

Електромеханічне обладнання обертової печі в умовах цементного заводу ПАТ «Хайдельбергцемент Кривий Ріг»

Бондаренко Олександр Віталійович

ЕЕМ-22-1

Керівник Титюк Валерій Костянтинович

Розділ 1. ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБ'ЄКТУ МОДЕРНІЗАЦІЇ ТА ЙОГО ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ

1.1 Основні відомості про пічний агрегат СМЦ-26

У виробництві цементу печі складають основну частину технологічного обладнання. Від роботи печей у великій мірі залежить продуктивність цементних заводів. При випіканні цементного клінкеру здійснюються найбільш складні технологічні та теплотехнічні процеси, що мають вирішальне значення для отримання високоякісного цементу. Отримання високих температур у печах та ефективне використання теплової енергії завжди пов'язане з вирішенням цілого ряду питань пічної теплотехніки. Пічна теплотехніка виконує важливу роль у справі технічного прогресу цементного виробництва, пов'язаного із створенням високопродуктивних і економічно працюючих конструкцій печей. Основним типом печей для випіку цементного клінкеру є обертові печі [1].

В умовах цементного заводу ПАО «Хайдельбергцемент Кривий Ріг» встановлений пічний агрегат СМЦ-26 за сухим способом виробництва. В табл. 1.1 приведені технічні характеристики печі.

Пічний агрегат СМЦ-26 оснащений циклонним теплообмінником, що забезпечує найбільшу ступінь декарбонізації, яка досягає 35-40%. Дана піч характеризується простотою конструкції, надійністю в роботі і забезпечує низьку витрату тепла на обпik клінкеру.

При сухому способі вихідні сировинні матеріали надходять в технологічний процес з природною вологістю.

Таблиця 1.1 – Технічна характеристика обертової печі СМЦ-26

Найменування параметрів, одиниці виміру	Значення
Продуктивність печі по клінкеру, т/ч: гарантована	125
Розміри печі, м: діаметр	4,5
довжина	80
Нахил, %:	4
Кількість опор, шт:	4
Тип підшипників опор	кочення
Регулювання положення корпусу печі на опорах	Системою гідроупорів
Кількість гідроупорів, шт:	3
Швидкість обертання печі, об/хв:	0,6-3,5
Регулювання швидкості печі	Плавне, безступінчасте
Установлена потужність електродвигуна печі, кВт: головного	400
допоміжного	37
мікропривода	3
Маса печі, т:	1050
Маса футеровки, т: корпуса печі	617,8
розвантажувальної головки печі	43,4
Технологічне паливо основне	мазут
резервне	природний газ
Питома витрата тепла з урахуванням витрат в циклонному теплообміннику і реакторі декарбонізатора, ккал/кг:	830
Коефіцієнт використання печі (за календарний час) не менше	0,9

В основному обпалювальному агрегаті – обертівій печі при сухому способі виробництва за ходом руху матеріалу виділяють зони: I - випаровування, II - підігріву та дегідратації, III - декарбонізації, IV – екзотермічних реакцій, V - спікання, VI - охолодження. Підготовчі зони I - II займають 50...60% довжини печі, зона декарбонізації - 20...25%, зона екзотермічних реакцій - 7...10%, зона спікання - 10...15% і зона охолодження - 2...4% довжини печі.

У зоні підігріву при температурі 200...650°C вигорають органічні домішки і починаються процеси дегідратації і розкладання глинистого компонента. Зневоднення і розпад на оксиди водних алюмосилікатів кальцію призводить до утворення ряду проміжних сполук, які помітно впливають в подальшому на швидкість зв'язування CaO.

У зоні декарбонізації при температурі 900...1200°C відбувається дисоціація карбонатів кальцію і магнію з утворенням вільних CaO і MgO. Одночасно триває розпад глинистих мінералів. У зоні екзотермічних реакцій при температурі 1200–1300°C завершується процес твердофазового спікання матеріалу. В результаті утворюються мінерали $3CaO \times Al_2O_3$; $4CaO \times Al_2O_3 \times Fe_2O_3$ і $2CaO \times SiO_2$. Однак у суміші залишається деяка кількість вільного вапна, необхідне для насичення двокальцієвого силікату до трикальцієвого (аліта).

У зоні спікання при температурі 1300 – 1450°C відбувається часткове плавлення матеріалу, що починається в поверхневих шарах зерен, а потім поступово розповсюджується до їх центру. Час повного засвоєння оксиду кальцію і утворення аліта в зоні спікання становить 20 – 30 хвилин.

У зоні охолодження температура клінкера знижується з 1300 до 1000 – 1100°C. Частина рідкої фази при цьому кристалізується з виділенням кристалів клінкерних мінералів, а частина твердне у вигляді скла. Межі зон в обертівій печі достатньо умовні і нестабільні. Змінюючи режим роботи печі, можна змінювати межі і довжину зон і тим самим регулювати процес обпіку.

Апарат для теплової обробки працює за принципом протитечії, що пов'язано з більшою різницею температури теплоносія і матеріалу в таких апаратах і відповідно більшою швидкістю теплообміну, що дозволяє скоротити тривалість обпіку.

Тепловими агрегатом у виробництві клінкеру є обертова піч, загальний вигляд якої зображений на рис. 1.1.

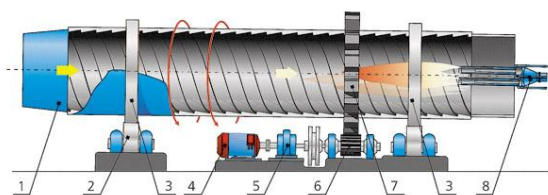


Рисунок 1.1 – Обертова піч СМЦ-26

1 - корпус; 2 - опорна станція; 3 - опорний бандаж; 4 - двигун; 5 - редуктор; 6 - приводна шестерня; 7 - зубчастий вінець; 8 - палинковий пристрій.

Піч являє собою сталевий барабан, який складається з обичайок (відкритий циліндричний елемент конструкції), з'єднаних зварюванням, і має внутрішню футеровку з вогнетривкого матеріалу. Профіль печі строго циліндричний. Піч спирається на опорну станцію, яка в свою чергу складається з кованої осі, опорних роликів встановлених в підшипниках, змонтованих на рамі, закріпленій на бетонному фундаменті.

Опорний ролик складається з сталевого литого циліндричної форми тіла. Підшипники з вкладишами і маслогінними кільцями, вільно надіті на вісь. На опорних роликах застосовують підшипники ковзання з рідким мастилом за допомогою маслогінних кілець, які зачерпують масло з нижньої частини підшипника і подають його на вісь ролика.

У точках опори на піч встановлюють сталеві бандажі. Бандажі обертової печі представляють собою масивні кільця прямокутного перерізу, за допомогою яких тиск маси печі передається на опорні ролики. В однієї з опор встановлюють два контрольних ролика, з лівого і правого боку бандажа, для спостереження за переміщенням печі.

Піч, встановлена під кутом 4° до горизонту, обертається з частотою $0,6 - 3,5$ об/хв. Сировина надходить в піч з верхнього (холодного) кінця, а з боку нижнього (гарячого) кінця дмувається паливно-повітряна суміш, згорає протягом $20 - 30$ м довжини печі. Гарячі гази, переміщуючись зі швидкістю $2 - 13$ м/с назустріч матеріалу, нагрівають останній до необхідної температури. Тривалість перебування матеріалу в печі залежить від її частоти обертання і кута нахилу. Зайнятий матеріалом перетин в обертовій печі складає лише $7 - 15\%$ обсягу, що є наслідком високого термічного опору русійного шару і пояснюється як малою теплопровідністю частинок випалювального матеріалу, так і слабким перемішуванням їх в шарі.

Факел полум'я і гарячі гази нагрівають як поверхневий шар матеріалу, так і футеровку печі. Футеровка, в свою чергу, віддає одержувану теплоту матеріалу проміневиpromінюванням, а також шляхом безпосереднього контакту. При кожному обороті печі в процесі зіткнення з газовим потоком температура поверхні футеровки підвищується, а при контакті з матеріалом знижується. Таким чином, матеріал сприймає теплоту лише у двох випадках: або коли стикається з нагрітою поверхнею футеровки, або коли знаходиться на поверхні шару. Продуктивність обертової печі залежить від обсягу внутрішньої частини, кута нахилу печі до горизонту і частоти обертання, температури і швидкості руху газів, якості сировини та ряду інших факторів.

Важлива перевага обертової печі - її технологічна універсальність, обумовлена можливістю використовувати сировинні матеріали різних видів.

1.2 Привод обертової печі СМЦ-26

Приводний механізм виконаний у вигляді електродвигуна, головного редуктора ЦДН – 2300 – 24, 42 (технічна характеристика наведена у табл. 1.2) і приводної шестерні, яка знаходиться в зачепленні з зубчастим вінцем.

Таблиця 1.2 – Технічна характеристика редуктора ЦДН – 2300 – 24, 42

Технічна характеристика						
Ступень	Модуль m_n	Число зубів z_1 / z_2	Передаточне число		Кут нахилу зубів β_o	Максимальний робочий момент m
			Ступені	Загальне		
I	12,5	20/111	5,55	24,42	24°31'59"	15
II	20	25/110	4,40		15°21'32"	

Для обертання печі під час ремонту або проведення футеровочних робіт служить допоміжний привод з електродвигуном потужністю 37 кВт и допоміжним редуктором, який надає печі частоту обертання 1 – 4 об/хв. Усі з'єднання виконуються за допомогою муфт.

Кінематична схема приводного механізму оберткової печі СМЦ-26 приведена на рис. 1.2.

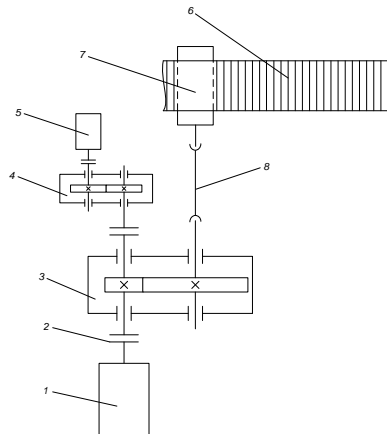


Рисунок 1.2 – Кінематична схема приводного механізму оберткової печі СМЦ-26

1 – приводний електродвигун; 2 – муфта; 3 – головний редуктор ЦДН – 2300 – 24, 42; 4 – допоміжний редуктор; 5 – електродвигун допоміжного приводу; 6 – зубчатий вінець; 7 – привідна шестерня; 8 – проміжний вал.

