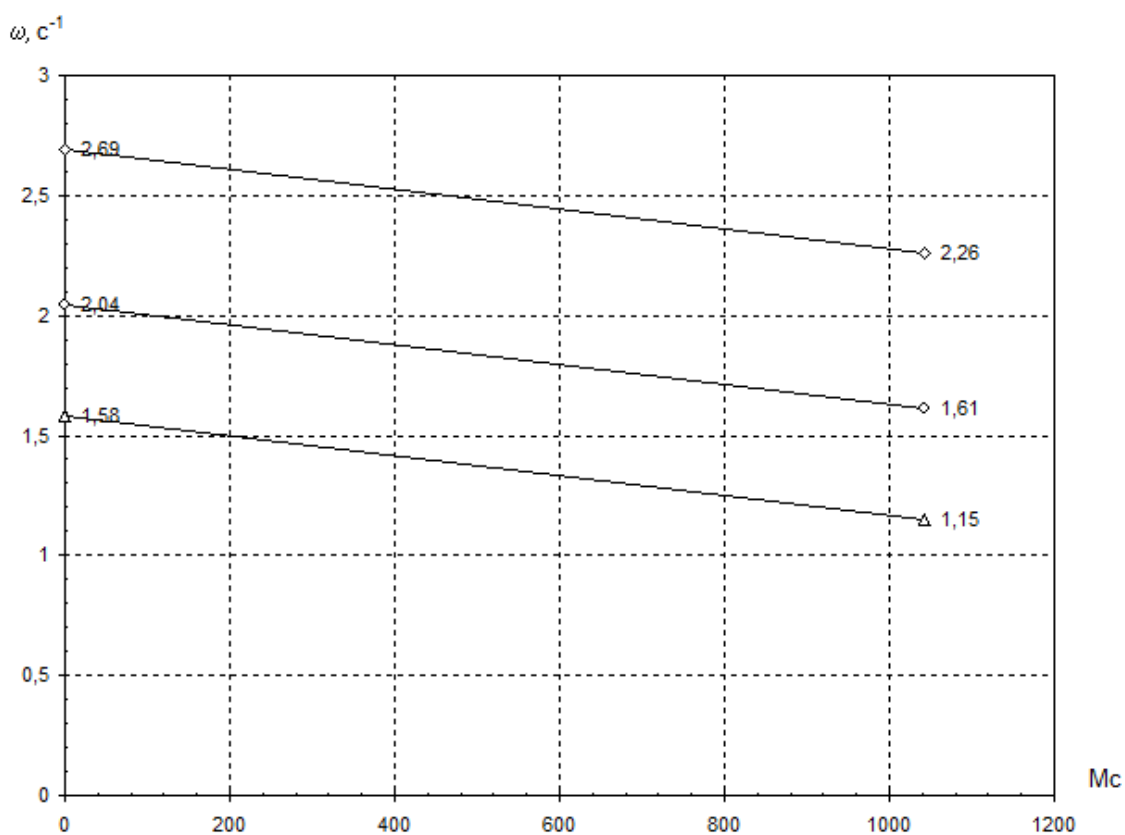


Рис 2.5 - Механічні характеристики розімкнутої системи ЕП

РОЗДІЛ 3. ОБҐРУНТУВАННЯ, ВИБІР І ДОСЛІДЖЕННЯ ЯКІСНИХ ПОКАЗНИКІВ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ.

3.1 Виір структури САК ЕП, складання передаточної функції

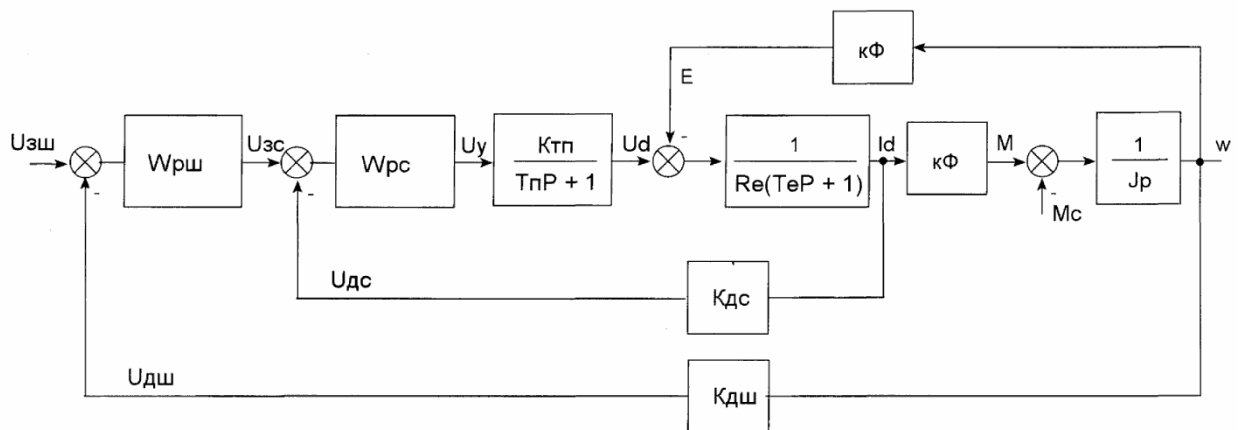


Рис 3.1 - Структурна схема електропривода за системою ТП-Д з регулятором швидкості.

3.2. Розрахунок замкнутої системи за схемою із загальним суматором

3.2.1. Розрахунок жорсткого зворотного зв'язку по швидкості

Структурна схема для розрахунку системи приведена на рис.3.2

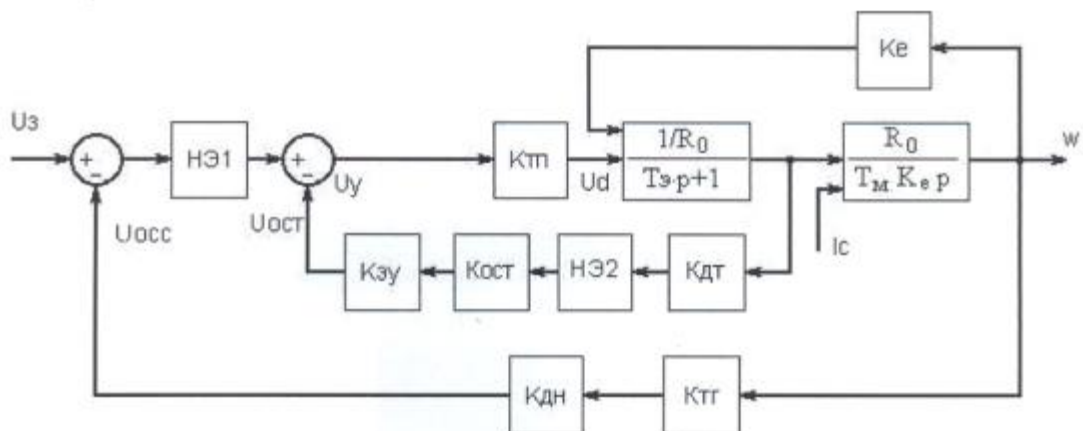


Рис 3.2 - Структурна схема системи з загальним суматором

Для побудови системи стабілізації швидкості в електроприводі типу тиристорний перетворювач – двигун постійного струму необхідно визначити параметри жорсткого зворотного зв'язку, що дозволяють забезпечити допустиме відхилення заданої швидкості у межах 6% при коефіцієнті охоплення $D = 9$.

У якості вимірювального елементу використовується тахогенератор постійного струму типу ПТ-42, який має наступні характеристики:

- Номінальна частота обертання: 100 об/хв
- Номінальна вихідна напруга: 230 В

Коефіцієнт підсилення тахогенератора:

$$K_{тг} = \frac{\Delta U_{г}}{\Delta \omega_{тг}} = \frac{U_{нн}}{\omega_{нтг}} = \frac{230 \times 30}{3,14 \times 100} = 21,975 \frac{\text{В} \times \text{с}}{\text{рад}}$$

Необхідний коефіцієнт підсилення системи:

$$K_{треб} = K_{тп} \times K_{\partial} \times K_{тг} \times K_{\partial н}$$

$$K_{треб} = \frac{\Delta p \times D}{\Delta^* p} - 1 = \frac{16,9}{3,5} = 41,14$$

Коефіцієнт підсилення тиристорного перетворювача:

$$K_{тп} = \frac{U_{дн}}{U_{ун}} = \frac{577}{10} = 57,7$$

Коефіцієнт підсилення датчика напруги:

$$K_{\partial н} = \frac{K_{треб}}{K_{тп} \times K_{\partial} \times K_{тг}} = \frac{41,14}{57,7 \times 4,036 \times 10^{-3} \times 21,975} = 8,039$$

У зв'язку з тим, що розрахункове значення коефіцієнта підсилення датчика напруги перевищує одиницю, в ланцюг між виходом тиристорного перетворювача та наступним елементом регулювання вводиться додатковий підсилювальний каскад.

$$K_{эу} = 10$$

$$K_{треб} = K_{тп} \times K_{\partial} \times K_{тг} \times K_{\partial н} \times K_{эу} = 41,14$$

$$K_{\partial н} = 0,8039$$

Визначимо коефіцієнт підсилення замкненої системи по керуючому впливу:

$$K_3^{yB} = \frac{\omega 0}{U_{ззам}} = \frac{K_{mn} \times K_{\partial} \times K_{\varepsilon y}}{1 + K_{mn} \times K_{\partial} \times K_{\varepsilon y} \times K_{m\Gamma} \times K_{\partial n}} = 0,055$$

Напруга завдання розімкнутої системи:

$$U_{ззам} = \frac{\omega 0}{K_{mn} \times K_{\partial} \times K_{\varepsilon y}} = \frac{3,148}{2,328772} = 1,35 \text{ В}$$

Напруга завдання замкненої системи:

$$U_{ззам} = \frac{\omega 0}{K_3^{yB}} = \frac{3,148}{0,055} = 57,23 \text{ В}$$

Коефіцієнт форсування по напрузі:

$$K_{\text{форс}} = \frac{U_{ззам}}{U_{зраз}} = \frac{57,23}{1,35} = 42,39 \text{ В}$$

Таким чином, рівень форсування у сумуючому вузлі перевищує допустиме значення і досягає коефіцієнта близько 43. Враховуючи, що згідно з технічними вимогами гранично допустиме форсування складає лише 2, необхідно впровадити технічні рішення для обмеження цього параметра.

Методика обмеження форсування в замкненій системі керування

Один з найпростіших і ефективних способів зниження надмірного форсування в контурі зворотного зв'язку полягає у використанні нелінійних елементів захисту, зокрема стабілітронів, що підключаються паралельно до сумуючого вузла.

Вибір напруги пробією стабілітронів здійснюється відповідно до умови:

$$U_{\text{упр max}} \leq U_{зраз} \times K_{\text{форсдоп}} = 1,35 \times 2 = 2,7 \text{ В}$$

З урахуванням отриманих розрахункових значень доцільним є застосування двох стабілітронів типу КС147А, кожен з яких має напругу пробією 3В. Обрані елементи забезпечують надійне обмеження напруги на сумуючому вузлі в рамках допустимих меж.

Статичний розрахунок струмового захисту (відсічки)

Для аналізу режимів роботи системи тиристорний перетворювач – двигун постійного струму (ТП–Д) виконується розрахунок струмового обмеження в умовах наявності негативного зворотного зв'язку по струму і швидкості. Такий підхід дозволяє підвищити точність регулювання та забезпечити захист силових елементів від перевантаження.

Як вимірювальний елемент у системі контролю струму використовується датчик активного типу, в конструкції якого передбачено точний вимірювальний шунт, що дозволяє формувати пропорційний сигнал струму навантаження.

