

Міністерство освіти і науки України
Криворізький національний університет
Електротехнічний факультет

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до кваліфікаційної роботи бакалавра

за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Модернізація електромеханічного обладнання пристрою вертикального руху
кисневої фурми ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг»

Здобувач групи ЗЕЕМ-22 _____ Іван ГЛАДУН

Керівник випускної роботи _____ к.т.н., доц. Олександр ІЛЬЧЕНКО

Нормоконтролер _____ к.т.н., доц. Олександр ІЛЬЧЕНКО

Декан ЕТФ _____ к.т.н., доц. Владислав ФЕДОТОВ

Гарант освітньої програми _____ к.т.н., доц. Ігор ПЕРЕСУНЬКО

Кривий Ріг

2026

Факультет: *електротехнічний*

Освітній рівень: *бакалавр*

Спеціальність: *141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка*

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ
ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ**

Гладуна Івана Михайловича

1. Тема роботи: Модернізація електромеханічного обладнання пристрою вертикального руху кисневої фурми ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг»
2. Строк подання здобувачем роботи: 10 червня 2026 р.
3. Мета та завдання кваліфікаційної роботи: удосконалення електромеханічної частини механізму вертикального руху кисневої фурми конвертера шляхом улаштування системи прямого керування моментом електроприводу на базі фаззи-контролерів задля підвищення точності позиціонування фурми
4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які необхідно розробити): характеристика електромеханічного обладнання кисневої фурми та механізму її вертикального руху; аналітичні прорахунки електромеханічного обладнання механізму вертикального руху кисневої фурми; створення системи прямого керування моментом електропривода механізму вертикального руху кисневої фурми
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): схематичний вигляд кисневого конвертера; схема частотного перетворювача SINAMICS G120 6SL3210-1PC31-8UL0; природні та штучні статичні характеристики 1LE1503-2DD6; загальна симуляційна модель прямого керування моментом електроприводу механізму вертикального руху фурми; динаміка електроприводу

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Консультант	Дата, підпис	
		Завдання видав	Завдання прийняв
I	Олександр ІЛЬЧЕНКО		
II	Олександр ІЛЬЧЕНКО		
III	Олександр ІЛЬЧЕНКО		

7. Календарний план

№	Етапи роботи	Термін виконання
1	Загальна частина	18.05.26–24.05.26
2	Спеціальна частина	25.05.26–30.05.26
3	Проектна розробка	31.05.26–31.05.26
4	Оформлення пояснювальної записки	01.06.26–09.06.26
5	Оформлення презентації	10.06.26–15.06.26

Дата видачі завдання: 18.05.2026 р.

Здобувач вищої освіти _____

Іван ГЛАДУН

Керівник роботи _____

Олександр ІЛЬЧЕНКО

Реферат

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи на тему «Модернізація електромеханічного обладнання пристрою вертикального руху кисневої фурми ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» містить 65 с., 20 рис., 5 табл., 12 літературних джерел.

У роботі розглянуто питання удосконалення системи керування електромеханічним обладнанням кисневої фурми конвертерного виробництва ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг», що є важливим елементом технологічного процесу виплавки сталі. Проведено аналіз особливостей функціонування кисневого конвертера та умов роботи механізму переміщення фурми, які характеризуються значними динамічними навантаженнями, високими температурами та підвищеними вимогами до точності позиціонування і надійності електропривода. У роботі обґрунтовано вибір структури електропривода вертикального руху фурми з використанням асинхронного електродвигуна та частотно-регульованого керування, що забезпечує широкий діапазон регулювання швидкості, плавність пуску і гальмування та підвищення енергоефективності системи.

Виконано розрахунок потужності електродвигуна приводу механізму переміщення фурми з урахуванням реальних навантажень і режимів роботи, на основі чого обрано електродвигун типу 1LE1503-2DD6 та частотний перетворювач SINAMICS G120. Проведено дослідження механічної частини системи, зокрема визначено моменти інерції елементів приводу, статичні та динамічні навантаження, а також побудовано діаграми швидкостей і моментів, що дозволило оцінити режими роботи механізму під час підйому та опускання фурми. Розраховано параметри заступної схеми асинхронного двигуна, виконано аналіз його статичних і електромеханічних характеристик у природному та регульованому режимах роботи.

Ключові слова: киснева фурма, електропривод, асинхронний двигун, частотний перетворювач, система керування, конвертерне виробництво, динамічні режими, механічні характеристики, електромеханічні характеристики, енергоефективність, позиціонування, перехідні процеси.