Загальний вигляд приводного механізму наведений на рис. 1.3:

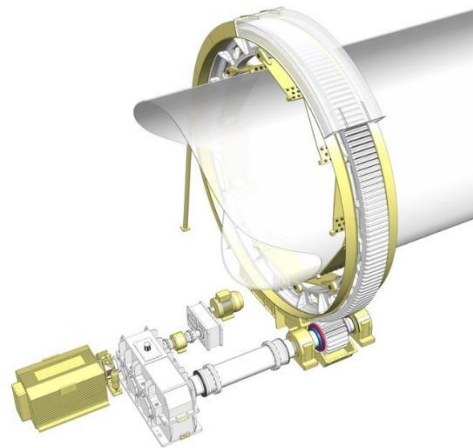


Рисунок 1.3 – Загальний вигляд приводного механізму оберткової печі СМЦ-26

1.3 Обґрунтування і вибір системи електропривода

Система електропривода печі повинна забезпечувати виконання наступних потреб:

1. необхідний діапазон регулювання швидкості робочої машини, згідно з технічними характеристиками;
2. плавний пуск і гальмування;
3. мінімум втрат енергії в перехідних режимах;
4. необхідну перевантажувальну здатність;
5. жорсткі статичні характеристики;
6. високі енергетичні показники;
7. не реверсивний привод;
8. надійність експлуатації.

Виходячи з перерахованих вище вимог, їх задоволення може забезпечити такі системи електроприводу як: ТП-Д і ПЧ-АД. Далі розглянемо їх переваги і недоліки.

1.3.1. Система ТП-Д.

Переваги:

1. високий ККД за рахунок малих втрат напруги на випрямних елементах;
2. простота та точність регулювання швидкості в широкому діапазоні;
3. жорсткі статичні характеристики;
4. плавність регулювання;
5. безшумність в роботі;
6. простота в обслуговуванні і експлуатації.

Недоліки:

1. напруга і струм на якорі мають пульсуючий характер, що погіршують умови роботи двигуна;
2. робота ТП характеризується режимом переривчастого струму, при якому різко падає жорсткість характеристик і вони стають не лінійними;
3. з ростом діапазону регулювання швидкості знижується коефіцієнт потужності;
4. ТП вносить спотворення в форму струму и напруги джерела живлення, що негативно впливає на роботу інших електроприймачів.

1.3.2. Система ПЧ-АД.

Переваги:

1. регулювання швидкості здійснюється плавно, в широкому діапазоні, в обидві сторони від природної характеристики;
2. характеристики мають високу жорсткість;
3. висока перевантажувальна здатність;
4. частотне регулювання не супроводжується виділенням додаткових втрат потужності, так як робота двигуна виконується при невеликих ковзаннях.

Недоліки:

1. старіння конденсаторів головного кола;
2. висока ціна ПЧ великої потужності;
3. ПЧ є джерелом перешкод.

Отже, по основному ряду переваг обидві системи задовольняють вимоги до електроприводу, але беручи до уваги, що в реальних умовах виробництва, приводним двигуном механізму являється двигун постійного струму незалежного збудження і заміна його на асинхронний двигун з короткозамкненим ротором є економічно недостатньо обґрунтованим і технічно не доцільним, то використання системи електроприводу ТП-Д повністю виправдано.

1.4 Розрахунок потужності і вибір приводного двигуна

При обертанні правильно зібраної і нормально працюючої печі потужність її приводного електродвигуна витрачається в більшій мірі на корисну роботу: підйом матеріалу на певну висоту, сповзаючи з якої, він переміщується і поступово переміщається до розвантажувального кінця, і в меншій мірі - на подолання

шкідливих опорів. До останніх відносяться: тертя ковзання між поверхнями цапф опорних роликів і вкладишів підшипників, тертя кочення бандажів по опорних роликам, тертя в приводному механізмі і тертя решт корпусу печі по поверхні деталей ущільнювальних пристроїв.

Розрахунок потужності електродвигуна привода обертової печі виконується за формулою [3]:

$$N = \frac{1}{\eta} (0,55LR^3n\sin^3\alpha + 4,76f r_{ц} m) \quad , \text{кВт} \quad (1.1)$$

де η - ККД двигуна;

L - довжина корпусу обертової печі, м;

R - внутрішній радіус обертової печі, м;

n - частота обертання обертової печі, об/с;

α - кут нахилу обертової печі, град;

$f = 0,227$ - коефіцієнт ковзання між цапфами роликів і вкладишами підшипників;

$r_{ц}$ - радіус цапфи роликів, м;

m - загальна маса печі, т.

З формули (1.1) невідомим залишається маса печі, розрахунок якої виконується згідно формули (1.2):

$$m = m_{к} + m_{ф} + m_{вш} + m_{б} + m_{ор} + m_{м} \quad , \text{т} \quad (1.2)$$

де $m_{к}$ - маса корпусу, т;

$m_{ф}$ - маса футеровки, т;

$m_{вш}$ - маса зубчатого вінця, т;

$m_{б}$ - маса бандажу, т;

$m_{ор}$ - маса опорних роликів, т;

$m_{м}$ - маса матеріалу, т.

З технічної характеристики (табл. 1.1) відомі параметри: $m_{к}$, $m_{ф}$, знайдемо $m_{вш}$, $m_{б}$, $m_{ор}$ згідно формули:

$$m_{вш} + m_{б} + m_{ор} = 0,46m_{к} = 0,46 \cdot 1050 = 483 \quad \text{т} \quad (1.3)$$

Відповідно до формули (1.4) знайдемо $m_{м}$:

$$m_{м} = k\pi R^2 L \gamma = 0,1 \cdot 3,14 \cdot 2,25^2 \cdot 80 \cdot 1,2 = 152,681 \quad \text{т} \quad (1.4)$$

де k - коефіцієнт заповнення ($k=0,1$);

γ - питома маса матеріалу (приймають $\gamma=1,2 \text{ Т / М}^3$), Т / М^3 .

Знайдемо загальну масу печі відповідно до формули (1.2):

$$m = 1050 + 483 + 152,681 + 617,8 = 2303 \quad \text{т}$$

Отже, знайдемо розрахункову потужність приводного електродвигуна відповідно до формули (1.1):

$$N = \frac{1}{0,92} \cdot (0,55 \cdot 80 \cdot 2,25^3 \cdot 0,043 \cdot \sin^3 46^\circ + 4,76 \cdot 0,277 \cdot 3,375 \cdot 2303 \cdot 0,043) = 398,997 \quad \text{кВт}$$

Перевірочний розрахунок потужності приводного електродвигуна збігається з потужністю двигуна згідно з технічною характеристикою обертової печі СМЦ-26. Але в умовах даного цементного заводу вста-

новлений двигун з завищеною потужністю. Це обумовлено подальшою модернізацією і нарощуванням продуктивності обертової печі.

В ролі приводного двигуна обертової печі СМЦ-26 використаний електродвигун постійного струму незалежного збудження типу П2П 500 – 144 – 8У, виготовлений в конструктивному виконанні ІМ1002, зі ступенем захисту ІР22, заводський номер ДООП178. Основні технічні дані і характеристики якого наведені у табл. 1.3.

Таблиця 1.3 – Основні технічні дані і характеристики приводного двигуна П2П 500 – 144 – 8У.

Найменування	Номінальні дані
Потужність, кВт	500
Напруга, В	440
Струм якоря, А	1225
Частота обертання (ном./макс.) об/хв	630/1000
Збудження незалежне, В	150/75
Струм збудження, А	12/24
Коефіцієнт корисної дії	92,54
Напрямок обертання зі сторони колектора	ліве
Режим роботи	S1
Клас ізоляції	F
Щітки марки ЭГ – 74 Розмір 2(12,5 x 32)	

Висновки до розділу 1

У першому розділі було розглянуто характеристику технологічного процесу та об'єкту модернізації – обертової печі СМЦ-26. Наведено відомості щодо конструкції як самої обертової печі СМЦ-26, так і склад електромеханічного обладнання, задіяного як в технологічному процесі, так і при ремонтних роботах.

У результаті порівняння техніко-економічних властивостей сучасних систем регульованого електроприводу було обрано електропривод за системою «тиристорний перетворювач – двигун постійного струму». Заміну існуючого електроприводу постійного струму на асинхронний двигун з короткозамкненим ротором визнано економічно недостатньо обґрунтованим і технічно не доцільним.

У якості електроприводу обертової печі СМЦ-26 обрано двигун постійного струму незалежного збудження типу П2П 500 – 144 – 8У потужністю 500 кВт та частотою обертання 630 об/хв.

Розділ 2. АНАЛІЗ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ОБЕРТОВОЇ ПЕЧІ СМЦ-26

2.1 Розробка схеми силової частини ЕП та вибір обладнання

2.1.1 Розробка та опис структурної схеми ТП-Д

Основною системою регульованого електроприводу з двигуном постійного струму є система ТП-Д (тиристорний перетворювач - двигун постійного струму) з фазовим управлінням. Тиристорний перетворювач в схемах електроприводу постійного струму виконує дві функції: випрямлення змінної напруги мережі живлення і регулювання середньої величини випрямленої напруги. Регулювання середньої величини випрямленої напруги здійснюється регулюванням кута включення вентилів α в провідній частині періоду змінної напруги. Якщо змінювати кут α відносно початку синусоїди напруги на анодах тиристорів, то відповідно змінюється середнє значення випрямленої напруги. Структурна схема системи ТП-Д зображена на рис. 2.1.

Двигун постійного струму Д отримує живлення від тиристорного перетворювача ТП 1, який в свою чергу отримує живлення від трифазної високовольтної мережі змінного струму через понижувальний трансформатор Т, перетворює напругу живлення змінного струму U_m в випрямлену напругу $U_{я}$, прикладену до якоря двигуна. Для згладжування пульсацій струму в колі якоря включено згладжувальний реактор Р. Випрямлена напруга $U_{я}$ залежить від кута регулювання, протиЕРС навантаження, струму навантаження, спаду напруги на елементах силової частини перетворювача.

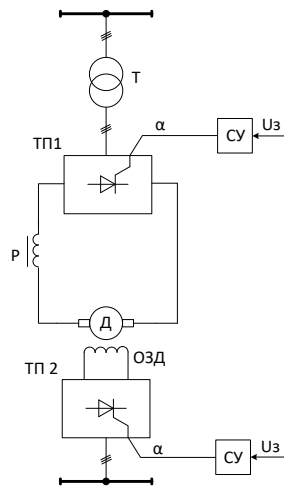


Рисунок 2.1 – Структурна схема ЕП за системою ТП-Д

Управління випрямлячем здійснюється за допомоги системи управління СУ, яка подає імпульси для відкриття тиристорів на їх керуючий електрод в моменти часу згідно з заданим кутом керування.