Структурне виконання та принцип дії

Схема підключення та загальний вигляд датчика представлено на рис.3.3. Сигнал, сформований на шунті, надходить на схему обробки й виконує роль вхідної величини для пристрою захисту, який формує команду на відключення або обмеження живлення у разі перевищення допустимого рівня струму.

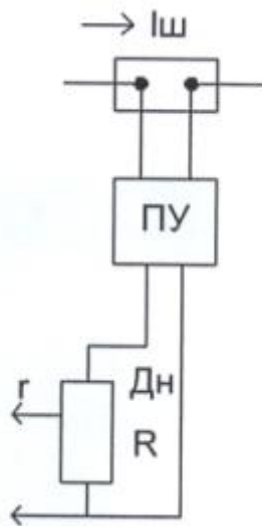


Рис 3.3 - Загальний вигляд датчика струму

$$I_{нш} = 6000A$$

$$U_{нш} = 75mV$$

Проміжний підсилювач з $K_{уш} = 100$

$$K_{ш} = \frac{\Delta U_{ш}}{\Delta I_{ш}} = \frac{U_{нш}}{I_{нш}} = 1,25 \times 10^{-5}$$

Знайдемо коефіцієнт підсилення датчика струму:

$$K_{дт} = K_{ш} \times K_{у} \times K_{дн};$$

$$K_{дт} = \frac{U_a}{I_{max}} = \frac{10}{8550} = 1,169 \times 10^{-3}$$

Вибираємо струм відсічки та струм упору:

$$I_{отс} = 1,2 \times I_{н} = 5,13 \times 10^3$$

$$I_{у} = I_{max} = 2 \times I_{н} = 8550 \text{ A}$$

Уставка нечутливості нелінійного елемента, скомутованого на вході датчика струму:

$$U_0 = I_{отс} \times K_{дт} = 5,13 \times 10^3 \times 1,169 \times 10^{-3} = 8,7 \approx 9 \text{ В}$$

Захист від перенапруги реалізується шляхом підключення двох стабілітронів, з'єднаних зустрічно-паралельно, кожен з яких має пробивну напругу 9В. Така схема дозволяє ефективно обмежити рівень зворотної напруги в момент екстреного гальмування.

У режимі раптового стопоріння приводу, що відбувається при екстреній зупинці з максимальної швидкості, на виході тиристорного перетворювача залишається певне залишкове значення напруги, яке необхідно врахувати при розрахунках захисних пристроїв:

$$U_{осттп} = I_{у} \times R_{э} = 8550 \times 0,025 = 213,75 \text{ В}$$

Напруга на вході електронного підсилювача:

$$U_{уост} = \frac{U_{осттп}}{K_{тп} \times K_{еу}} = \frac{213,75}{57,7 \times 10} = 0,37 \text{ В}$$

Необхідний максимальний сигнал при упорі з максимальною швидкістю:

$$U_{ост} = U_{упр \max} - U_{уост} = 2,7 - 0,37 = 2,33 \text{ В}$$

Приріст виходу датчика струму в період дії струмової відсічки:

$$\Delta U_{дт} = (I_{у} - I_{отс}) \times K_{дт} = (8550 - 5,13 \times 10^3) \times 1,169 \times 10^{-3} = 4 \text{ В}$$

Необхідний $K_{ост}$, реалізований потенціометричним подільником, встановленим після елементу типу «нечутливість»:

$$K_{ост} = \frac{U_{ост}}{\Delta U_{дт}} = \frac{2,33}{4} = 0,58$$

Статичні характеристики системи з загальним суматором показана на рис.3.4

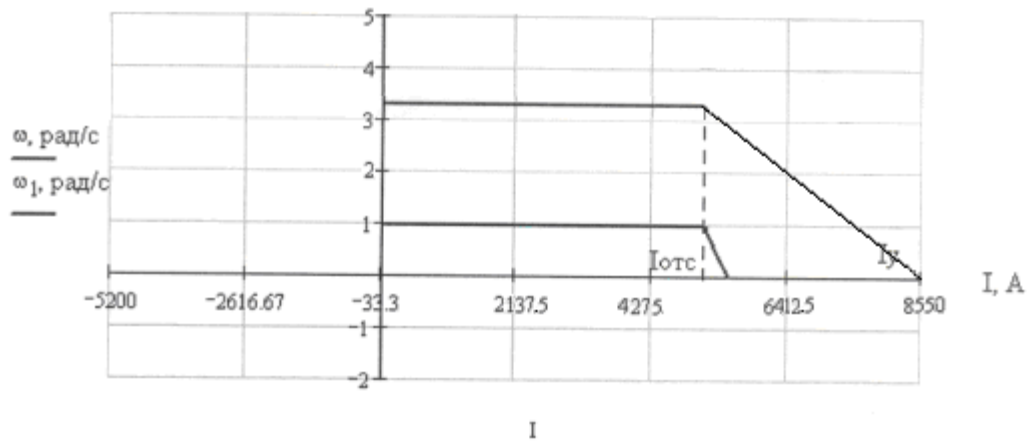
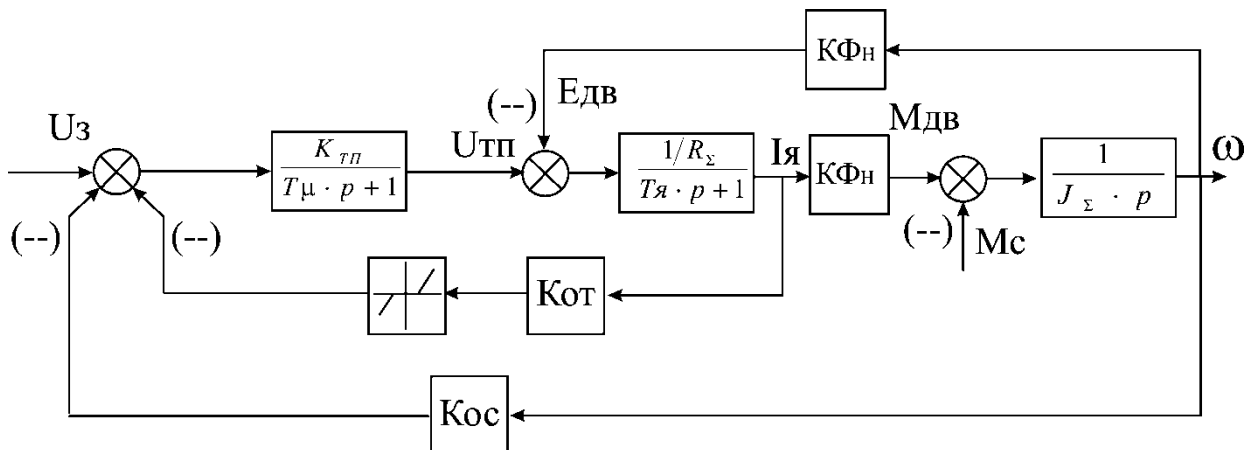


Рис 3.4 - Статичні характеристики системи з загальним суматором

Дослідження динаміки привода при зміні керуючих і збурюючих впливів

Дослідження динаміки системи привода відбувається за схемою:



Значення коефіцієнтів, що входять до структурної схеми:

$$T_{\mu} \approx T_{\Gamma} = \frac{1}{mf} = \frac{1}{3 \cdot 50} = 0,0067 \text{ с} - \text{ стала часу регульованого джерела жив-$$

лення,

де:

T_{Γ} - середньоквадратичний час запізнення;

m - кількість фаз перетворювача.

$$K_2 = \frac{1}{R_{\Sigma}} = \frac{1}{0,025} = 40,$$

де R_{Σ} - еквівалентний опір силового кола системи привода.

Визначимо індуктивність якоря двигуна за формулою Ліувілля-Уманського:

$$L_{\text{яд}} = \frac{K_k \times U_H}{I_H \times n_H \times 2p} = \frac{4 \times 660}{4275 \times 23 \times 14} = 193,14 == 1,92 \times 10^{-3} \text{ Гн}$$

де K_k - конструктивний коефіцієнт, рівний 10-12 для швидкохідних машин і 3-5 для тихохідних.

Індуктивність фази трансформатора:

$$L_{\text{тр}} = \frac{X_{\text{т}}}{2 \times \pi \times f} = \frac{0,015}{2 \times 3,14 \times 50} = 0,478 \times 10^{-4} \text{ Гн}$$

Сумарна індуктивність силового кола:

$$L_{\Sigma} = L_{\text{яд}} + 2L_{\text{тр}} + L_{\text{дрос}} = 1,92 \times 10^{-3} + 2 \times 0,478 \times 10^{-4} + 0,32 \times 10^{-3} \\ = 2,336 \times 10^{-3} \text{ Гн}$$

$$T_{\Sigma} = \frac{L_{\Sigma}}{R_{\Sigma}} = \frac{2,336 \times 10^{-3}}{0,025} = 0,09344 \text{ с}.$$

При від'ємному зворотньому зв'язку за струмом:

$$U_{3\Sigma} = U_3 - U_{\text{відс}};$$

$$U_{\text{відс}} = k_{\text{відс}}(I_{\text{я}} - I_{\text{відс}})$$

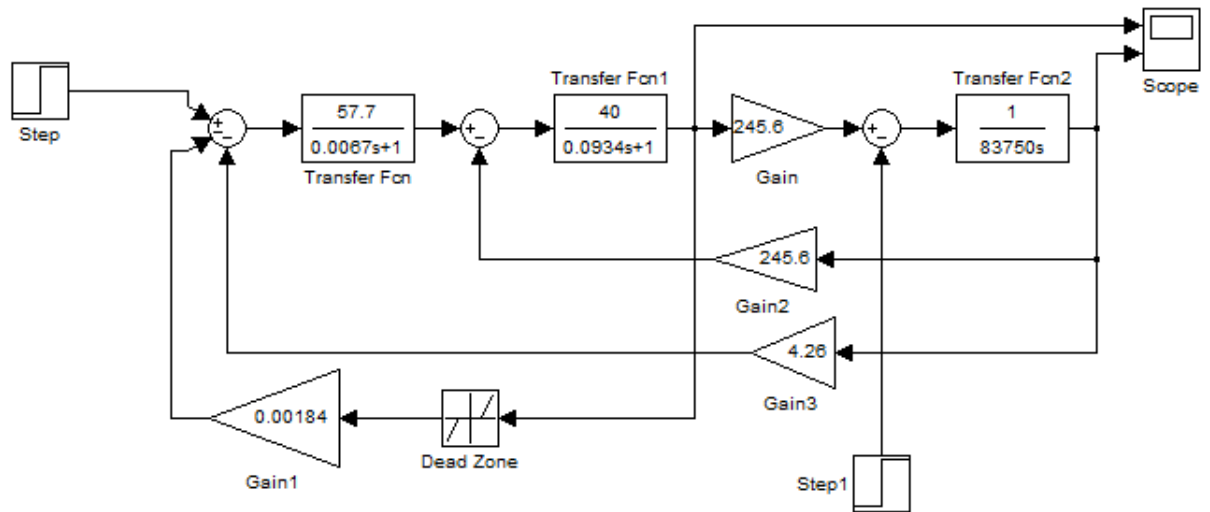
$$U_d = U_{3\Sigma} k_{\text{ТП}} = (U_3 - U_{\text{відс}}) k_{\text{ТП}} = U_3 k_{\text{ТП}} - k_{\text{відс}} (I_{\text{я}} - I_{\text{відс}}) k_{\text{ТП}} = k_{\Phi_H} \cdot \omega + I_{\text{я}} R_{\Sigma}$$

При струмі упору $I_{\text{я}} = I_{\text{уп}} = 8550 \text{ А}$, швидкість двигуна $\omega = 0$.