					КНУ.РБ.141.26.249с.02.Р	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		4

Зміст

РОЗДІЛ 1. ЗАГАЛЬНА ЧАСТИНА	8
1.1 Загальне описання конвертерного способу виробництва металу	9
1.1.1 Описання роботи конвертера.....	9
1.1.2 Шихтування	11
1.1.3 Періоди плавлення	11
1.2 Загальний опис процедури подачі кисню у кисневий конвертер.....	17
1.3 Пристрій подачі кисню в конвертер	21
1.4 Прорахунок електродвигуна приводу механізму вертикального руху фурми	24
1.5 Вибір частотного перетворювача для приводу механізму вертикального руху фурми	25
Висновок до розділу 1	28
РОЗДІЛ 2. СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА	29
2.1 Прорахунок діаграм моментів та швидкостей	30
2.2 Прорахунок параметрів заступної схеми електродвигуна вертикального руху фурми	35
2.2.1 Прорахунок доповнених параметрів електродвигуна.....	35
2.2.2 Прорахунок параметрів заступної схеми в номінальному режимі ..	36
2.3 Статика електродвигуна приводу руху кисневої фурми.....	39
2.4 Динаміка прямого пуску двигуна механізму вертикального руху кисневої фурми.....	41
Висновки до розділу 2	46
РОЗДІЛ 3. ПРОЄКТНА РОЗРОБКА	48
3.1 Опис системи управління електроприводом механізму вертикального руху кисневої фурми	49

					КНУ.РБ.141.26.249с.02.3	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		5

3.1.1	Пряме керування моментом асинхронного двигуна	49
3.1.2	Пряме керування моментом на базі фаззі-контролера.....	51
3.2	Розробка фаззі-контролера прямого керування моментом в системі управління електроприводом вертикального руху кисневої фурми	53
3.2.1	Вхідна змінна: похибка моменту	55
3.2.2	Вхідна змінна: похибка потокозчеплення	56
3.2.3	Вихідна змінна: керуючий вектор інвертора	56
3.3	Симуляція роботи системи прямого керування моментом електроприводу механізму вертикального руху фурми	58
	Висновки до розділу 3	61

Вступ

Киснева фурма застосовується для подавання повітря до конвертера під час металургійних процесів, причому умови її експлуатації є вкрай складними і створюють значне навантаження на всі елементи механізму. Для ефективної роботи необхідно забезпечити плавність регулювання руху, стабільність швидкісних параметрів, а також мінімізувати різкі прискорення та гальмування.

Досягнення таких характеристик можливе лише за умови використання якісної системи електроприводу, де для переміщення фурми зазвичай застосовується асинхронний двигун із короткозамкненим ротором. На практиці управління електроприводом часто здійснюється за допомогою релейно-контакторних схем, однак вони не завжди гарантують необхідну точність і надійність функціонування.

У зв'язку з розвитком мікропроцесорних технологій дедалі більшого поширення набувають системи частотного регулювання швидкості електродвигунів, що встановлюються на подібному обладнанні. Хоча існує значна кількість таких рішень, найкращі показники керування демонструють скалярні та векторні системи електроприводу. З огляду на це, розробка сучасної системи електроприводу для переміщення кисневої фурми конвертера у конвертерному цеху ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» є актуальним і важливим завданням.

					КНУ.РБ.141.26.249с.02.ВС	Арк.
						7
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

РОЗДІЛ 1. ЗАГАЛЬНА ЧАСТИНА

					КНУ.РБ.141.26.249с.02.3Ч		
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата	Загальна частина		
Розроб.	Гладун І.М.						
Перевір.	Ільченко О.В.						
Н.контр.	Ільченко О.В.						
Затверд.	Пересунько І.І.				ЗЕЕМ-22		
					Літ.	Аркуш	Аркушів
					Н	8	

1.1 Загальне описання конвертерного способу виробництва металу

Виплавка сталі у конвертері здійснюється шляхом продування розплавленого чавуну потоком чистого кисню з одночасним використанням обмеженої кількості металобрухту. Сам конвертер має форму грушоподібної ємності, внутрішня поверхня якої захищена вогнетривкою футерівкою. Через верхню частину в робочу зону опускається спеціальна фурма, за допомогою якої подається кисень. У процесі продування відбувається інтенсивне окислення вуглецю та домішок, що містяться в чавуні, внаслідок чого виділяється значна кількість тепла. Це сприяє підвищенню температури розплаву та забезпечує плавлення завантаженого брухту. Контрольоване введення кисню дозволяє ефективно регулювати тепловий режим і створює умови для формування сталі з потрібною якістю. Після завершення основних реакцій розплав випускають у ківш, де проводять остаточне коригування його хімічного складу відповідно до заданих вимог.

1.1.1 Описання роботи конвертера

Улаштування кисневого конвертера бачимо на рис. 1.1 [1].

Кисневі конвертери виготовляються у різних типорозмірах, що відрізняються вантажопідйомністю і можуть вміщувати від кількох десятків до кількох сотень тонн металу. Їхній корпус створюється шляхом зварювання листової сталі значної товщини, яка зазвичай коливається в межах від 20 до 110 мм, причому конструкція може бути як суцільною, так і передбачати знімне днище. У верхній частині циліндричного корпусу передбачено спеціальний отвір для випуску розплавленого металу. Найбільш вразливою до дії високих температур є горловина, оскільки саме вона піддається інтенсивному тепловому навантаженню, а також механічним пошкодженням коли видаляються застигли залишки металу та зливу шлаку, тому її додатково захищають масивним шоломом, виготовленим литим або зварним способом.