Живлення обмотки незалежного збудження ОЗД здійснюється від тиристорного збудника ТП 2, який в свою чергу живиться від низьковольтної мережі змінного струму. Управління тиристорним збудником також здійснюється від системи управління СУ.

Можливість регулювання напруги обмотки збудження U_z дає змогу стабілізувати або утримувати на заданому рівні швидкість обертання двигуна, при суттєвому спаді напруги мережі U_m , яка живить тиристорний перетворювач ТП 1.

2.1.2 Вибір перетворювача якірного кола та тиристорного збуджувача

Потужність тиристорного перетворювача і його номінальні параметри, а саме струм та напруга живлення повинні бути більші або рівні аналогічним параметрам приводного двигуна ($I_{я} = 1225$ А, $U_{ном} = 440$ В, $P_{ном} = 500$ кВт).

$$P_{тпр} \geq P_{ном}; U_{тпр} \geq U_{ном}; I_{тпр} \geq I_{н}.$$

Даним умовам відповідає перетворювач фірми АВВ серії DCS800-S01-1500-04+s164. В табл. 2.1 наведено основні технічні параметри перетворювача.

Таблиця 2.1 – Технічна характеристика перетворювача DCS800-S01-1500-04+s164

$U_{вих}$, В	$I_{вих}$, А	$P_{вих}$, кВт	$f_{ном}$, Гц
230-400	1500	698	50 або 60

Схема включення: трифазна мостова;

Управління в двох квадрантах механічної характеристики.

Маса: 110 кг

Розміри: 1050x510x410 мм

Вибір тиристорного збуджувача виконується відносно номінальних параметрів обмотки збудження двигуна постійного струму ($I_{ОЗ} = 24$ А, $U_{ОЗ} = 75$ В), за тими співвідношеннями, що і при виборі тиристорного перетворювача:

$$U_{ТЗ} \geq U_{ОЗ}; I_{ТЗ} \geq I_{ОЗ}.$$

Оскільки в комплекті випрямляча DCS800-S01-1500-04+s164 є вбудований збуджувач SDCS-FEX-425 $I_{ТЗ} = 25$ А, то обираємо даний збуджувач.

2.1.3 Вибір силового трансформатора коля живлення якоря

Вибір трансформатора [6] виконується з умови забезпечення номінальної напруги на якорі двигуна при допустимих коливаннях напруги мережі (-10% +15%) і номінальному струмі якоря.

Для вибору трансформатора визначають лінійну напругу вентиляційної (вторинної) обмотки трансформатора за відношенням:

$$U_{2т} = \sqrt{3} \frac{k_R}{k_U \cdot k_C} U_n = \sqrt{3} \cdot \frac{1,05}{2,34 \cdot 0,85} \cdot 440 = 402 \quad \text{В} \quad (2.1)$$

де $k_R = 1,05$ - коефіцієнт, враховуючий спад напруги за рахунок комутації тиристорів, на активних опорах трансформатора, вентилів, згладжуючого реактора;

k_U - коефіцієнт схеми випрямляча (для трифазної мостової схеми $k_U = 2,34$);

k_C - коефіцієнт, враховуючий допустиме коливання напруги живлення (для промислових електричних мереж $k_C = 0,85$);

U_n - номінальна напруга живлення двигуна.

Коефіцієнт трансформації трансформатора:

$$k_m = \frac{U_{1т}}{U_{2т}} = \frac{6000}{402} \approx 15 \quad (2.2)$$

де $U_{1т}$ - номінальна лінійна напруга мережі (первинної) обмотки трансформатора.

Значення струму фази в колі живлення перетворювача (вторинної обмотки) при струмі навантаження I_n :

$$I_2 = k_I I_n = 0,82 \cdot 1225 = 1004 \quad \text{А} \quad (2.3)$$

де k_I - коефіцієнт схеми випрямлення струму (для трифазної мостової схеми $k_I = 0,82$);

I_n - номінальний струм двигуна.

Значення струму первинної обмотки:

$$I_1 = \frac{I_2}{k_m} = \frac{1004}{15} = 67,4 \quad \text{А} \quad (2.4)$$

Розрахунок значення типової потужності трансформатора:

$$S_m = \frac{\sqrt{3}(U_{1т} I_1 + U_{2т} I_2)}{2} = \frac{\sqrt{3} \cdot (6000 \cdot 67,4 + 402 \cdot 1004)}{2} \approx 700 \quad \text{кВА} \quad (2.5)$$

Користуючись отриманими розрахунковими даними вибираємо силовий трансформатор при $S_{mn} \geq S_m$. В тиристорних перетворювачах використовують трансформатори типу ТСН (трансформатор сухий для напівпровідникових випрямлячів відкритого виготовлення) і ТСЗН (захищеного виготовлення) [4]. Так як в умовах виробництва встановлено трансформатор ТСЗН – 1000/10УЗ, то у табл. 2.2 наведено основні технічні параметри:

Таблиця 2.2 – Технічна характеристика силового трансформатора ТСЗН – 1000/10УЗ

Номінальна потужність мережевої обмотки, кВА	Номінальна напруга обмоток, В		Струм вентиляційної обмотки, А	Частота, Гц	Втрати, к	
	мережевої	вентиляційної			xx	l
938	6000	415	1305	50	2,05	

2.1.4 Розрахунок використання згладжувального реактора

При розрахунку індуктивності згладжувального реактора [6] виходять з допустимого рівня пульсацій випрямленого струму в сталому режимі при номінальній напрузі на якорі. Зазвичай діюче значення основної гармоніки пульсацій вибираються в межах $g=2..15\%$ номінального струму двигуна. В подальшому розрахунку приймаємо $g=10\%$.

Для розрахунку необхідної індуктивності кола випрямленого струму L_d необхідно розрахувати невідомі величини.

Найбільше середнє значення протиЕРС перетворювача розраховується за:

$$U_{d0} = 1,35U_{2r} = 1,35 \cdot 402 = 542,7 \text{ В} \quad (2.6)$$

Кут керування перетворювача отримуємо за наступною формулою:

$$\alpha = \arccos\left(\frac{U_n}{U_{d0}}\right) = \frac{440}{542,7} = 35,83^\circ \quad (2.7)$$

Величина амплітуди основної гармоніки випрямленої напруги визначається:

$$U_{dm(1)} = \frac{2U_{d0} \cos \alpha}{m^2 - 1} \sqrt{1 + m^2 \operatorname{tg}^2 \alpha} =$$

$$= \frac{2 \cdot 542,7 \cdot \cos(35,87^\circ)}{6^2 - 1} \cdot \sqrt{1 + 6^2 \operatorname{tg}^2(35,87^\circ)} = 111,785 \text{ В} \quad (2.8)$$

де m - пульсність (для трифазної мостової схеми $m = 6$);

Необхідна індуктивність кола випрямленого струму L_d може бути розрахована за амплітудним значенням першої гармоніки випрямленої напруги $U_{dm(1)}$ і заданому коефіцієнті пульсацій g :

$$L_d = \frac{U_{dm(1)}}{m \cdot \Omega \cdot g \cdot I_n} = \frac{111,785}{6 \cdot 314 \cdot 0,1 \cdot 1225} = 4,841 \times 10^{-4} \text{ Гн} \quad (2.9)$$

де $\Omega = 2\pi f = 314 \text{ рад/с}$ - кутова швидкість мережевої напруги;

I_n - номінальний струм якоря.

Практично випрямлений струм протікає при трифазній мостовій схемі випрямлення через обмотку якоря і дві обмотки силового трансформатора. Індуктивний опір розсіяння цих обмоток приймає участь в згладжуванні пульсацій і величина індуктивності цих обмоток ($L_{\text{я}} + 2L_{\text{т}}$) повинна бути урахована при виборі згладжувального реактора.

Індуктивність обмотки якоря розраховується по формулі:

$$L_{\text{я}} = \frac{kU_n}{p_n \cdot \omega_n \cdot I_n} = \frac{0,6 \cdot 440}{2 \cdot 65,969 \cdot 1225} = 1,633 \times 10^{-3} \text{ Гн} \quad (2.10)$$

де p_n - число пар полюсів;

$$\omega_n = \frac{630}{9,55} = 65,969$$

рад/с - номінальна кутова швидкість обертання двигуна;

k - коефіцієнт, який приймається рівним $k=0,6$ для двигунів без компенсаційної обмотки.

Індуктивність обмотки трансформатора розраховують згідно каталожних даних трансформатора:

Повний опір трансформатору:

$$z_T = \frac{U_{2н} \cdot U_k \%}{I_{2н} \cdot 100} = \frac{415 \cdot 5,6}{1305 \cdot 100} = 0,018 \quad \text{Ом} \quad (2.11)$$

де $U_{2н}$ - номінальна напруга вторинної обмотки трансформатора;

U_k - напруга короткого замикання у %;

$I_{2н}$ - струм вторинної обмотки трансформатора.

Активний опір трансформатору:

$$r_T = \frac{\Delta P_{кз}}{3 \cdot I_{2н}^2} = \frac{8000}{3 \cdot 1305^2} = 1,566 \times 10^{-3} \quad \text{Ом} \quad (2.12)$$

де $\Delta P_{кз}$ - потужність втрат короткого замикання.

Реактивний опір трансформатору:

$$x_T = \sqrt{(z_T^2 - r_T^2)} = \sqrt{(0,018^2 - (1,566 \times 10^{-3})^2)} = 0,018 \quad \text{Ом} \quad (2.13)$$

Індуктивність обмотки трансформатора розраховується згідно наступної формули:

$$L_T = \frac{x_T}{2\pi f} = \frac{0,018}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 5,647 \times 10^{-5} \quad \text{Гн} \quad (2.14)$$

Оскільки індуктивність $L_d < L_{я} + 2L_T$, то встановлення згладжувального реактора непотрібно [4].

2.2 Розрахунок статичних і енергетичних характеристик привода

2.2.1 Складання схеми заміщення і розрахунок її параметрів

Розрахунок статичних характеристик приводу може виконуватись на основі схеми заміщення, яка наведена на рис. 2.2 [5]:

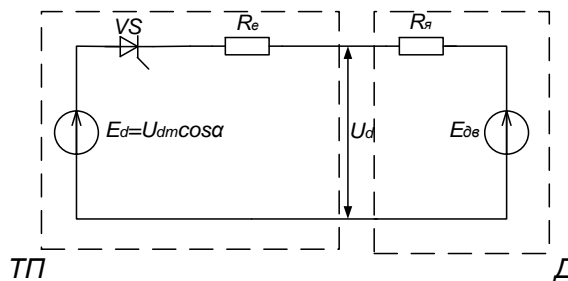


Рисунок 2.2 – Схема заміщення силової частини ТП-Д

На схемі заміщення позначено:

R_e - еквівалентний опір, враховуючий падіння напруги на двох обмотках трансформатора та зниження випрямленого ЕРС за рахунок комутаційних провалів;

$R_я$ - активний опір якоря;

E_d - випрямлене ЕРС перетворювача;

$E_{дв}$ - ЕРС двигуна.