Отже:

$$k_{відс} = \frac{U_3 k_{ТП} - I_y R \sum \dots}{(I_y - I_{відс}) k_{ТП}} = \frac{10 \times 57,7 - 8550 \times 0,025}{(8550 - 5130) \times 57,7} = 0,00184$$

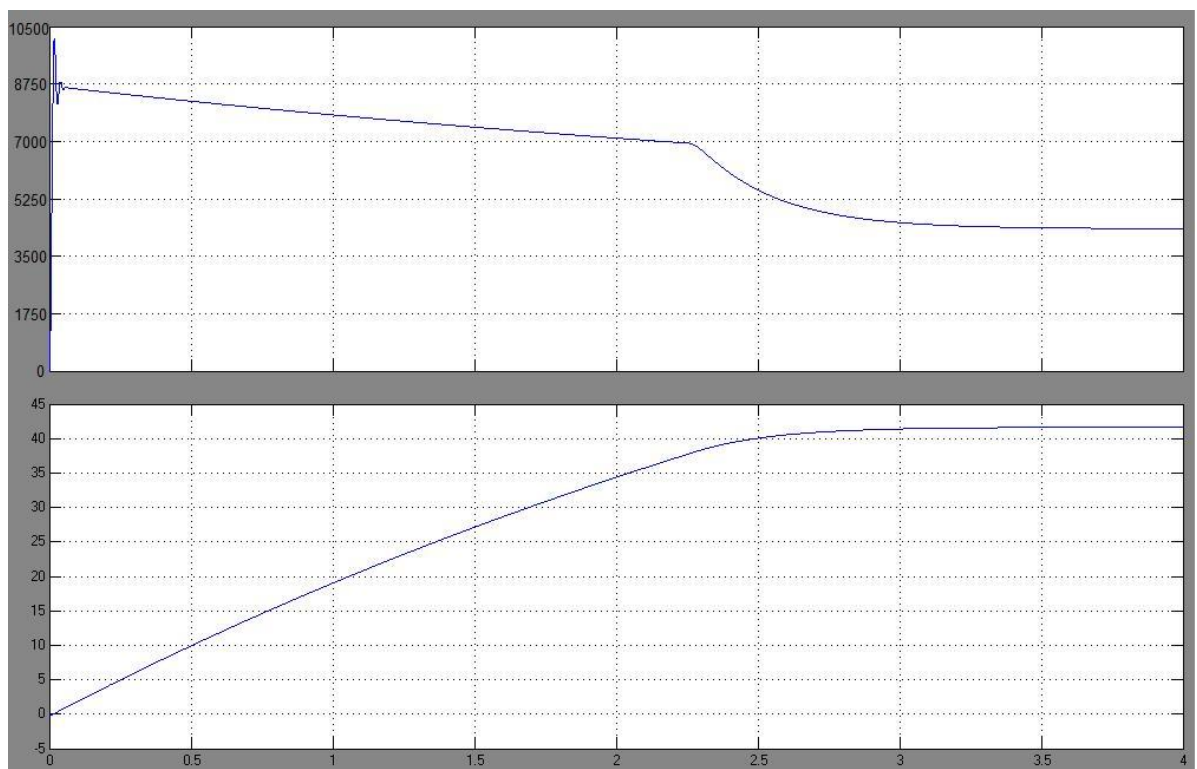
Структурна схема має наступний вигляд:



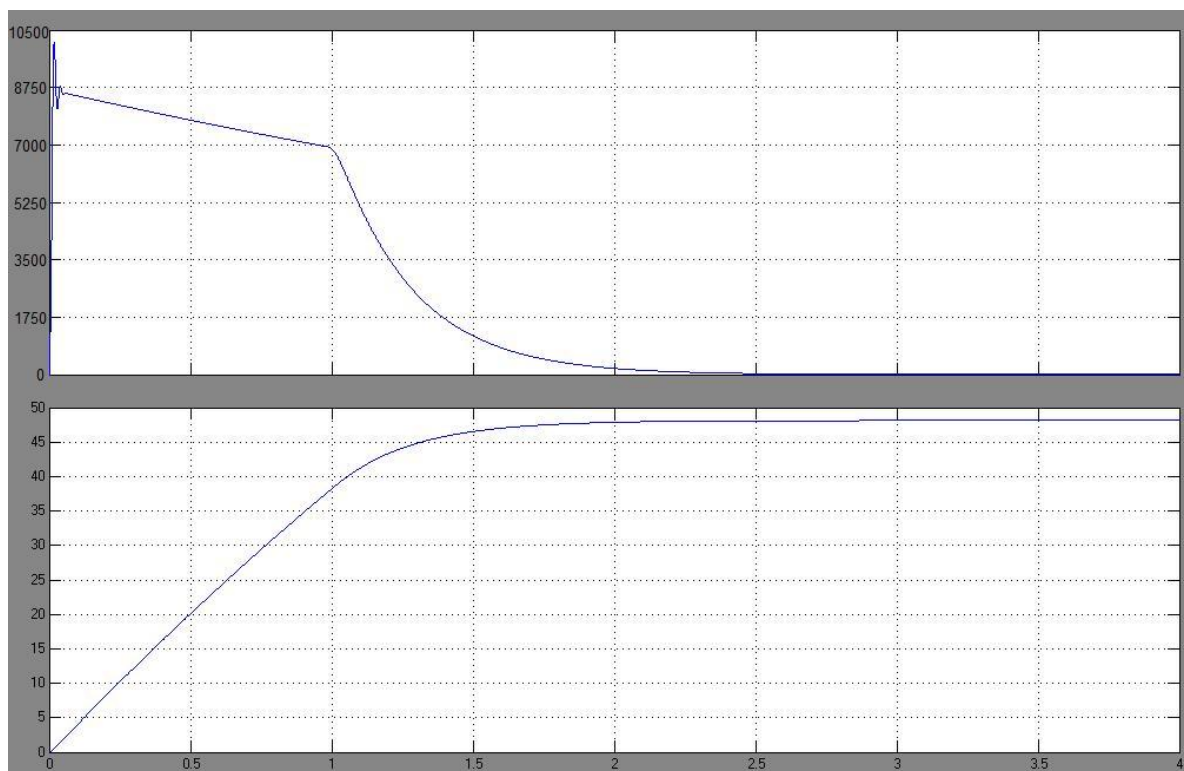
Графіки залежності струму якоря і швидкості від часу замкненої за швидкістю та струмом системи:

1. Пуск

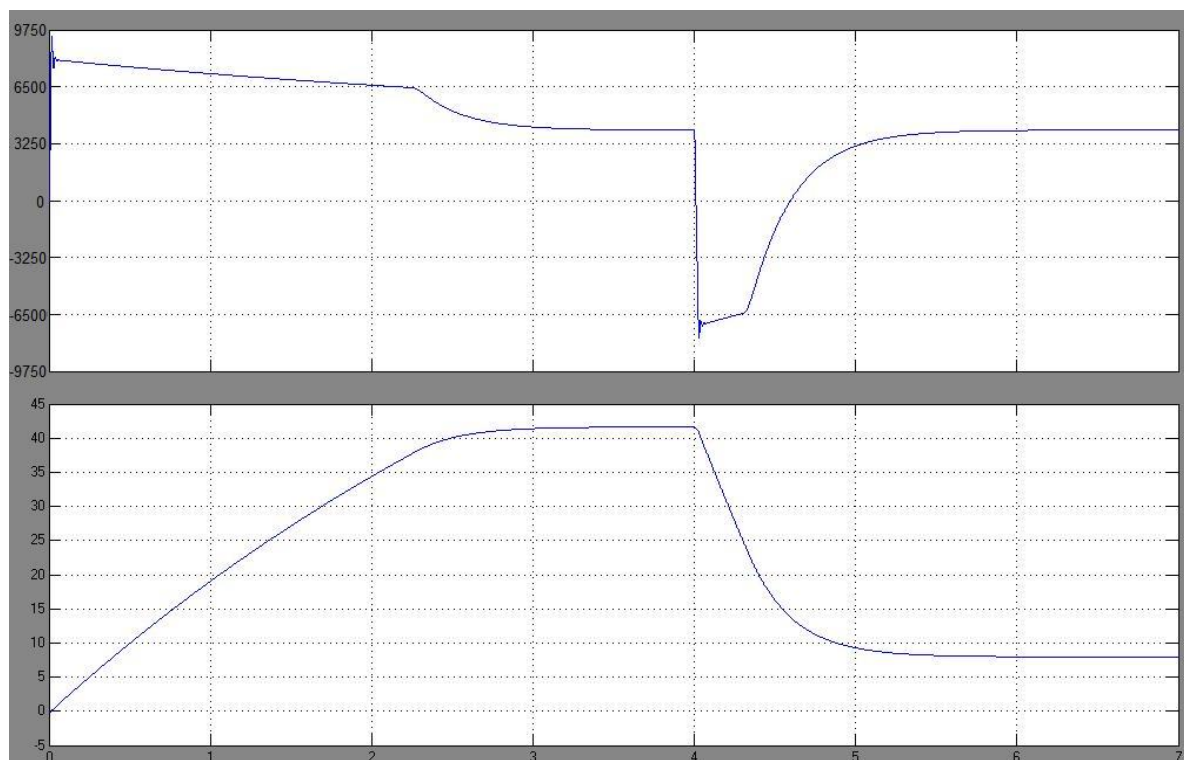
а) при $U_3 = 10 D$ і $M = M_H$:



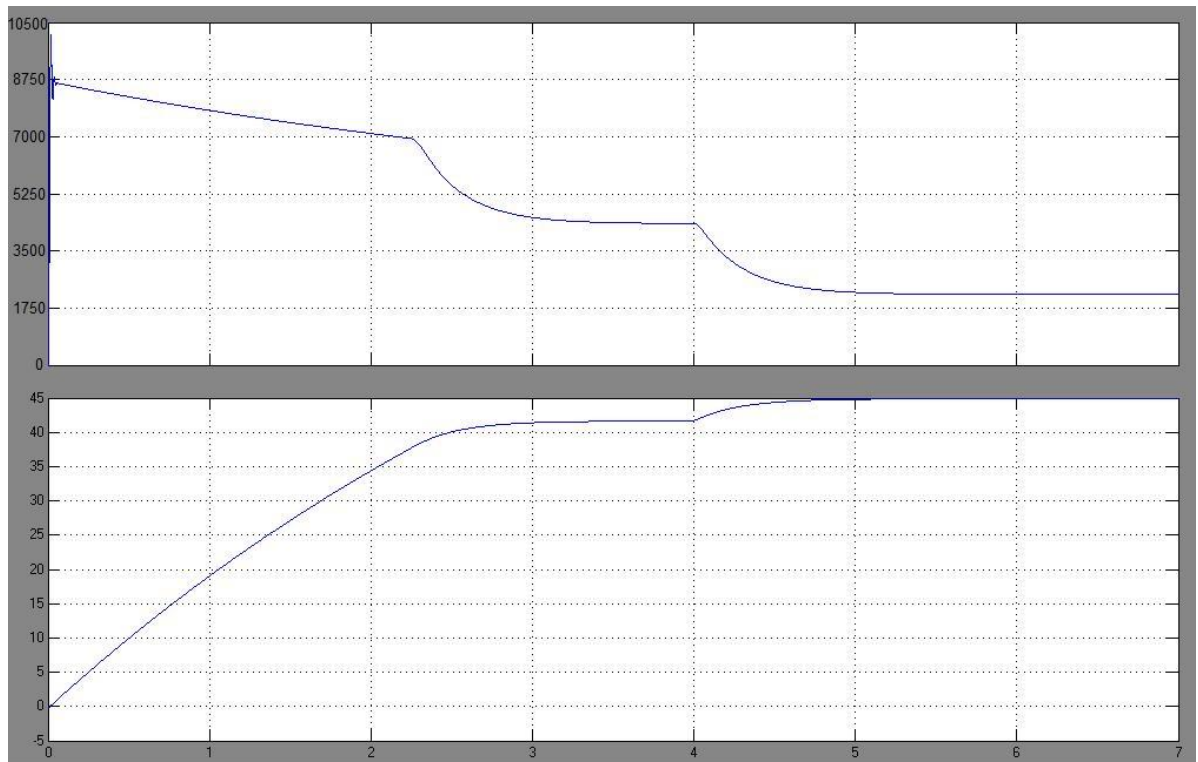
б) при $U_3 = 10 V$ і $M = 0$:



2. Скид завдання при $U_3 = 10 \text{ В} \rightarrow 3 \text{ В}$ і $M = M_H$:



3. Скид моменту при $U_3 = 10 \text{ В}$ і $M = M_H \rightarrow 0,5M_H$:



3.3. Синтез параметрів регуляторів замкненої САК. Розрахунки системи підпорядкованого регулювання.