Активний опір якоря двигуна:

$$R_я = 0,5 \frac{U_{я}}{I_{я}} (1 - \eta) = 0,5 \cdot \frac{440}{1225} \cdot (1 - 0,9254) = 0,013 \quad \text{Ом} \quad (2.15)$$

Активний опір комутаційних провалів:

$$R_{\gamma} = \frac{m \cdot x_T}{2\pi} = \frac{6 \cdot 0,018}{2 \cdot 3,14} = 0,017 \quad \text{Ом} \quad (2.16)$$

Сумарний опір ярірного кола системи ТП-Д:

$$R_{\Sigma} = R_{\alpha} + R_{\gamma} + 2 \cdot r_T = 0,013 + 0,017 + 2 \cdot 1,566 \cdot 10^{-3} = 0,033 \quad \text{Ом} \quad (2.17)$$

2.2.2 Розрахунок і аналіз статичних швидкісних і механічних характеристик

Номінальний магнітний потік:

$$\kappa\Phi_{\text{н}} = \frac{U_{\text{н}} - I_{\text{н}} R_{\Sigma}}{\omega_{\text{н}}} = \frac{440 \cdot 1225 \cdot 0,013}{65,969} = 6,421 \quad \text{В} \cdot \text{с} \quad (2.18)$$

Номінальний момент двигуна:

$$M_{\text{н}} = \frac{P_{\text{н}}}{\omega_{\text{н}}} = \frac{500 \cdot 10^3}{65,969} = 7579 \quad \text{Н} \cdot \text{м} \quad (2.19)$$

Мінімальний кут управління:

$$\begin{aligned} \alpha_{\min} &= \arccos \left[\frac{\left(\frac{M_{\text{н}} R_{\Sigma}}{\kappa\Phi_{\text{н}}} + \omega_{\text{н}} \right) \kappa\Phi_{\text{н}}}{1,35 U_{2\text{н}}} \right] = \\ &= \arccos \left[\frac{\left(\frac{7579 \cdot 0,033}{6,421^2} + 65,969 \right) \cdot 6,421}{1,35 \cdot 415} \right] = 34,25^{\circ} \end{aligned} \quad (2.20)$$

Максимальний кут управління:

$$\begin{aligned} \alpha_{\max} &= \arccos \left[\frac{\left(\frac{M_{\text{н}} R_{\Sigma}}{\kappa\Phi_{\text{н}}} + 0 \right) \kappa\Phi_{\text{н}}}{1,35 U_{2\text{н}}} \right] = \\ &= \arccos \left[\frac{\left(\frac{7579 \cdot 0,033}{6,421^2} + 0 \right) \cdot 6,421}{1,35 \cdot 415} \right] = 85,956^{\circ} \end{aligned} \quad (2.21)$$

Механічна характеристика двигуна розраховуються за формулою:

$$\omega_{\text{н}} = \frac{U_{d0} \cos(\alpha)}{\kappa\Phi_{\text{н}}} - \frac{M_c R_{\Sigma}}{\kappa\Phi_{\text{н}}^2} \quad (2.22)$$

де M_c - статичний момент на валу двигуна ($M_c = M_H$).

Сімейство механічних характеристик побудованих за формулою (2.22) наведено на рис. 2.3:

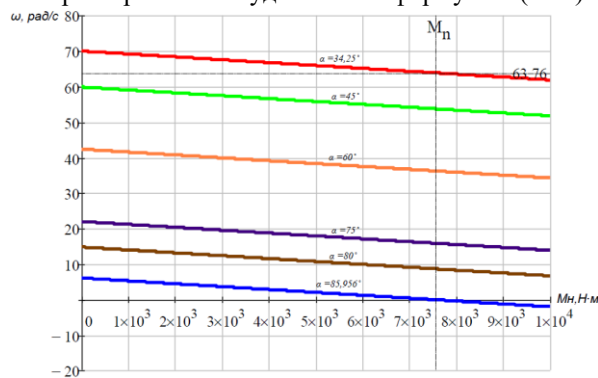


Рисунок 2.3 – Сімейство механічних характеристик при $\alpha = \text{var}$

У режимі неперервних струмів механічні характеристики електропривода в системі ТП-Д являють собою прямі лінії, нахил яких визначається величиною сумарного опору. Модуль жорсткості характеристик менше, ніж у природної характеристики двигуна у зв'язку зі збільшенням опором кола якоря. Це пояснюється насамперед відносно великою величиною складової опору перетворювача, обумовленою зниженням напруги в процесі комутації вентилів.

Даний спосіб регулювання забезпечує заданий діапазон регулювання швидкості, реалізує можливість плавного запуску двигуна.

Швидкісна характеристика двигуна розраховуються за формулою:

$$\omega_H = \frac{U_{d0} \cos(\alpha)}{\kappa \Phi_H} - \frac{I_d R_\Sigma}{\kappa \Phi_H} \quad (2.23)$$

де I_d - струм навантаження ($I_d = I_H$).

Сімейство швидкісних характеристик побудованих за формулою (2.23) наведено на рис. 2.4:

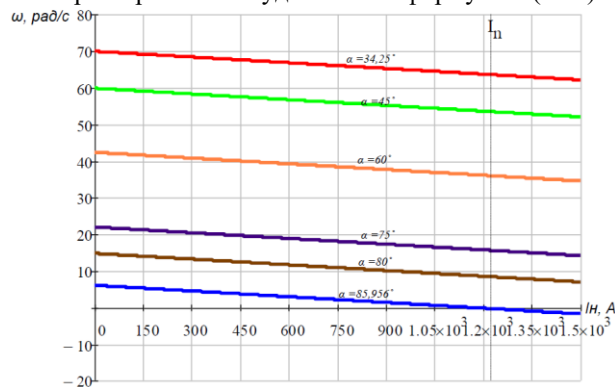


Рисунок 2.4 – Сімейство швидкісних характеристик при $\alpha = \text{var}$

При збільшенні кута керування, зменшується середнє значення випрямленої напруги відбувається обмеження пускового струму.

Декілька нижча швидкість обертання двигуна на швидкісних характеристиках обумовлено тим, що при розрахунку механічних характеристик враховувався момент на валу, а для швидкісних характеристик використовується струм який пов'язаний не з моментом на валу, а з моментом електромагнітним через потік.

З отриманих швидкісних характеристик визначимо статизм за швидкістю.

Статизм верхньої характеристики діапазону регулювання:

$$\delta_{\text{верх}} = \frac{I_H R_\Sigma}{U_{d0} \cos(\alpha)} \cdot 100\% = \frac{1225 \cdot 0,033}{542,7 \cdot \cos(34,25^\circ)} \cdot 100\% = 9,14\% \quad (2.24)$$

Статизм нижньої характеристики діапазону регулювання:

$$\delta_{\text{низ}} = \frac{I_{\text{н}} R_{\Sigma}}{U_{d0} \cos(\alpha)} \cdot 100\% = \frac{1225 \cdot 0,033}{542,7 \cdot \cos(85,956^{\circ})} \cdot 100\% = 17,82\% \quad (2.25)$$

2.2.3 Розрахунок та побудова сімейств енергетичних характеристик

Для електроприводу всіх систем ККД розраховується за формулою:

$$\eta = \frac{M_c \omega}{M_c \omega + \Delta P_{\Sigma}} \quad (2.26)$$

де ΔP_{Σ} - загальні втрати потужності в системі електроприводу, які знаходяться як сума постійних і змінних втрат:

$$\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_{\text{пост}} + \Delta P_{\text{пер}} \text{ Вт} \quad (2.27)$$

Для системи електроприводу ТП-Д постійні втрати потужності знаходяться за формулою:

$$\Delta P_{\text{пост}} = k_{\text{мех}} P_{\text{н}} \left(\frac{\omega}{\omega_{\text{н}}} \right) = 0,015 \cdot 500 \times 10^3 \cdot \left(\frac{63,477}{65,969} \right) = 6944 \text{ Вт} \quad (2.28)$$

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

Змінні втрати потужності знаходяться за формулою:

$$\Delta P_{\text{пер}} = I_d^2 R_{\text{екв}} \text{ Вт} \quad (2.29)$$

Еквівалентний опір:

$$R_{\text{екв}} = R_{\text{я}} + 2 \cdot r_{\text{т}} = 0,013 + 2 \cdot 1,566 \cdot 10^{-3} = 0,017 \text{ Ом} \quad (2.30)$$

У результаті усіх розрахунків отримуємо сімейство характеристик для залежності $\eta = f(M_c)$ для декількох значень моменту двигуна і декількох значень струму навантаження двигуна, які наведені на рис. 2.5:

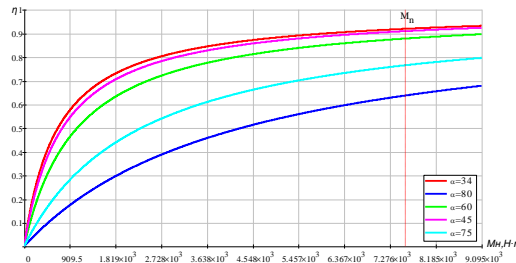


Рисунок 2.5 – Сімейство ККД при $M_c = \text{var}$

При збільшенні кута керування, зменшується швидкість обертання двигуна, відповідно знижується ККД, але при режимах близьких до номінального, ККД залишається високим, що пояснює високу енергоефективність даної системи.

Розрахунок коефіцієнта потужності установки розраховується згідно формули [6]:

$$K_{\text{п}} = \cos\left(\alpha + \frac{\gamma}{2}\right) K_{\text{в}} \quad (2.31)$$

де $K_{\text{в}} = 0,955$ - коефіцієнт викривлення;
 γ - кут комутації;

$$\gamma = \arccos\left(\cos\alpha - \frac{\sqrt{2}I_d x_T}{\sqrt{3}U_A}\right) - \alpha \quad (2.32)$$

де U_A - фазна напруга.