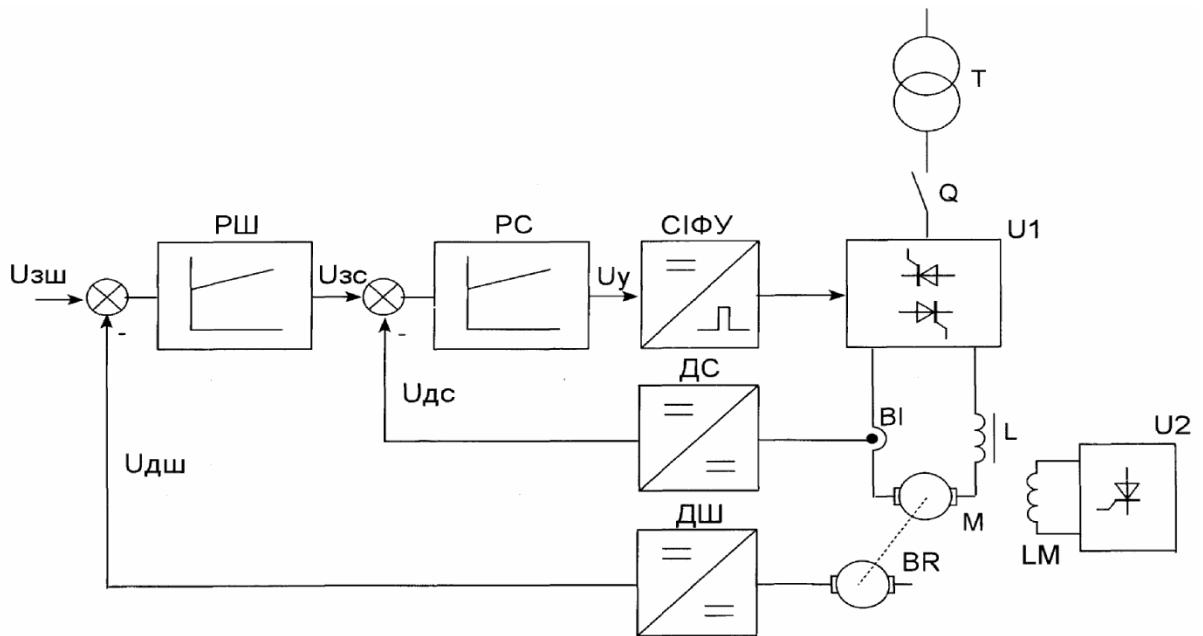


Рис 3.5 - Функціональна схема електропривода за системою ТП-Д з регулятором швидкості.

3.3.1. Розрахунки зворотного зв'язку по струму й регулятору струму

З метою наближення робочих характеристик замкненої системи до бажаних параметрів виконується оптимізація елементів структури регулювання. Основним завданням є мінімізація сталої часу електропривода, що безпосередньо впливає на динамічну якість процесів регулювання.

Для цього вводиться масштабуючий коефіцієнт, який виконує функцію нормування без впливу на форму перехідної характеристики. Він слугує узагальненим показником динамічної швидкодії системи.

Технічна реалізація:

Функціональне виконання регуляторної частини реалізоване на основі модулів УБРС-АИР, які працюють у парі з датчиками, що мають уніфікований вихідний сигнал 10В.

Початковим етапом оптимізації є вибір необхідної апаратної бази — датчиків струму та напруги, а також відповідних модулів керування.

Коефіцієнт передачі датчика струму:

$$K_{дт} = \frac{U_a}{I_{max}} = \frac{10}{8550} = 1.169 \times 10^{-3} \frac{В}{А}$$

Коефіцієнт передачі датчика швидкості:

$$K_{дт} = \frac{U_a}{\omega_0} = \frac{10}{3,148} = 3,177 \frac{Вс}{рад}$$

Приймаю некомпенсовану постійну часу на рівні:

$$T_{\mu T} = 0,01с$$

Виділяю частину структурної схеми, яка відноситься до контуру струму.

Оскільки $4T_e \geq T_m$, то в цьому випадку неприпустимий розрив внутрішнього зворотного зв'язку по Е.Р.С.

Передаточна функція об'єкта має вигляд:

$$W_{OT}(p) = K_n K_{ДТ} \frac{\frac{1}{R_0(T_e p + 1)}}{1 + \frac{R_0}{T_M p R_0 (T_e p + 1)}} = \frac{\frac{1}{R_0}}{\frac{T_M p (T_e p + 1) + 1}{T_M p}} K_n K_{ДТ} = \frac{T_M p / R_0}{T_M T_e p^2 + T_M p + 1} K_n K_{ДТ}$$

Передаточна функція регулятора струму, налаштованого на модульний оптимум:

$$W_{PT}^{MO}(p) = \frac{T_M T_e p^2 + T_M p + 1}{\frac{T_M p}{R_0} \times K_n \times K_{ДТ} \times 2T_{\mu T} p} = \frac{0,034 \times 0,084 p^2 + 0,034 p + 1}{\frac{0,034 p}{0,025} \times 57,7 \times 1,169 \cdot 10^{-3} \times 2 \times 0,01 p} =$$

$$= \frac{0,0029 p^2 + 0,034 p + 1}{0,0027 p^2} = 1,074 + 12,59 \frac{1}{p} + 370,37 \frac{1}{p^2}$$

Принципова схема регулятора струму показана на рис.3.6

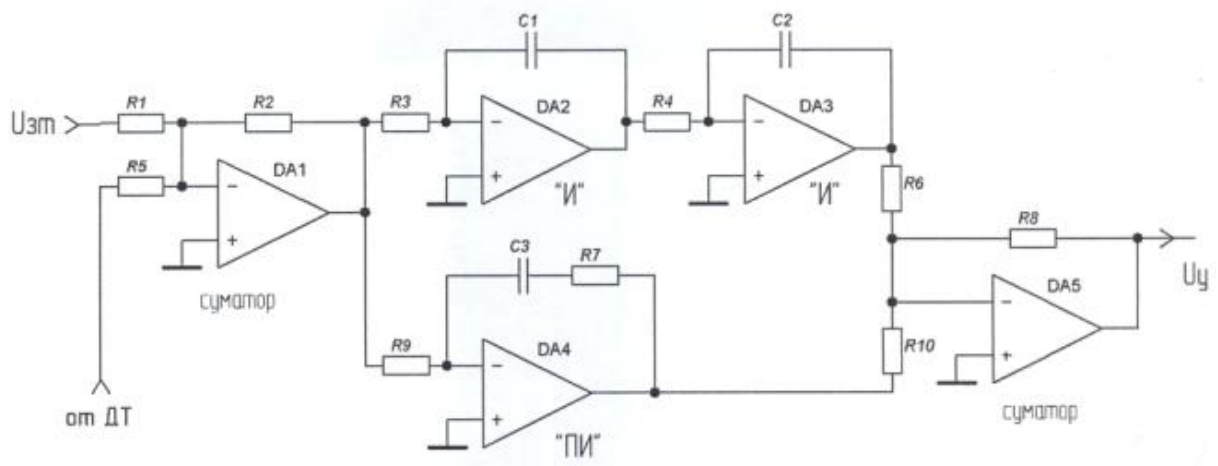


Рис 3.6 - Принципова схема регулятора струму

Розрахую значення опорів і ємностей.

Суматори, зроблені на DA1 і DA2, мають однаковий коефіцієнт підсилення, рівний 1. $K_{\Sigma} = \frac{R_2}{R_1} = \frac{R_2}{R_5} = \frac{R_8}{R_6} = \frac{R_8}{R_{10}} = 1$

Обираю $R_1 = R_2 = R_5 = R_6 = R_8 = R_{10} = 10 \text{ кОм}$.

Складова N регулятора струму реалізується послідовним включенням двох інтеграторів DA2, DA3 з однаковим коефіцієнтом передачі, рівним $\sqrt{76,923}$. Приймаю $C_1 = C_2 = 10 \text{ мкФ}$, тоді

$$R_3 = R_4 = \frac{1}{C_1 \times R_{\mu^2}} = 11,4 \text{ кОм}$$

Пропорційно-інтегруюча частина регулятора струму реалізована у вигляді ПІ-регулятора на основі операційного підсилювача DA4.

Для налаштування інтегрувальної гілки приймається значення ємності $C3=5\text{ }\mu\text{Ф}$

Виходячи з цього, подальші розрахунки дозволяють визначити відповідний опір у зворотному зв'язку, що забезпечить потрібну швидкодію та стабільність регулювання струму.

$$K_{\text{и}} = \frac{1}{K_9 \times C3} = 20$$

$$R_9 = \frac{1}{R_b \times C3} = 10\text{ кОм}$$

$$K_{\text{п}} = \frac{R_7}{R_9} = 1,923$$

$$R_7 = K_{\text{п}} \times R_9 = 19,23\text{ кОм}$$

Розрахунки струмообмеження

У структурі підлеглого регулювання електропривода струмообмеження реалізується шляхом встановлення максимально допустимого рівня вихідного сигналу $U_{\text{зт max}}$ у регуляторі зовнішнього (швидкісного) контуру. Цей підхід дозволяє ефективно обмежити навантаження в струмовому контурі, не порушуючи стабільність загальної системи керування.

Для математичного опису роботи внутрішнього струмового контуру, оптимізованого за критерієм швидкодії, може бути використана наближена передаточна функція, яка має вигляд:

$$W_{\text{зт}}(p) = \frac{I}{U_{\text{зз}}} = \frac{1/K_{\text{дт}}}{2T_{\text{и}}p + 1} \approx \frac{1}{K_{\text{дт}}} = \frac{1}{1,169 \times 10^{-3}} = 8,55 \times 10^2$$

відношуючи при цьому $2T_{\text{и}}$ до наступного контуру регулювання швидкості:

$2T_{\text{и}}=T_{\text{мс}}=0,02\text{ с}$, де $T_{\text{мс}}$ – не компенсуєма постійна часу контуру швидкості.

Тоді можна записати для умови струмообмеження: $U_{\text{зт max}}$

$$U_{3T3Tm} \times \frac{1}{K_{дд}} = I_{max} = 2I_n$$

$$\text{Звідси } U_{3T3Tm} = K_{дт} \times I_{max} = 8550 \times 1,169 \times 10^{-3} = 10 \text{ В}$$

Максимальна величина вихідної напруги регулятора швидкості, позначена як $U_{3T \max}$, виконує роль обмежувальної напруги для подальшої передачі сигналу до струмового регулятора. Цей параметр задає граничне значення струму, що може споживатися системою, забезпечуючи надійний захист від перевантажень.

Для реалізації цього механізму в ланцюг зворотного зв'язку контуру швидкості вмикаються два стабілітрони (Ст1 і Ст2), які з'єднуються зустрічно-паралельно. Їх пробивна напруга відповідає величині $U_{3T \max}$, що й обмежує напругу на вході струмового регулятора.

У нашому випадку:

- Максимальний допустимий струм:

$$I_{max} = 2I_n = 8550 \text{ А}$$

Для реалізації обмеження обрано стабілітрони типу Д815Г з пробивною напругою 10 В, що відповідає рівню граничного сигналу керування в системі.

3.3.2. Розрахунки контуру швидкості в системі підлеглого регулювання

Передаточна функція об'єкта, що належить до контуру швидкості:

$$W_{oc}(p) = \frac{1}{K_{дт}} \times \frac{R_0}{T_{мКер}} \times K_{дс}$$

Зважаючи на широкий діапазон регулювання швидкості, регулятор, налаштований відповідно до модульного критерію оптимальності, не здатен забезпечити необхідну точність у всьому робочому діапазоні. Це обумовлює знижену якість стабілізації та збільшення статизму при зміні навантаження.

З метою усунення цього недоліку виконується синтез швидкісного регулятора відповідно до симетричного критерію оптимізації, який дозволяє забезпечити сталу якість регулювання в широкому діапазоні зміни параметрів.

У цьому випадку передаточна функція регулятора швидкості приймає вигляд:

$$W_{pc}^{co}(p) = \frac{T_m \times K_e \times K_{\partial m} (4T_{\mu p} + 1)}{8T_{\mu c}^2 p \times R_{\Sigma} \times K_{\partial c}} = \frac{0,034 \times 247.747 \times 1,169 \times 10^{-3} (0,08p + 1)}{8 \times 0,0004 \times 0,025 \times 3,177p} =$$

$$= \frac{0,00078776p + 0,009847}{0,000254p} = 3,101 + 38,77p$$

Отримали ПІ-регулятор швидкості. Систем при цьому зватися, двократно-інтегруюча.

Розрахунки параметрів регулятора швидкості:

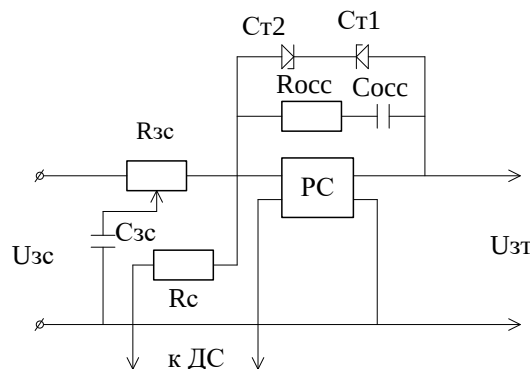


Рис 3.7 - Принципова схема регулятора швидкості

Приймаю: $C_{occ} = 1$ мкФ, тоді $"П" = \frac{R_{occ}}{R_{zc}}$, $"U" = \frac{1}{R_{zc} C_{occ}}$.

Звідси: $R_{zc} = \frac{1}{U \times C_{occ}} = \frac{10^6}{38,77} = 25,8$ кОм;

$R_{occ} = "П" \cdot R_{zn} = 3,101 \cdot 25,8 = 80,1$ кОм.

R_c приймаємо рівним R_{zn} , т.е. $R_c = 25,8$ кОм

Такий структурі відповідає перехідний процес, при якому перерегулювання δ досягає 43%, а час регулювання t_r досягає 16,5Тм.

Велике перерегулювання викликане наявністю складової, що диференціює, у чисельнику передаточної функції. Тому на виході контуру включається фільтр (інерційна ланка з передаточною функцією

$W_{\phi}(p) = \frac{1}{4T_{\text{мсп}} + 1}$, при цьому досягається такі параметри перехідного процесу:

$$\delta \leq 8\%, t_p \leq 13.3T_{\text{мсп}}, \Delta_3^* = 0$$

Регулятор швидкості повинен мати характеристику типу "насичення" на рівні $U_{3\text{тmax}}$ (за умовою струмообмеження)

Замкнутий контур швидкості приблизно може характеризуватися коефіцієнтом:

$$W_{3c}(p) = \frac{\omega}{U_{3c}} \approx \frac{1}{K_{дс}}$$

звідки легко визначається необхідна напруга завдання на будь-яку швидкість:

$$U_{3c} = E_{\text{пр}} \times K_{дс}$$

Розрахунки параметрів фільтра регулятора швидкості:

$T_{\phi} = 4T_{\text{мсп}} = 0,08$ с, звідки, знаючи, то $T_{\phi} = 1/2R_{3c}C_{3c}$, визначаємо

$$C_{3c} = \frac{T_{\phi}}{1/2 \times R_{3c}} = \frac{0,08}{12,9 \times 10^{-3}} = 6,25 \text{ мкФ}$$

де T_{ϕ} - постійна часу фільтра.

Статичні характеристики в системі будуть мати вигляд паралельних осі і прямих.

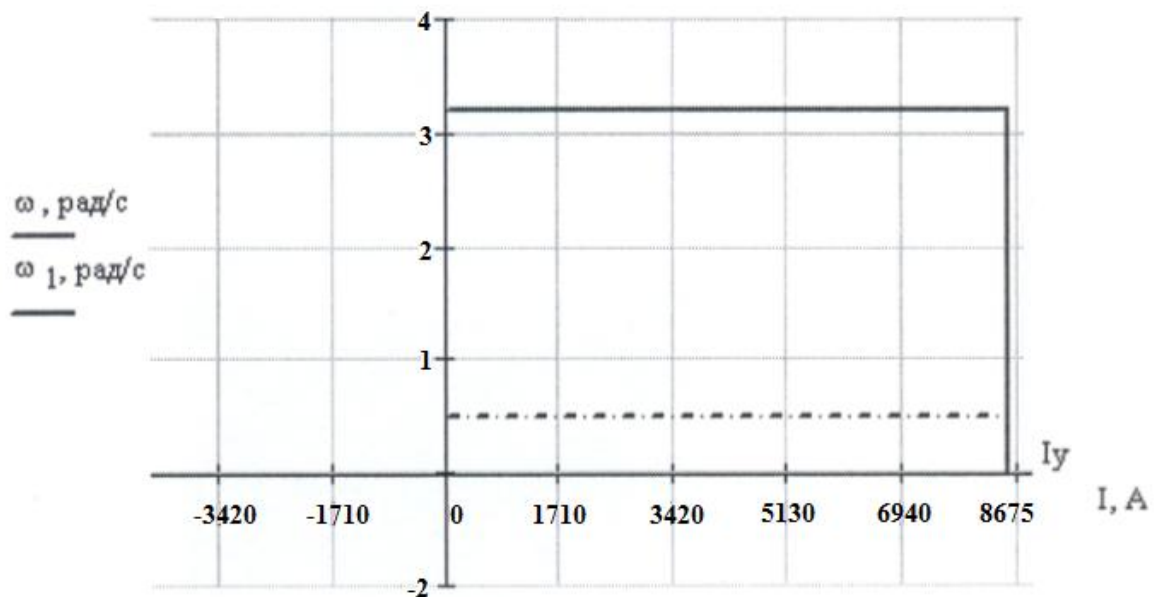


Рис 3.8 - Швидкісні характеристики

Розрахунки задавача інтенсивності

Для запобігання перевантаженню електропривода при різких змінах завдання проводиться налаштування задавача інтенсивності. Його параметри визначаються таким чином, щоб розгортання команди не викликало перевищення допустимого значення струму.

Основна вимога — обмежити динамічний струм на рівні, не більшому за подвоєне значення номінального. Це забезпечує безпечний пуск та стабільну роботу системи без переходу в аварійні режими.

Налаштування виконується з урахуванням інерційності привода, швидкодії регуляторів та допустимого навантаження на виконавчі елементи.

$$M_d - M_c = J_o \frac{dw}{dt} = M_{дин}$$

де $M_{дин}$ — динамічний момент електропривода.

Тоді після остаточних перетворень:

$$M_{дин. доп} = M_{доп} = K_m \times I_{доп} = 4475,2 \text{ Н} \times \text{м}$$

$$\text{Приймаємо } \Delta\omega = \omega_{тах} = \omega_o = 62,23 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$$

Визначаю час розгортання стрибка максимального сигналу:

$$\Delta t = \frac{J_o \times \omega_o}{I_{тах} \times K_m} = \frac{83750 \times 3,148}{8550 \times 243,655} = 0,127 \text{ с}$$

тобто характеристики ЗІ мають вид :

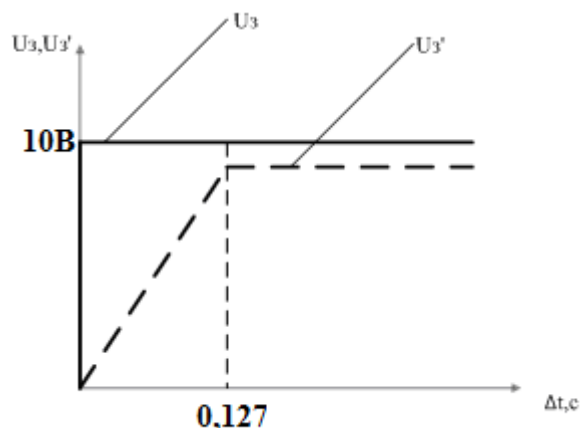


Рис 3.9 - Характеристики ЗІ

3.4 Дослідження динамічних кількісних показників САК ЕП на математичній моделі

Аналіз динамічних режимів роботи електропривода здійснюється на основі структурної побудови системи керування. Всі елементи описуються відповідно до розрахованих параметрів регуляторів, датчиків і електромеханічних компонентів. При цьому враховуються часові постійні, інерційність системи, а також вплив зовнішніх навантажень.

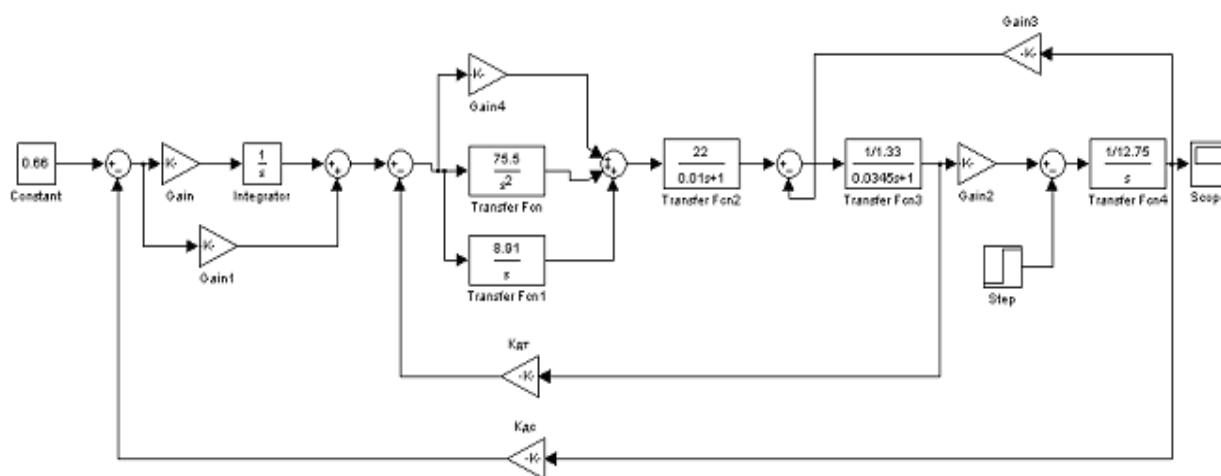


Рис 3.10 - Схема моделі системи електропривода по системі ТП-Д із зворотними зв'язками по струму та швидкості.

Максимальне перерегулювання по швидкості при накиді навантаження складає 43%, час регулювання - 0,11 с, що задовольняє умовам завдання.