Побудуємо сімейство коефіцієнтів потужності при $\alpha = \text{var}$, $I_d = I_n$, $I_d = 0,2I_n$, $I_d = 1,2I_n$, які наведені на рис. 2.6:

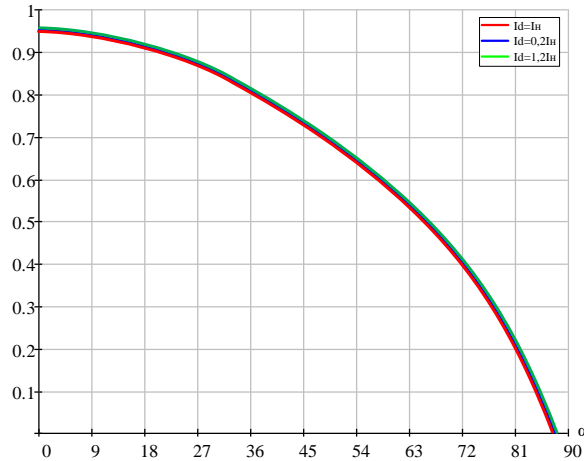


Рисунок 2.6 – Сімейство коефіцієнтів потужності при $\alpha = \text{var}$, $I_d = I_n$, $I_d = 0,2I_n$, $I_d = 1,2I_n$

Аналізуючи сімейство характеристик коефіцієнтів потужності (рис. 2.6) при різних струмах навантаження та кутах управління можна сказати, що зміна струму навантаження суттєво не впливає на коефіцієнт потужності і тому кутом комутації тиристорів при наближених розрахунках можна знехтувати. При зміні кута управління від мінімального до максимального коефіцієнт потужності істотно знижується, тобто відбувається збільшення споживання реактивної потужності.

2.3 Аналіз динамічних режимів роботи розімкненої системи електропривода

2.3.1 Складання та опис структурної схеми розімкненої системи ТП-Д

На рис. 2.7 представлена структурна схема розімкненої системи ТП-Д [5], в якій ДПС НЗ отримує живлення від керованого тиристорного перетворювача, що забезпечує регулювання моменту і швидкості двигуна шляхом зміни напруги на якорі. Для аналізу динамічних процесів цієї системи складають систему диференціальних рівнянь, що описують поведінку елементів системи електропривода в динаміці:

$$\begin{cases} E_d = k_{TP} U_y \\ E_d = E + I_n R_a + L_a \frac{dI}{dt} \\ E = \kappa \Phi_n \omega \\ M = \kappa \Phi_n I \\ M = M_c + J_\Sigma \frac{d\omega}{dt} \end{cases} \quad (2.33)$$

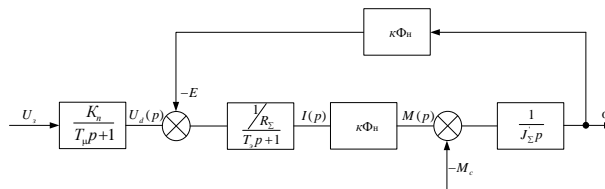


Рисунок 2.7 – Структурна схема системи ТП-Д

2.3.2 Розрахунок параметрів динамічної системи

Електромагнітна постійна кола якоря:

$$T_A = \frac{L_\Sigma}{R_\Sigma} = \frac{1,746 \times 10^{-3}}{0,033} = 0,052 \quad \text{с} \quad (2.34)$$

де L_Σ - сумарна індуктивність ($L_\Sigma = 1,746 \times 10^{-3}$ Гн)

Момент інерції двигуна:

$$J_{\text{дв}} = 0,00015 M_H^{1,5} = 0,00015 \cdot 7579^{1,5} = 98,978 \quad \text{кг} \cdot \text{м}^2 \quad (2.35)$$

Момент інерції механізму:

$$J_{\text{мех}} = \frac{GD^2}{4} = \frac{1711 \cdot 4,5^2}{4} = 8663 \quad \text{кг} \cdot \text{м}^2 \quad (2.36)$$

де G - маса обертової печі;

D - діаметр обертової печі.

За рахунок того, що приведений момент інерції редуктора досить малий, при розрахунках його не враховуємо.

Сумарний приведений момент інерції:

$$J'_\Sigma = 4 \cdot \left(J_{\text{дв}} + \frac{J_{\text{мех}}}{i^2} \right) = 4 \cdot \left(98,978 + \frac{8663}{24,42^2} \right) = 454,02 \quad \text{кг} \cdot \text{м}^2 \quad (2.37)$$

де i - передаточне число редуктора.

Електромеханічна стала часу електропривода:

$$T_M = \frac{J'_\Sigma R_\Sigma}{k\Phi^2} = \frac{454,02 \cdot 0,033}{6,421^2} = 0,369 \quad \text{с} \quad (2.38)$$

Коефіцієнт підсилення перетворювача:

$$K_n = \frac{U_{d0}}{U_K} = \frac{542,7}{10} = 54,27 \quad (2.39)$$

де U_K - номінальна напруга керування (приймається $U_K = 10$ В).

2.3.3 Моделювання розімкненої системи електропривода

Структурна схема ТП-Д, яка складена у програмному пакеті MatLab, наведена на рис. 2.8.

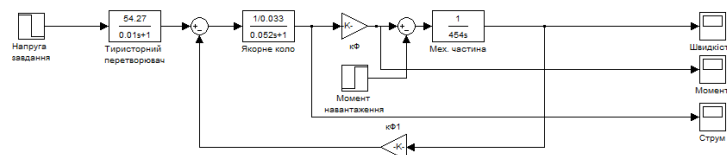


Рисунок 2.8 – Модель структурної схеми ТП-Д

Промодельюємо три режими роботи електроприводу печі за різних умов, та отримаємо відповідні графіки залежностей: $\omega = f(t)$, $M_c = f(t)$, $I_d = f(t)$.

1) Пуск під навантаженням при подачі на двигун номінальної напруги $U_3 = 10\text{В}$ при $M_c = 7576\text{ Н}\cdot\text{м}$, отримані графіки наведені на рис. 2.9-2.11:

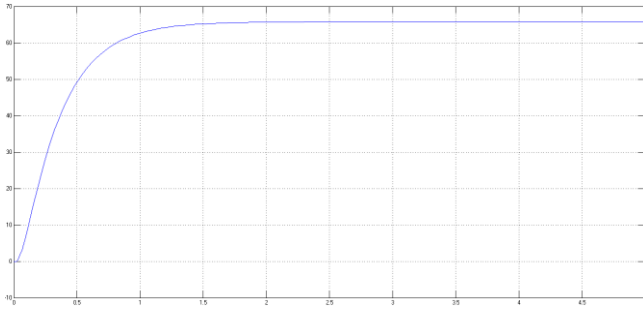


Рисунок 2.9 – Графік залежності $\omega = f(t)$

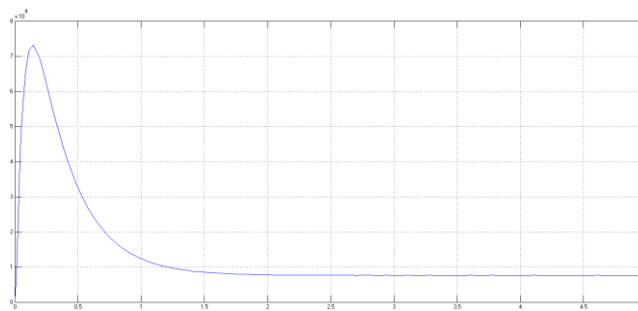


Рисунок 2.10 – Графік залежності $M_c = f(t)$

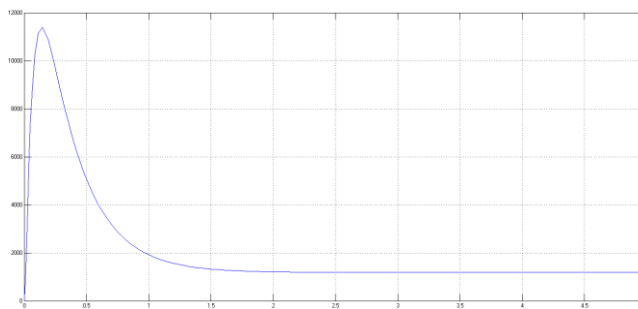


Рисунок 2.11 – Графік залежності $I_d = f(t)$

Аналіз вище наведених графіків показує, що при прямому пуску двигуна час перехідного процесу становить $t_n = 1,7\text{ с}$, перехідний процес є аперіодичним, кидок пускового моменту $M_{\max} = 73000\text{ Н}\cdot\text{м}$. Перевищення максимального моменту при пуску вказує на незадовільність цього режиму так як виникають суттєві динамічні удари, що пагубно впливають на двигун.

2) Пуск під навантаженням при подачі на двигун напруги $U_3 = 0 - 4 - 10\text{В}$ при $M_c = 7576\text{ Н}\cdot\text{м}$, отримані графіки наведені на рис. 2.12-2.14:

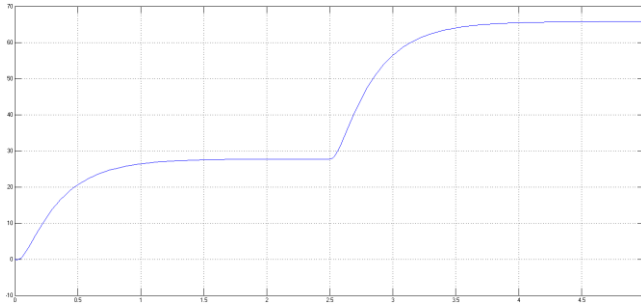


Рисунок 2.12 – Графік залежності $\omega = f(t)$

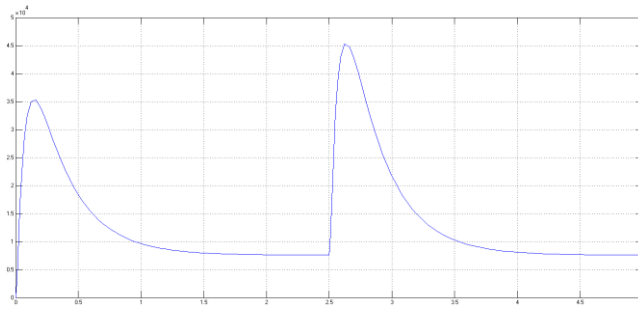


Рисунок 2.13 – Графік залежності $M_e = f(t)$

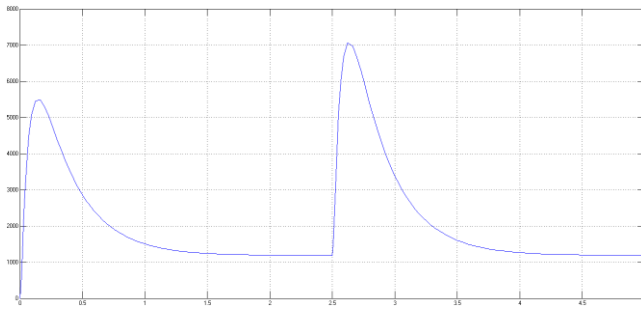


Рисунок 2.14 – Графік залежності $I_d = f(t)$

Ступінчате підвищення U_3 дозволяє плавно розганяти двигун і виходити на робочі характеристики, але за рахунок того що система розімкнута виникають великі динамічні удари, які не прийнятні для обладнання, а також технологічного процесу в цілому. Процес є аперіодичним.

3) Пуск під навантаженням при подачі на двигун напруги $U_3 = 10$ В при $M_c = 9849$ Н·м, отримані графіки наведені на рис. 2.15-2.17:

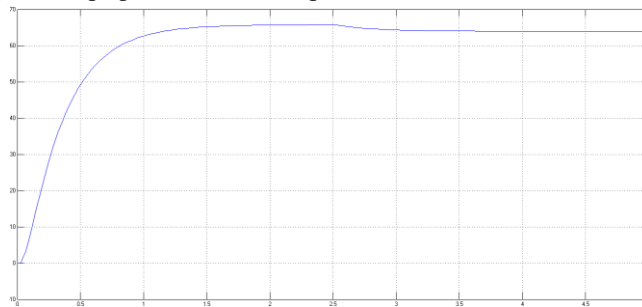


Рисунок 2.15 – Графік залежності $\omega = f(t)$

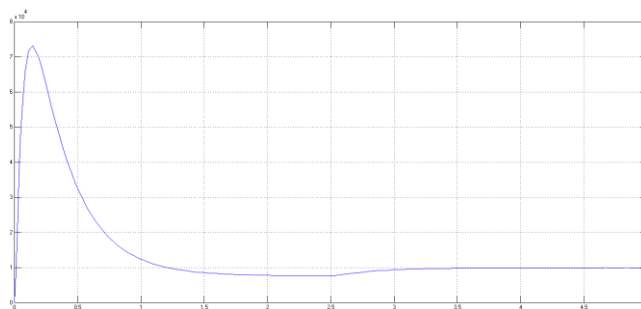


Рисунок 2.16 – Графік залежності $M_c = f(t)$

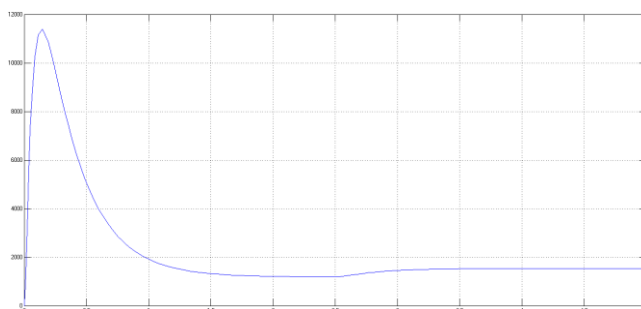


Рисунок 2.17 – Графік залежності $I_d = f(t)$

При підвищенні статичного моменту в 1,3 рази збільшився пусковий струм та момент і зменшилася швидкість обертання. При цьому забезпечується відповідно до технологічного процесу мінімальна швидкість обертання 0,6 об/хв, що дозволяє продовжити його без аварійної зупинки, або спрацювання автоматичного захисту, так як система розрахована на задане перевантаження. Перехідний процес є аперіодичним.

2.4 Аналіз динамічних режимів роботи замкненої системи електропривода

2.4.1 Обґрунтування і вибір системи керування електроприводом

Для регулювання змінних параметрів електроприводу обираємо систему підлеглого регулювання.

В систему підлеглого регулювання закладений принцип, коли зовнішній контур може, по відношенню до наступного, виступати як внутрішній контур і т.д. Такий принцип побудови визначає, що внутрішній контур підпорядкований зовнішньому контуру. Дві головні переваги визначають широке поширення систем підлеглого регулювання.

1. Простота розрахунку і налаштування. Система розбивається на ряд контурів. Кожен контур включає в себе регулятор, за рахунок додання якому певних динамічних властивостей виходить стандартна характеристика. Налаштування в процесі наладки системи ведеться, починаючи з внутрішнього контуру. Оскільки передавальні функції регуляторів контурів прості, а оцінка якості регулювання здійснюється по виду перехідного процесу при стрибку керуючого впливу, настройка не викликає утруднення.

2. Зручність обмеження граничних значень проміжних координат системи. Оскільки вихідний сигнал зовнішнього регулятора визначає значення вихідної координати внутрішнього контуру, обмеження останньої здійснюється обмеженням вихідного сигналу регулятора зовнішнього контуру.

Функціональна схема системи керування електроприводом по системі ТП-Д з підлеглим регулюванням приведена на рис. 2.18.

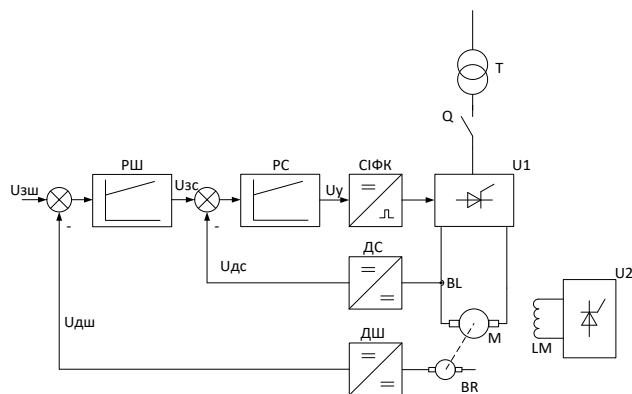


Рисунок 2.18 – Функціональна схема електропривода за системою ТП-Д

2.4.2 Розрахунок параметрів елементів системи керування електроприводом

Розрахунок регулятора струму:

Контур [9] струму двигуна налагоджується на модульний оптимум (МО), через що передавальна функція регулятора струму визначається:

$$G_{pm}(p) = \frac{R_e(T_e p + 1)}{2T_{\kappa} p k_{\kappa} k_{\delta c}} = \frac{0,033(0,052 p + 1)}{2 \cdot 0,01 p \cdot 54,27 \cdot 0,152} \quad (2.40)$$

де T_{κ} – незкомпенсована стала часу, для системи ТП-Д без внутрішнього контуру напруги $T_{\kappa} = T_n$;

k_{κ} – коефіцієнт передачі об'єкту регулювання, який для системи ТП-Д без внутрішнього контуру напруги $k_{\kappa} = k_n$;

$$k_{\delta c} = \frac{U_{\kappa}}{I_{\max}} = \frac{10}{1470} = 6,803 \times 10^{-3} \text{ - коефіцієнт датчика струму.}$$

Схема регулятора струму приведена на рис. 2.19:

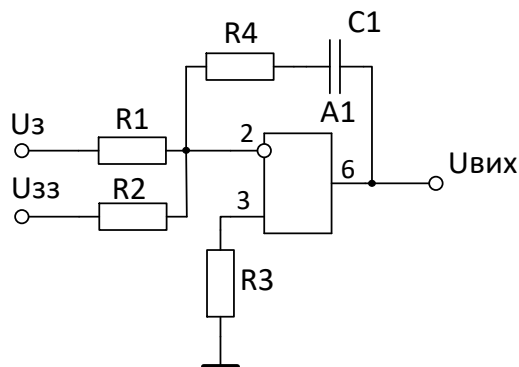


Рисунок 2.19 – Схема регулятора струму

Вибір [9] датчика струму виконується по максимальному струмі навантаження.

У якості датчика струму обираємо шунт 22M1500A50 технічна характеристика якого наведена в табл. 2.4:

Таблиця 2.4 – Технічна характеристика шунта 22M1500A50:

Виробник	Ram meter Inc.
Номер моделі	22M1500A50
Специфікація	-
Діапазон	1200-1500
Вихід	50 DC мВ
Тип шунта	Легкосплавний шунт

Номинальна точність	0,6%
Додаткові найменування	Відсутні

Розрахунок регулятора швидкості:

Передавальна функція регулятора швидкості [9] для модульного оптимуму визначається:

$$G_{pш}(p) = \frac{T_m k_{oc} k_{\Phi}}{2T_c R_e k_{\omega}} = \frac{0,052 \cdot 0,0068 \cdot 6,421}{2 \cdot 4 \cdot 0,01 \cdot 0,033 \cdot 0,152} = 11,321 \quad (2.41)$$

де $k_{oc} = \frac{U_{\kappa}}{\omega_n} = \frac{10}{65,96} = 0,152$ - коефіцієнт датчика швидкості;

$T_c = 2T_n$ - стала часу контуру струму.

Схема «ПІ» регулятора швидкості приведена на рис. 2.20:

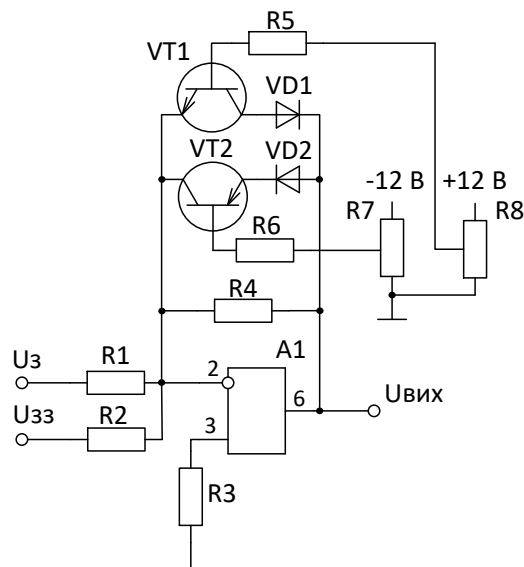


Рисунок 2.20 – Схема «ПІ» регулятора швидкості

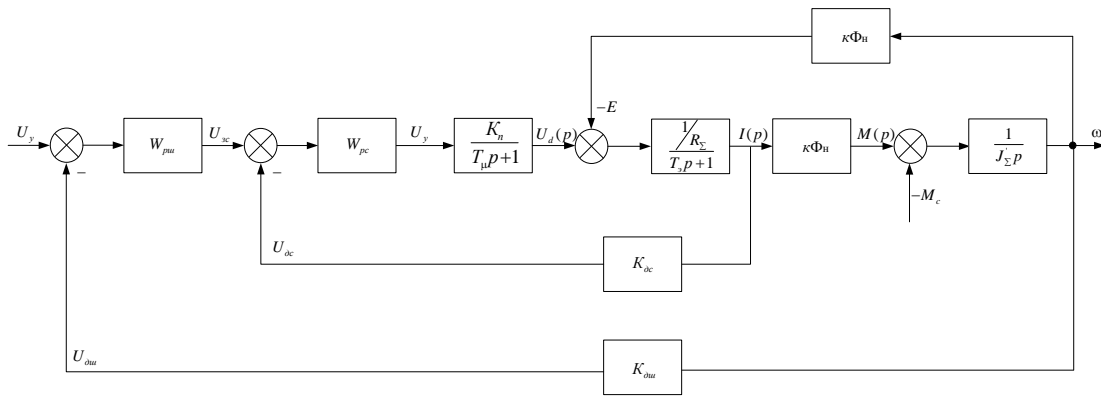
Вибір [9] датчика швидкості здійснюється на основі тахогенератора з номінальної швидкості двигуна за каталогами на електрообладнання:

$$\omega_{тр} \geq \omega_0$$

В якості датчика швидкості обираємо комплектний тахогенератор приводного двигуна типу ПТ32/1 УХЛ4.