Схема моделі системи електропривода по системі ТП-Д з пружними зв'язками представлена на рис. 3.11:

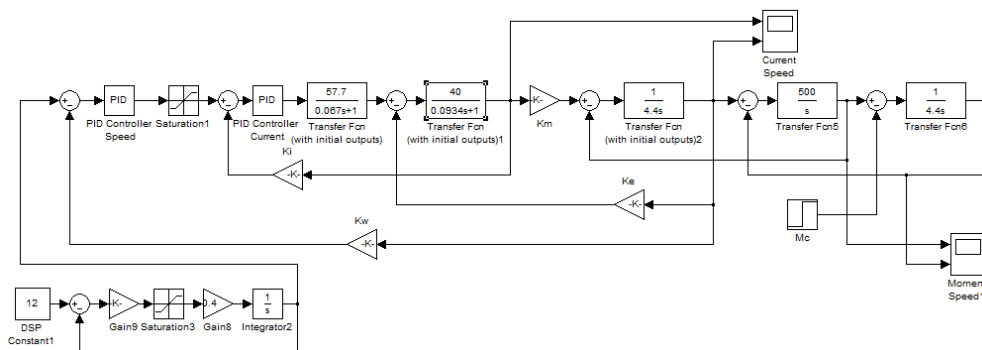


Рис 3.11 Схема моделі системи електропривода по системі ТП-Д з пружними зв'язками

Графіки моделі системи електропривода по системі ТП-Д із зворотними зв'язками по струму та швидкості представлені на Рис.3.11 та 3.12.

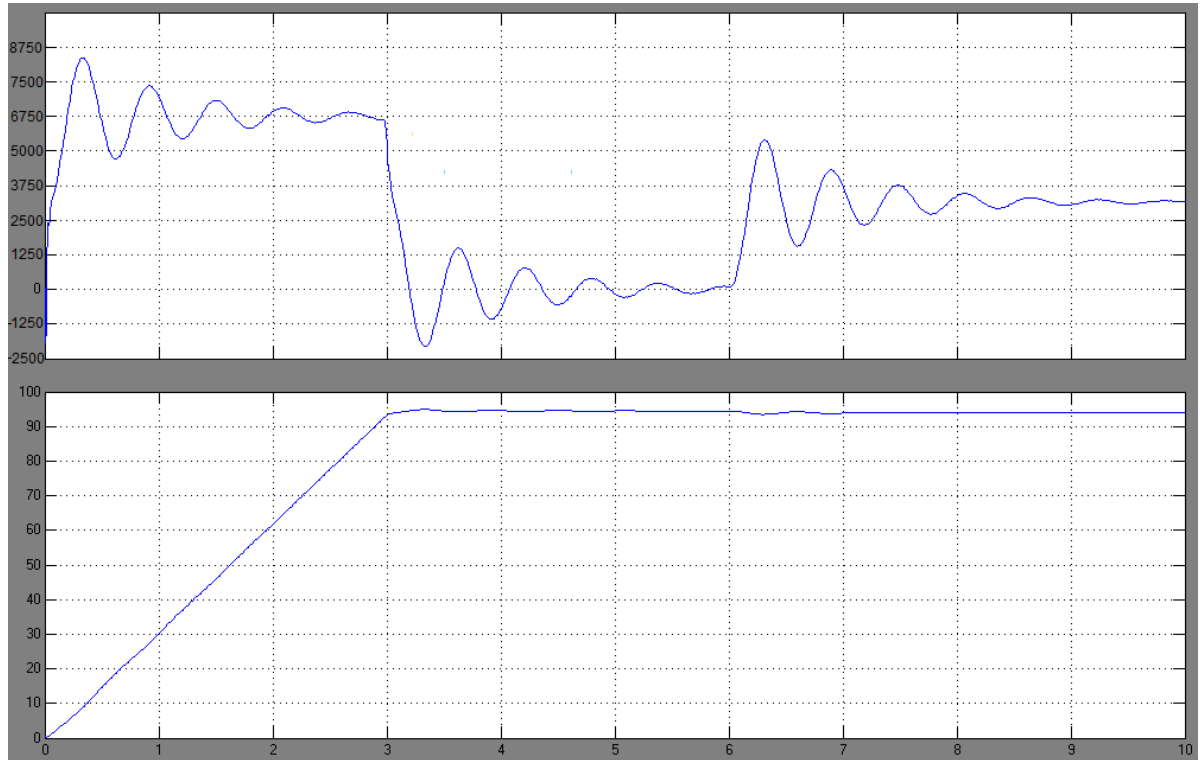


Рис 3.11 - Графіки системи ТП-Д без пружних зв'язків.

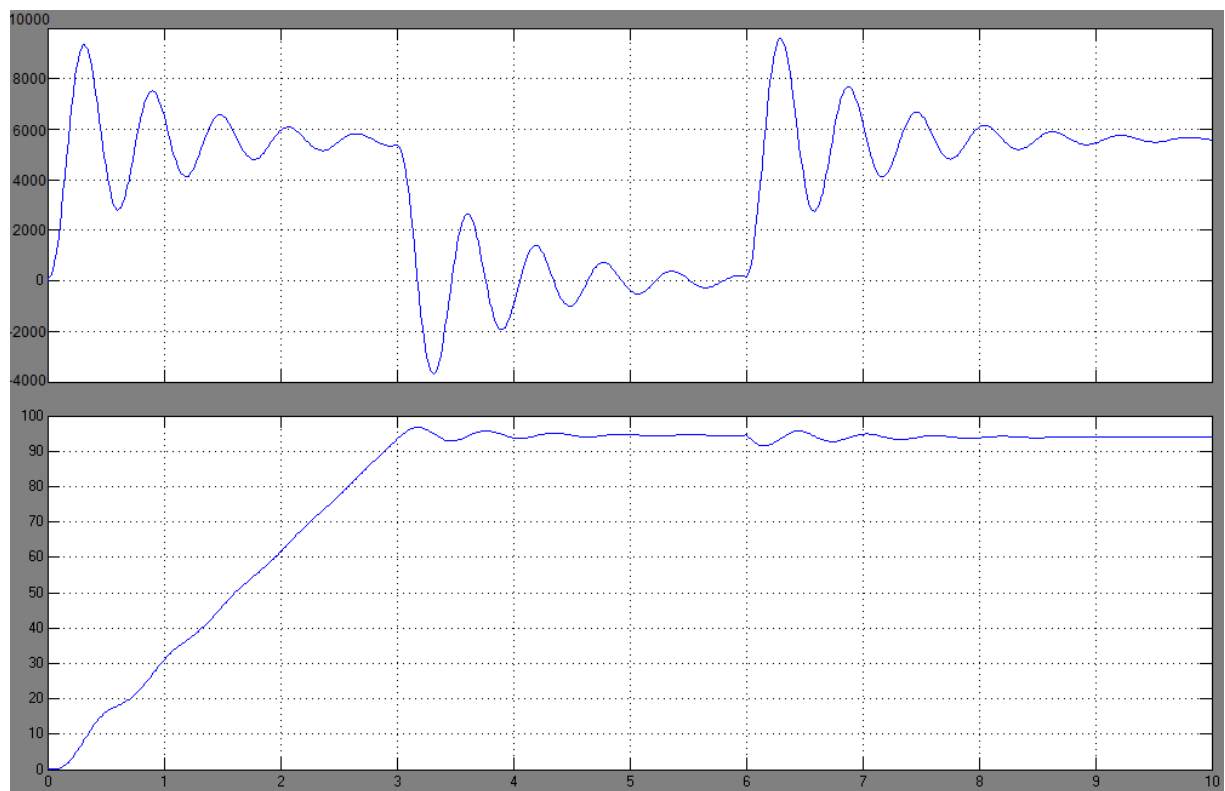


Рис 3.12 - Графіки системи ТП-Д з пружними зв'язками.

РОЗДІЛ 4. ЕНЕРГЕТИКА СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ, ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

4.1 Визначення показників потужності споживачів.

Залежність коефіцієнта потужності від кута управління $k_{п} = f(\alpha)$ має вигляд:

$$k_{п} = \cos\left(\alpha + \frac{\gamma}{2}\right)$$

Кут комутації:

$$\gamma = \arccos\left(\cos \alpha - \frac{\sqrt{2} I_d X_a}{\sqrt{3} U_a}\right) - \alpha$$

де $Xa = \frac{U_{к.з} \times Ua}{100 \times I_{2H}}$, $U_{к.з}$ - напруга короткого замикання трансформатора живлення, I_{2H} - номінальний фазний струм вторинної обмотки трансформатора.

Будуємо $k_p = f(a)$:

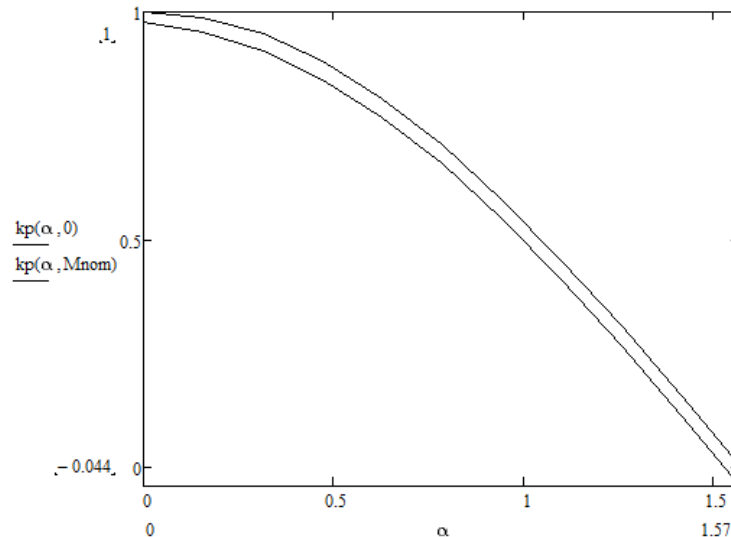


Рис 4.1.1 - Залежність коефіцієнта потужності від кута управління у режимі холостого ходу та при номінальному навантаженні

Коефіцієнт корисної дії електропривода розраховується за виразом:

$$\eta = \frac{M\omega}{M\omega + \Delta P_{\Sigma}} \times 100\% = \frac{1042 \times 10^3 \times 3,148}{1042 \times 10^3 \times 3,148 + 456939,8} \times 100\% = 87,77\%$$

де ΔP_{Σ} - загальні втрати потужності у системі електропривода, які визначаються:

$$\sum \Delta P = \Delta P_{\text{пост}} + \Delta P_{\text{змін}} = 456890,625 + 49,19 = 456939,8 \text{ Вт}$$

Постійні втрати потужності визначаються:

$$\Delta P_{\text{пост}} = k_{\text{мех}} \times P_H \times \left(\frac{\omega}{\omega_H} \right) = 0,015 \times 2500 \times \left(\frac{3,148}{2,4} \right) = 49,19 \text{ Вт}$$

де $k_{\text{мех}}$ - коефіцієнт механічних втрат: $k_{\text{мех}} = 0,015$.

Змінні втрати потужності визначаються:

$$\Delta P_{\text{змін}} = I_{\theta B}^2 R_e = 4275^2 \times 0,025 = 456890,625 \text{ Вт}$$

Будую залежність $\eta = f(\omega)$ при номінальній напрузі на якорі двигуна для декількох значень моменту двигуна:

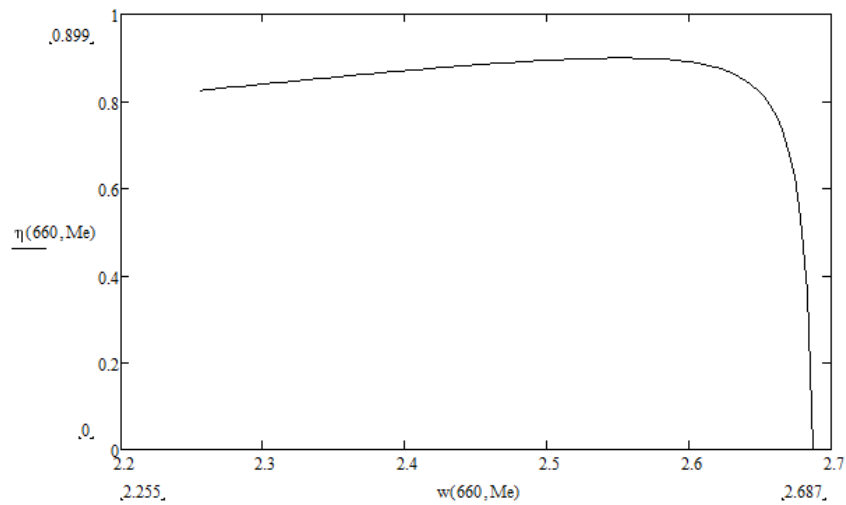


Рис 4.1.2 - Залежність $\eta = f(\omega)$ ЕП

К.К.Д. системи:

$$\eta = \frac{Ud \times \cos \alpha - I_a R_a}{Ud \times \cos \alpha + \Delta U + Id \times (R_{\text{дрос}} + 2R_{\text{ф.т}})}$$

$$= \frac{660 - 4275 \times 0,0165}{660 + 1,5 + 6300 \times (0,24 \times 10^{-3} + 2 \times 0,00248)} = 0,85$$

де $\Delta U = 1,5\text{В}$ - падіння напруги в тиристорі.