2.4.3 Моделювання двоконтурної системи керування електроприводом

На основі функціональної схеми (рис. 2.18) побудуємо замкнуту систему керування з двома контурами, а саме по струму і швидкості. Замкнута структурна схема електропривода за системою ТП-Д наведено на рис. 2.21:



Рисунок

2.21 – Замкнута структурна схема електропривода за системою ТП-Д
Двоконтурна структурна схема ТП-Д, яка складена у програмному пакеті MatLab, наведена на рис.

2.22:

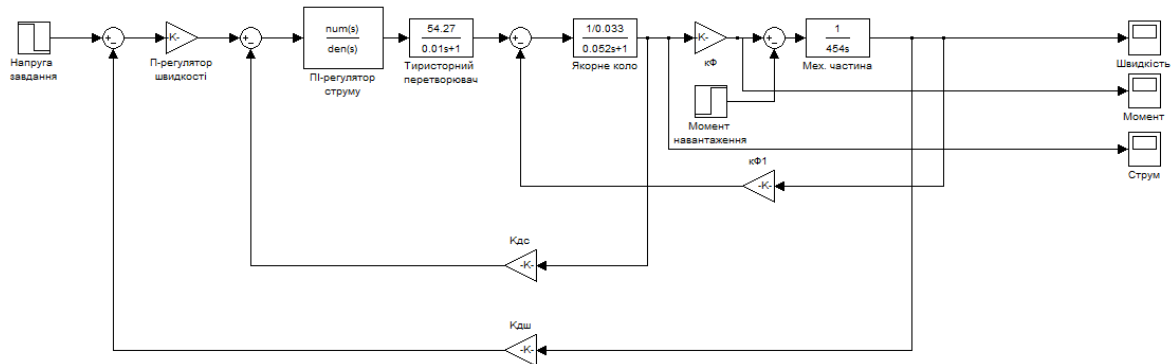


Рисунок 2.22 – Схема моделі двоконтурної системи регулювання (струму та швидкості) з задавачем швидкості

Промодельємо три режими роботи електроприводу печі за різних умов, та отримаємо відповідні графіки залежностей: $\omega = f(t)$, $M_c = f(t)$, $I_d = f(t)$.

1) Пуск під навантаженням при подачі на двигун номінальної напруги $U_s = 10$ В при $M_c = 7576 \text{ Н} \cdot \text{м}$, отримані графіки наведені на рис. 2.23-2.25:

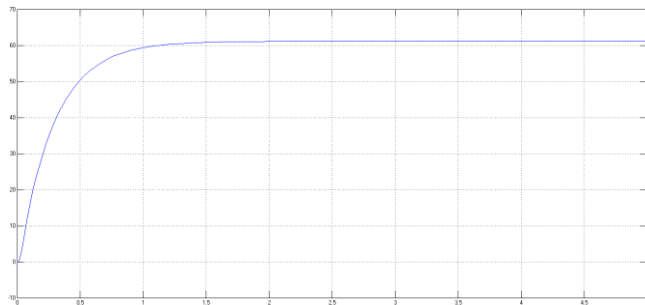


Рисунок 2.23 – Графік залежності $\omega = f(t)$

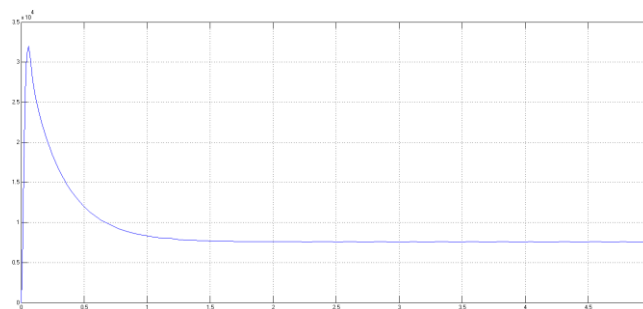


Рисунок 2.24 – Графік залежності $M_c = f(t)$

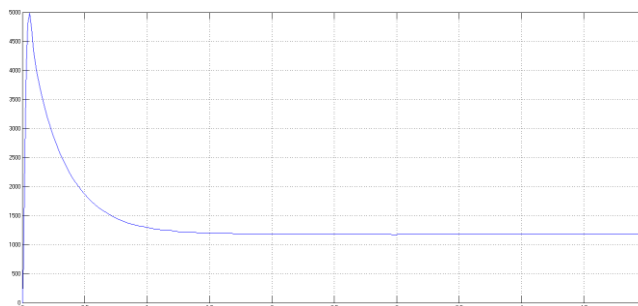


Рисунок 2.25 – Графік залежності $I_d = f(t)$

Аналіз вище наведених графіків показує, що при прямому пуску двигуна час перехідного процесу становить $t_n = 1,7$ с, перехідний процес є аперіодичним, кидок пускового моменту і струму у порівнянні з розімкненою системою зменшився, що вказує на підвищення якісних показників регулювання системи.

2) Пуск під навантаженням при подачі на двигун напруги $U_3 = 0 - 4 - 10$ В при $M_c = 7576$ Н·м, отримані графіки наведені на рис. 2.26-2.28:

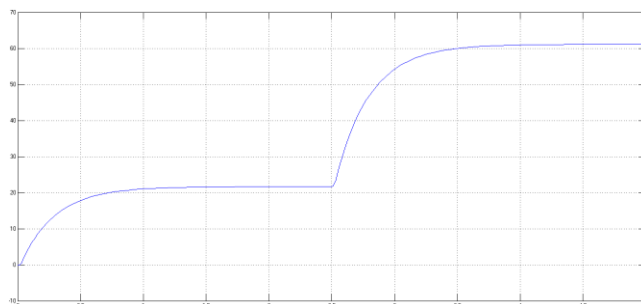


Рисунок 2.26 – Графік залежності $\omega = f(t)$

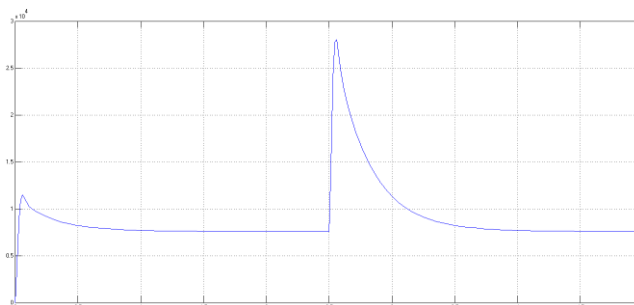


Рисунок 2.27 – Графік залежності $M_c = f(t)$

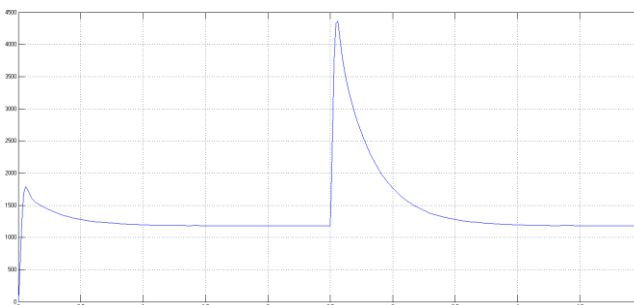


Рисунок 2.28 – Графік залежності $I_d = f(t)$

Ступінчасте підвищення U_3 дозволяє плавно розганяти двигун і виходити на робочі характеристики. Із застосуванням замкненої системи управління отримуємо прийнятні для обладнання, а також технологічного процесу всіляку характеристики. Процес є аперіодичним.

3) Пуск під навантаженням при подачі на двигун напруги $U_3 = 10$ В при $M_c = 9849$ Н·м, отримані графіки наведені на рис. 2.29-2.31:

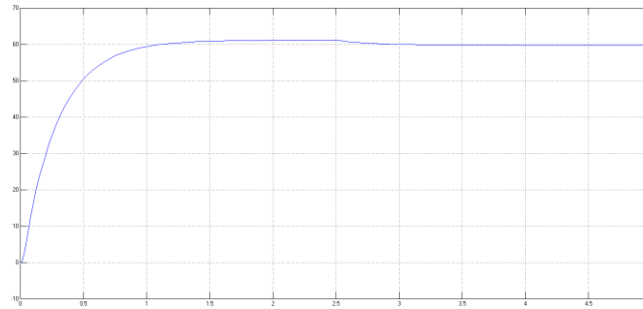


Рисунок 2.29 – Графік залежності $\omega = f(t)$

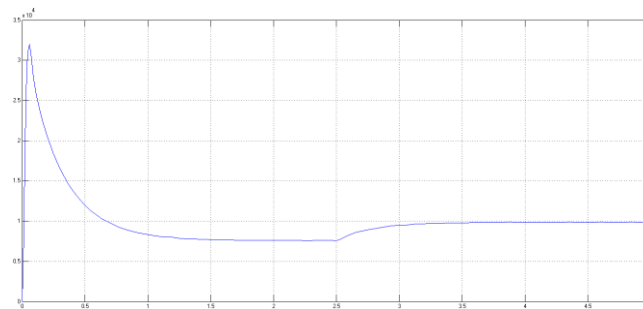


Рисунок 2.30 – Графік залежності $M_c = f(t)$

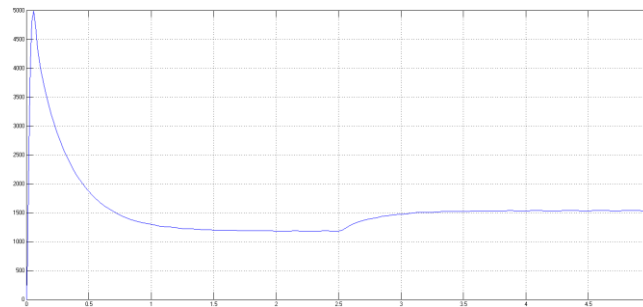


Рисунок 2.31 – Графік залежності $I_d = f(t)$

Як і по відношенню до розімкненої системи якісні показники суттєво покращились в даному режимі роботи електропривода. Перехідний процес є аперіодичним.