Будую залежність

$$\eta = f(I_a) \text{ при } \alpha=0 \quad \eta_0 = 0,85;$$

$$\eta_{30} = f(I_a) \text{ при } \alpha=30 \quad \eta_{30} = 0,83;$$

$$\eta_{60} = f(I_a) \text{ при } \alpha=60 \quad \eta_{60} = 0,71;$$

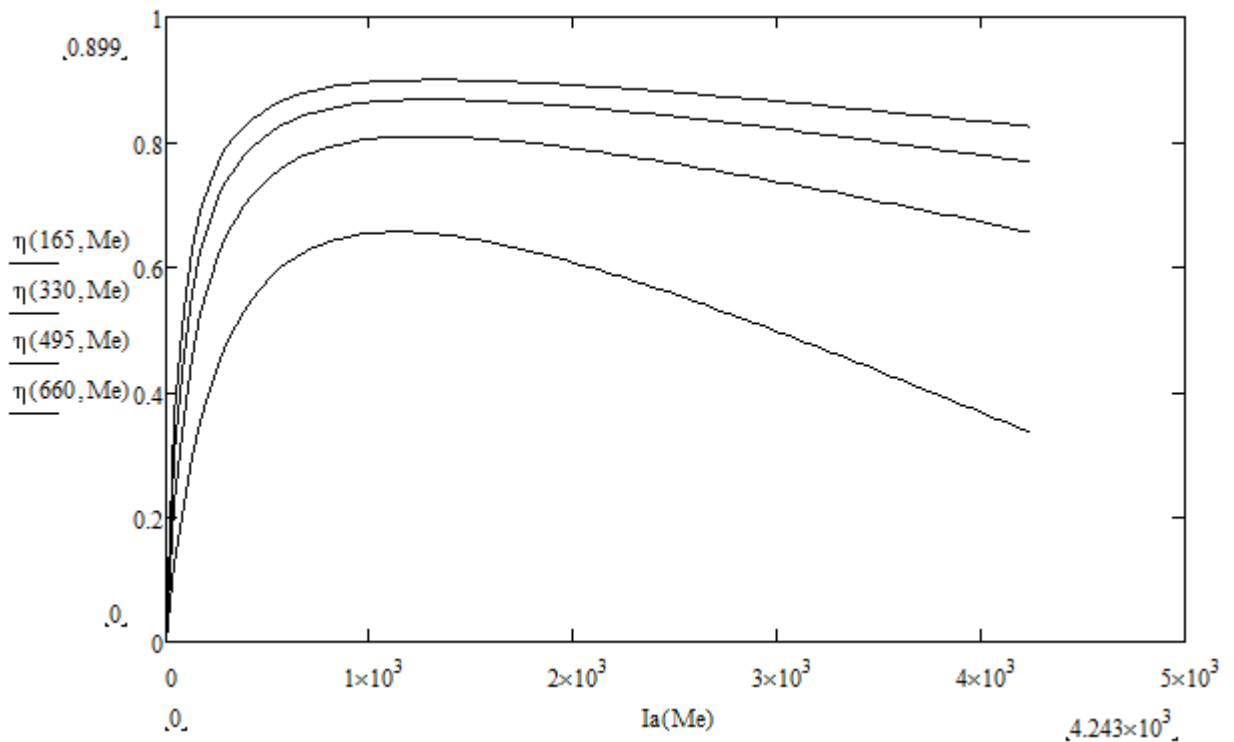


Рис 4.1.3 Залежність $\eta = f(I_a)$ системи

Розрахунок коефіцієнту потужності.

Розрахунок коефіцієнту потужності виконується:

$$\cos \varphi \approx \cos \alpha = \frac{k\Phi\omega + I\partial_{в}Re}{Udo} = \frac{k\Phi\omega + \frac{MRe}{k\Phi}}{Udo} = \frac{245,6 \times 2,4 + \frac{1042000 \times 0,25}{245,6}}{780} = 0,89$$

Будую залежність $\cos \varphi = f(I_a)$ для декількох значень кутів керування випрямлячем в залежності від навантаження електроприводу.

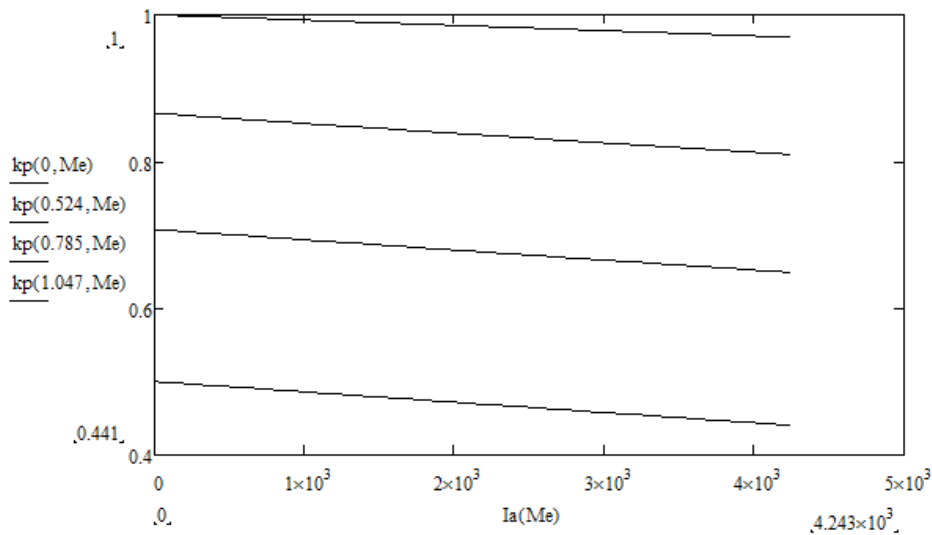


Рис 4.1.4 - Залежність $\cos \varphi = f(I_a)$ для кутів керування $\alpha=0^\circ; 30^\circ; 45^\circ; 60^\circ$.

4.2. Захист вентильного електропривода.

Під час роботи вентильних електроприводів можуть виникати як короточасні технологічні перевантаження, так і аварійні ситуації, які становлять загрозу для окремих вузлів і компонентів системи.

Комплексний захист таких електроприводів має передбачати кілька рівнів безпеки: захист електродвигуна (включаючи обмотку збудження та якірний контур), захист напівпровідникових елементів від перевищення струму і напруги, а також обмеження струмового навантаження трансформатора.

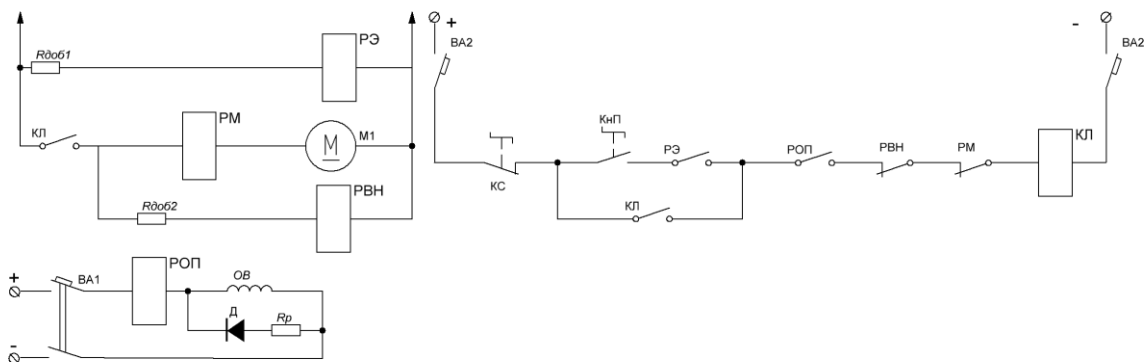


Рис 4.2.1 Релейно – контакторна схема захисту двигуна

У практиці експлуатації електроприводів, що живляться від тиристорних перетворювачів, передбачається впровадження ряду функцій захисту, спрямованих на запобігання аварійним ситуаціям та недопущення виходу з ладу окремих вузлів. До основних типів захистів належать: струмовий захист, захист при зникненні або зниженні збудження, обмеження перенапруги на якорі двигуна, а також блокування увімкнення двигуна за наявності напруги на виході перетворювача.

У схемах такого типу якор двигуна М підключається до тиристорного перетворювача через силовий контактор КЛ. Збудження двигуна в подібних системах, як правило, здійснюється від окремого джерела постійного струму.

Захист від перевищення допустимого струму в якорі реалізується за допомогою струмового реле РМ, що включається послідовно в коло якоря. У разі перевищення струму реле розмикає ланцюг живлення котушки контактора КЛ, що автоматично вимикає двигун. В умовах стабільного навантаження можливе застосування теплового реле замість РМ.

Контроль напруги на якорі забезпечується реле РВН, яке реагує на перевищення встановленого порогового значення. За спрацювання реле контакт у колі КЛ розмикається, і двигун також знеструмлюється.

За рівнем струму збудження слідує реле РСП. У разі його зникнення або значного зниження реле розриває коло контактора КЛ. Це запобігає неконтрольованому зростанню швидкості двигуна, особливо за низьких навантажень. Крім того, реле РСП блокує включення приводу, якщо струм збудження нижчий від безпечного рівня.

Ще один важливий елемент – захист від небажаного включення двигуна при наявній нарузі на перетворювачі. Для цього в коло введено реле РЗ, котушка якого підключається через резистор до виходу перетворювача. У разі наявності напруги контакт РЗ розімкнутий, і натискання кнопки пуску КнП не

призводить до ввімкнення двигуна. Після нормального запуску система шунтується допоміжним контактом КЛ.

Також передбачено захист обмотки збудження від перенапруг, які можуть виникати при розриві кола чи вимкненні автомата ВА1. У цьому разі працює розрядний вентиль із резистором. Для запобігання коротким замиканням у схемі передбачено автоматичні вимикачі ВА1 і ВА2.

4.3. Розрахунок електричних навантажень

Визначення електричних навантажень виконаємо методом коефіцієнту попиту .

Величину активної потужності визначаємо за формулою:

$$P_p = K_p \sum P_n, \text{ кВт}$$

де K_p – коефіцієнт попиту споживачів;

$\sum P_n$ – сумарна номінальна потужність одного виду споживачів , кВт.

Величину реактивної розрахункової потужності визначаємо за формулою:

$$Q = P_p \operatorname{tg} \varphi, \text{ кВА}$$

де P_p – активна розрахункова потужність одного виду споживачів , кВт;

$\operatorname{tg} \varphi$ – приймається відповідно коефіцієнту потужності споживачів одного виду.

Всі показники і вихідні дані для розрахунку навантажень наведені в таблиці 4.3

Табл.4.3 Розрахунок електричних навантажень.