Висновки до розділу 2

В другому розділі було проведено розрахунок схеми заміщення електроприводу, розраховані і побудовані статичні характеристики приводу та виконаний їх аналіз на задоволення вимог до приводу обертової печі, наведених у розділі 1.

Розрахунок та побудова енергетичних характеристик електроприводу, дала змогу проаналізувати та обґрунтувати енергоефективність використаної системи, та впевнитись у її доцільному використанні.

Наступним кроком було обґрунтування обраної системи регулювання змінних параметрів електроприводу, розрахунок регуляторів струму та швидкості, налаштування їх на модульний оптимум, а також вибрані датчики струму і швидкості. Наведена функціональна схема системи керування, а також принципові схеми регуляторів.

Моделювання динамічних процесів замкненої системи керування дало змогу отримати графіки перехідних процесів. Їх аналіз показав якісні покращення відносно розімкненої системи, що свідчить про доцільність використання даної системи керування в обраному механізмі.

Переріз силового кабелю для з'єднання шини 6 кВ и обмотки високої напруги трансформатора:

$$S = \frac{1000 \cdot 10^3 \cdot 1600}{33 \cdot 0,02 \cdot 380} = 67,34 \text{ мм}^2$$

3.2 Розрахунок струмів короткого замикання

3.2.1 Розрахунок струмів короткого замикання на напругу вище 1 кВ

Відповідно до однолінійної силової схеми (рис. 3.1) побудуємо схему заміщення електропостачання головного електроприводу обертової печі і зазначимо ймовірні точки короткого замикання на різних рівнях напруги живлення.

На рис. 3.2 наведена схема заміщення електропостачання головного електроприводу обертової печі.

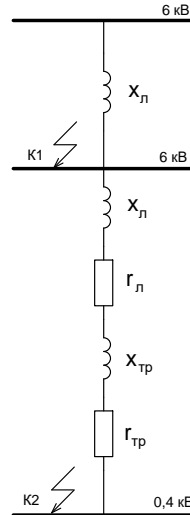


Рисунок 3.2 – Схема заміщення електропостачання головного електроприводу обертової печі

Проведемо розрахунок для точки короткого замикання K1.

Для розрахунку струмів короткого замикання використаємо метод базисних величин з необмеженим джерелом потужності [11]. Оберемо базисну потужність та напругу із ряду запропонованих значень:

$$S_{\sigma} = 100 \text{ МВА}, U_{\sigma} = 6,3 \text{ кВ}.$$

Розрахуємо базисний струм:

$$I_{\sigma} = \frac{S_{\sigma}}{\sqrt{3}U_{\sigma}} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 6,3} = 9,164 \quad (3.2)$$

За табличним значенням [10] приймаємо індуктивний опір лінії в залежності від перерізу кабелю $x_{01} = 0,819 \text{ Ом/км}$.

Розраховуємо індуктивний базисний опір лінії:

$$x_{\sigma 1} = \frac{x_{01} S_{\sigma} l}{U_{\sigma}^2} = \frac{0,0819 \cdot 1,6 \cdot 100}{6,3^2} = 0,33 \quad (3.3)$$

Сумарний індуктивний базисний опір:

$$x_{\sigma \Sigma 1} = x_{\sigma 1} = 0,33 \quad (3.4)$$

Струм короткого замикання у точці K1:

$$I_{\kappa 1} = \frac{I_{\bar{\sigma}}}{x_{\bar{\sigma}\Sigma 1}} = \frac{9,164}{0,33} = 27,757 \text{ кА} \quad (3.5)$$

За кривою [10] визначення коефіцієнта ударного струму маємо $k_{y1} = 1$. Отже, ударний струм має значення:

$$i_{y\partial 1} = k_{y1} \sqrt{2} I_{\kappa 1} = 1 \cdot \sqrt{2} \cdot 27,757 = 39,255 \text{ кА} \quad (3.6)$$

3.2.2 Розрахунок струмів короткого замикання на напругу нижче 1 кВ

Проведемо розрахунок для точки короткого замикання К2.

Активний та індуктивний опори лінії приймаємо за табличним значенням [10] в залежності від перерізу кабелю $r_{02} = 0,154$ Ом/км, $x_{02} = 0,06$ Ом/км.

Розрахуємо активний базисний опір:

$$r_{\bar{\sigma}2} = \frac{r_{02} S_{\bar{\sigma}} l}{U_{\bar{\sigma}}^2} = \frac{0,154 \cdot 0,031 \cdot 100}{0,4^2} = 2,984 \quad (3.7)$$

Індуктивний базисний опір:

$$x_{\bar{\sigma}2} = \frac{x_{02} S_{\bar{\sigma}} l}{U_{\bar{\sigma}}^2} = \frac{0,06 \cdot 0,031 \cdot 100}{0,4^2} = 1,162 \quad (3.8)$$

Активний базисний опір трансформатора:

$$r_{\bar{\sigma}mp} = \frac{\Delta P_{ном}}{S_{ном}} = \frac{2,05}{1000} = 0,00205 \quad (3.9)$$

Індуктивний базисний опір трансформатора:

$$x_{\bar{\sigma}mp} = \sqrt{u_{кз}^2 - r_{\bar{\sigma}mp}^2} = \sqrt{0,08^2 - 0,00205^2} = 0,56 \quad (3.10)$$

Сумарний активний базисний опір:

$$r_{\bar{\sigma}\Sigma 2} = r_{\bar{\sigma}2} + r_{\bar{\sigma}mp} = 2,984 + 0,00205 = 2,986 \quad (3.11)$$

Сумарний індуктивний базисний опір:

$$x_{\bar{\sigma}\Sigma 2} = x_{\bar{\sigma}\Sigma 1} + x_{\bar{\sigma}2} + x_{\bar{\sigma}mp} = 0,33 + 1,162 + 0,8 = 2,053 \quad (3.12)$$

Повний базисний опір:

$$z_{\bar{\sigma}\Sigma 2} = \sqrt{r_{\bar{\sigma}\Sigma 2}^2 + x_{\bar{\sigma}\Sigma 2}^2} = \sqrt{2,986^2 + 2,053^2} = 3,623 \quad (3.13)$$

Струм короткого замикання у точці К2:

$$I_{\kappa 2} = \frac{I_{\bar{\sigma}}}{z_{\bar{\sigma}\Sigma 2}} = \frac{9,164}{3,623} = 2,529 \text{ кА} \quad (3.14)$$

За кривою [10] визначення коефіцієнта ударного струму маємо $k_{y2} = 1,05$. Отже, ударний струм має значення:

$$i_{y\partial 2} = k_{y2} \sqrt{2} I_{\kappa 2} = 1,05 \cdot \sqrt{2} \cdot 2,529 = 3,756 \text{ кА} \quad (3.15)$$

3.3 Вибір провідникової та комутаційної апаратури

3.3.1 Вибір шин і ізоляторів

Шину розподільчих пристроїв обирають за номінальними параметрами, які відповідають нормальному режиму та умовам навколишнього середовища і перевіряють на електродинамічну стійкість.

Відповідно за номінальним струмом живлення $I_n = 1225$ А та напругою 6 кВ обираємо за табличним значенням [12] алюмінієву шину 100x8 мм² з допустимим струмом навантаження $I_{доп}=1600$ А, відстань між фазами $a=200$ мм, відстань між ізоляторами у прольоті $l=2500$ мм.

Проведемо перевірку шин на електродинамічну стійкість.

Розраховуємо момент опору:

$$W = \frac{bh^2}{6} = \frac{0,8 \cdot 10^2}{6} = 13,34 \text{ см}^3 \quad (3.16)$$

Найбільша напруга у металі при згинанні:

$$\sigma_p = \frac{\sqrt{3} \cdot 10^{-3} i_{yод}^2 l^2}{aW} = \frac{\sqrt{3} \cdot 10^{-3} \cdot 39,225^2 \cdot 250}{20 \cdot 13,34} = 625,54 \text{ кгс/см}^2 \quad (3.17)$$

Шина динамічно стійка, так як відповідає умові допустимої напруги на згинання:

$$\sigma_p \leq \sigma_{доп} = 625,54 \leq 700 \text{ кгс/см}^2 \quad (3.18)$$

Вибираємо опорні ізолятори ОФ-6-750 на номінальну напругу 6 кВ і з руйнівним навантаженням $F_{руйн}=750$ Н.

Проведемо перевірку ізоляції на механічне навантаження при к.з.:

$$F_{розр} = \sqrt{3} \cdot i_y^2 \cdot 10^{-2} \frac{l}{a} = \sqrt{3} \cdot (39,255)^2 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{2500}{250} = 266,901 \text{ Н} \quad (3.19)$$

За даною умовою визначимо механічну стійкість ізолятора:

$$F_{розр} \leq 0,6F_{руйн}$$

$$266,901 < 0,6 \cdot 750 \text{ Н}$$

$$266,901 < 450 \text{ Н}$$

Відповідно до умови, ізолятор витримає механічне навантаження.

3.3.2 Вибір комутаційної апаратури

Вибір високовольтного вимикача на напругу більше 1000 В виконується за номінальною напругою і струмом, конструктивним виконанням і місцем установки.

Для трансформатора обираємо автоматичних вимикач Е2В 1600 PR122/DC $I_n=1600$ А, 3 пол., викатного виконання, в складі: корзина Е2/Е W FP 3р 750 V DC HR-HR.

Для перетворювача обираємо вимикач навантаження ОТ1600Е03Р, 3 полюсний, $I_n=1600$ А.

3.3.3 Вибір провідникової апаратури

Відповідно до розрахованих за формулою (3.1) перерізів, обираємо кабелі:

1. для з'єднання обмотки низької напруги трансформатора і перетворювача обираємо силовий кабель ВВГнг 1x120 з мідними жилами;
2. для з'єднання шини 6 кВ и обмотки високої напруги трансформатора обираємо силовий кабель АВВГнг-6 3x70 з алюмінієвими жилами.

Висновки до розділу 3

У третьому розділі виконано необхідні розрахунки елементів системи електропостачання головного електроприводу обертової печі СМЦ-26.

Виконано розрахунок електричних навантажень, обрано силовий трансформатор для живлення силових кіл електроприводу обертової печі СМЦ-26.

Згідно з однолінійною схемою системи електропостачання, виконано розрахунок струмів короткого замикання, при виникненні аварійних режимів в мережі напругою вище 1 кВ та у мережі 0,4 кВ. На основі

розрахунків струмів короткого замикання було обрано провідникову продукцію та комутаційно-захисну апаратуру системи електропостачання головного електроприводу обертової печі СМЦ-26.