№ пп	Найменування споживачів	Р _н	К _п	cosφ	tgφ	Розрахункова потужність	
						Р _а кВА	Q _р ,кВ Ар
1	Пратцен крани	44	0.7	0.8	0.7 5	30.8	23.1
2	Завантажувальні шлепери	670	0.6 5	0.70 7	1	435.5	435.63
3	Підводячий рольганг	1250	0.8	0.78 1	0.8	1000	799.65
4	Скидач	1800	0.6	0.70 7	1	1080	1080.3
5	Витягувальний пристрій	2000	0.7 5	0.70 7	1	1500	1500.4
6	Штовхачі	2200	0.6	0.83 8	0.6 5	1320	859.52
7	Трайб-апарати-витягувачі	2100	0.7	0.84	0.6 5	1470	949.52
8	З'єднувальні рольганги	1600	0.7 5	0.8	0.7 5	1200	900
9	Трайб-апарати	1500	0.7 5	0.8	0.7 5	1125	843.75
10	Летючі аварійні ножиці	3700	0.7	0.84	0.6 5	2590	1672.9
11	Обривні важільні ножиці	400	0.7	0.84	0.6 5	280	180.86

12	Гільйотинні ножиці	8560	0.8	0.78	0.8	6848	5494
13	Зіштовхувач	1800	0.7	0.84	0.6 5	1260	813.88
14	Одноланцюжний транспортер	820	0.8	0.78	0.8	656	525.29
15	Муфельний транспортер	1600	0.8	0.70 7	1	1280	1280.3
16	Бунтонавішувач	460	0.6 5	0.70 7	1	299	299.09
17	Гаковий конвеєр	2100	0.8	0.84	0.6 5	1680	1085.1
18	Бунтоз'ємний пристрій	830	0.7 5	0.70 7	1	622.5	622.68
19	Пакет машина	1250	0.8	0.78	0.8	1000	802.28
20	Електромостовий кран	1500	0.6 5	0.8	0.7 5	975	731.25
21	Електромостовий грейферний кран	3650	0.8	0.8	0.7 5	2920	2190
	Всього	3983 4				29571. 8	23090. 5

4.4. Вибір силових трансформаторів

Для вибору кількості і потужності силових трансформаторів визначаємо розрахункове повне навантаження за формулою:

$$S_p = \sqrt{\sum P_p^2 + \sum Q_p^2}, \text{кВА}$$

де $\sum P_p^2$, $\sum Q_p^2$ – суми реактивних і активних потужностей.

$$S_p = \sqrt{29571,8^2 + 23090,88^2} = 37519,06, \text{кВА}$$

Визначаємо розрахункову потужність трансформатора:

$$S_n = \frac{K_{зм} \times S_p}{n \times K_3}, \text{кВА}$$

де $K_{зм}=0,9$ – середньо змінне завантаження трансформатора;

S_p – розрахункова потужність, кВА;

$N=2$ – кількість трансформаторів;

$K_3=0,7$ – завантаженість трансформаторів.

Тоді

$$S = \frac{0,9 \times 37519,06}{2 \times 0,7} = 24119,4, \text{кВА}$$

Підбір кількості та типу трансформаторного обладнання для головної понижувальної підстанції здійснюється з урахуванням розрахункового електричного навантаження та категорійності споживачів згідно з нормативними вимогами.

Оскільки до підстанції підключені споживачі першої та другої категорій надійності, відповідно до вимог ПУЕ передбачається встановлення двох силових трансформаторів. Така конфігурація дозволяє забезпечити резервування живлення у разі виходу з ладу одного з трансформаторів.

Для встановлення обрано силові трансформатори типу ТРДН-32000/150, які забезпечують необхідну потужність та відповідають вимогам до експлуатації на даному об'єкті.

Технічна характеристика трансформатора ТРДН- 32000/150	
Потужність, МВА	32
Напруга обмоток, кВ	158
висока напруга	10,5
низька напруга	6,3
Втрати, кВт холостого ходу P_{xx}	35
короткого замикання $P_{кз}$	145

Напруга короткого замикання U_k , %	10,5
Струм холостого ходу I_{xx} , %	0,7

4.5. Розрахунок струмів короткого замикання

У системах електропостачання промислових об'єктів можуть виникати порушення у роботі через пошкодження ізоляції, старіння обладнання або помилки з боку персоналу. Найбільш поширеним і небезпечним видом аварійних ситуацій є коротке замикання (КЗ).

Для мінімізації технічних та економічних наслідків, пов'язаних із протіканням струмів КЗ, а також для забезпечення оперативного відновлення електропостачання, необхідно точно розрахувати параметри струмів короткого замикання. На основі цих даних виконується вибір відповідного електрообладнання, засобів захисту та обмеження струму.

У межах розрахунків приймається трифазне коротке замикання, яке вважається найгіршим режимом з точки зору впливу на енергосистему.

Розрахунок струмів при трьохфазному КЗ виконуємо в наступній послідовності. Складаємо розрахункову схему (рис. 4.5.1) та по ній схему заміщення (рис.4.5.2).

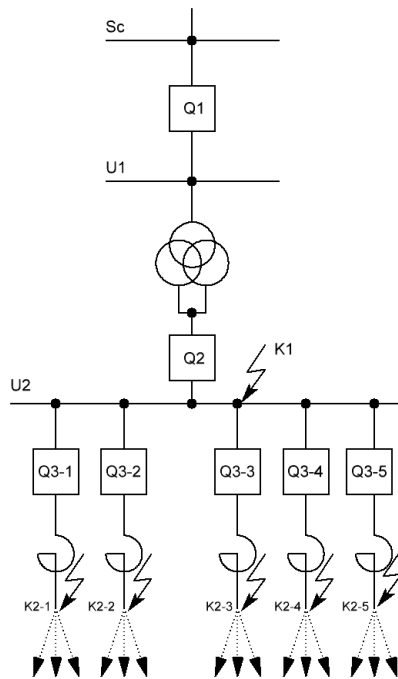


Рис. 4.5.1 Розрахункова схема для визначення струмів К.З.

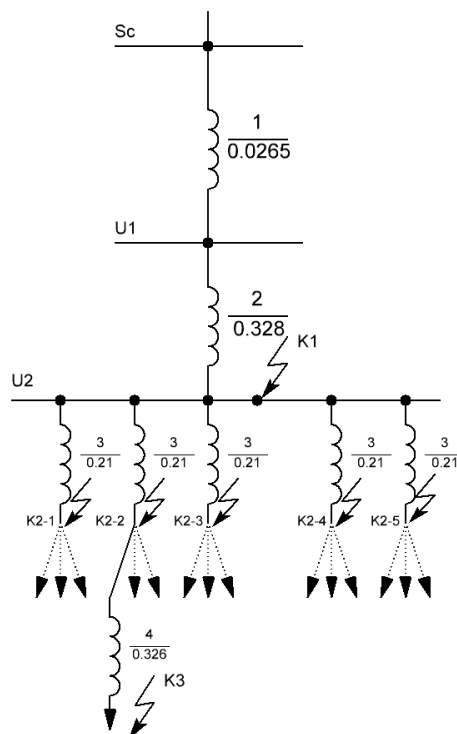


Рис. 4.5.2 Схема заміщення розрахункової схеми К.З.

Для визначення опорів елементів схеми в відносних одиницях приймаємо $S_6=100$ МВА; $U_{61} = 154$ кВ; $U_{62} = 6,3$ кВ.

Визначаємо базові струми:

$$I_{\delta 1} = \frac{S_{\delta}}{\sqrt{3}U_{ном}} = \frac{100}{\sqrt{3} \times 162} = 0,36 \text{ кА}$$

$$I_{\delta 2} = \frac{S_{\delta}}{\sqrt{3}U_{ном}} = \frac{100}{\sqrt{3} \times 6,3} = 9,2 \text{ кА}$$

Визначаємо опір живлячої системи:

На підстанції "Первомайська" встановлені трансформатори

АТДЦТН – 250000/330/158/10,5;38,5.

$$U_k = \begin{pmatrix} I - II & BH - CH & 9,5\% \\ I - III & BH - HH & 74\% \\ II - III & CH - HH & 60\% \end{pmatrix}$$

Опір системи знаходимо за формулою:

$$X_c = 0,5 \frac{U_k(I - II) + U_k(I - III) - U_k(II - III)}{100} \times \frac{S_{\delta}^I}{S_H^I} \times \frac{100}{S_{\Pi}}$$

$S_{\Pi}\% = 80\%$ енергії витрачається на перетворення 158 кВ.

$$X_c = 0,5 \frac{9,5 + 60 - 70}{100} \times \frac{100}{250} \times \frac{100}{80} = 0,0122 \text{ Ом}$$

Визначаємо опір повітряної лінії:

$$X_1 = X_0 \times l_1 \frac{S_{\delta}}{U_{ном}^2}$$

де 100 МВА – базова потужність ;

$X_0 = 0,4 \text{ Ом/км}$ – питомий опір довжини лінії;

$L_1 = 17,4 \text{ км}$ – довжина ПЛ – 150 кВ;

АС – 120 – марка проводу.

Тоді

$$X_1 = 0,4 \times 17,4 \frac{100}{162^2} = 0,0265 \text{ Ом}$$

Визначаємо опір трансформатора ТРДН – 32000/150:

$$X_{тх} = X_{в-н} \times \frac{S_{\delta}}{S_H}$$

$$X_{тх} = 0,105 \frac{100}{32} = 0,328 \text{ Ом}$$

Визначаємо базисний струм для ступені $U_{\text{ном}}=162$ кВ:

$$I_{\delta} = \frac{S_{\delta}}{\sqrt{3}U_{\text{ном}}} = \frac{100}{\sqrt{3} \times 162} = 0,36 \text{ кА}$$

Базисний струм для ступені $U_{\text{ном}}=6,3$ кВ:

$$I_{\delta} = \frac{S_{\delta}}{\sqrt{3}U_{\text{нн}}} = \frac{100}{\sqrt{3} \times 6,3} = 9,2 \text{ кА}$$

Визначаємо сумарний індуктивний опір від системи до точки K_1 :

$$X_1 + X_T + X_C = 0,0122 + 0,328 + 0,0265 = 0,367$$

Визначаємо струм К.З. в точці K_1 :

$$I_{K1} = \frac{I_{\delta}}{X_1 + X_T + X_C} = 25,1 \text{ кА}$$

Тоді ударний струм:

$$I_y = I_{K1} \times 2,55 = 25,1 \times 2,55 = 63,9 \text{ кА}$$

Потужність короткого замкнення:

$$S_{K1} = \frac{S_{\delta}}{X_1 + X_T + X_C} = 272,5$$

Визначаємо опір реактора:

$$X_{\delta} = \frac{\% \times I_{\delta} \times U_{\text{ном}}}{I_N \times U_{\delta}} = 0,21$$

Індуктивний опір лінії 4 – ї ступені:

$$X_2 = X_0 \times L_2 \frac{S_{\delta}}{U_{\text{ном}}^2} = 0,326$$

Визначаємо сумарний індуктивний опір до точки K_2 :

$$X_1 + X_T + X_C + X_{\delta} = 0,577$$

Визначаємо струми К.З. в точці K_2 :

$$I_{K2} = \frac{I_{\delta 2}}{X_1 + X_T + X_C + X_{\delta}} = \frac{9,2}{0,577} = 15,9 \text{ кА}$$

$$I_{y2} = 2,55 \times I_{K2} = 2,55 \times 15,9 = 40,66 \text{ кА}$$

Опір до точки K_3 :

$$X_1 + X_T + X_C + X_{\delta} + X_2 = 0,903$$

Струм К.З в точці К₃:

$$I_{K33} = \frac{I\delta 2}{X_1 + X_T + X_c + X_2} = \frac{9,2}{0,903} = 10,19 \text{ кА}$$