Внутрішній простір конвертера формується футерівкою, розміщеною всередині сталевого корпусу, причому її питомий об'єм становить приблизно 0,8...1,1 м³ на тонну металу. Така футерівка, як правило, складається з кількох

					КНУ.РБ.141.26.249с.02.34	Арк.
						9
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

шарів вогнетривких матеріалів, які забезпечують необхідний рівень термостійкості та довговічності агрегату. Для захисту бічних поверхонь застосовують дво- або тришарову конструкцію, де кожен шар виконує окрему функцію.

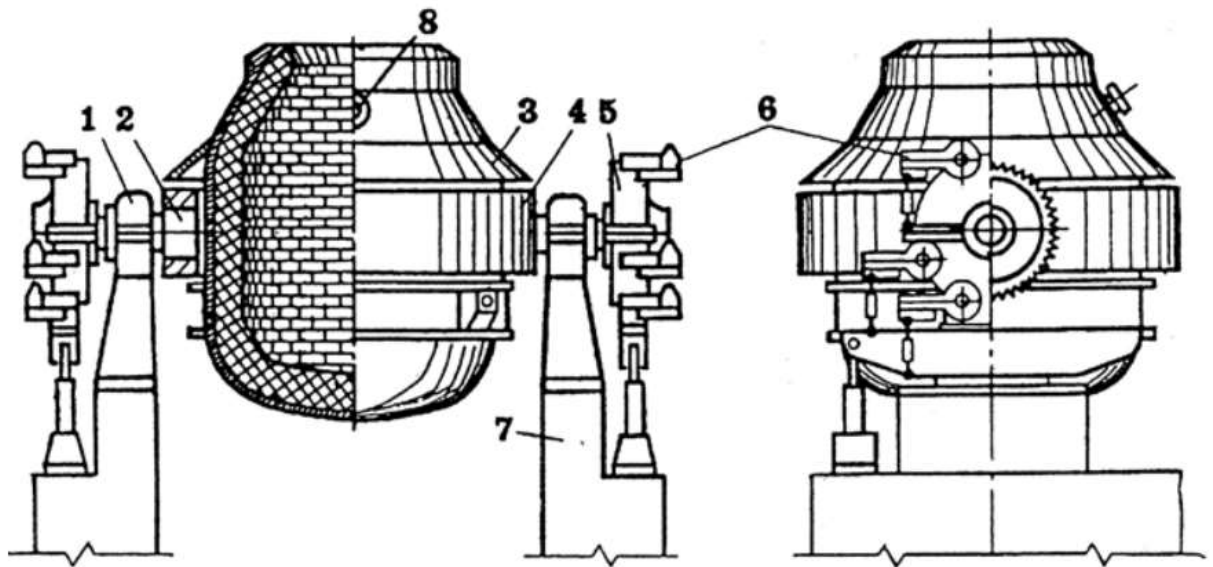


Рис. 1.1. Схематичний вигляд кисневого конвертера: «1 – підшипник; 2 – цапфа; 3 – кожух; 4 – кільце; 5 – колесо; 6 – двигун; 7 – станина; 8 – виливний отвір» [1]

Найнижчий, арматурний, слугує бар'єром між розплавом і металевим корпусом, запобігаючи його перегріванню та можливому прогару; для його створення використовують магнезитові, хромомагнезитові або периклазошпінелідні вогнетриви, які здатні працювати протягом кількох виробничих кампаній без заміни. Над ним розташовується проміжний шар, що формується набивним способом із вогнетривкої маси, подібної за складом до матеріалу робочого шару, і має товщину приблизно 50...100 мм. Зовнішній, робочий шар безпосередньо контактує з розплавом і тривалий час виготовлявся зі смолодоломітових матеріалів, проте в сучасних умовах перевагу надають периклазовуглецевим вогнетривам, які забезпечують значно вищу стійкість футерівки та дозволяють збільшити тривалість експлуатації конвертера до десятків тисяч расплавлень.

Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата

КНУ.РБ.141.26.249с.02.34

Арк.

10

1.1.2 Шихтування

Формування шихти, тобто визначення витрат чавуну, металобрухту, шлакоутворювальних і допоміжних матеріалів, здійснюється з урахуванням даних про хімічний склад вихідного чавуну та інших компонентів, його температури, а також вимог до кінцевих характеристик сталі. Кількість брухту, який виконує роль охолоджувача під час плавки, встановлюють на підставі теплового балансу процесу, коригуючи її таким чином, щоб наприкінці продувки забезпечити необхідну температуру розплаву, тоді як витрати вапна визначаються потребою досягнення заданої основності шлаку в межах 2,7...3,6.

Металобрухт подають у конвертер за допомогою спеціальних совків значного об'єму, які попередньо наповнюються у шихтовому відділенні та транспортуються до агрегатів рейковими візками. Завантаження здійснюється через горловину шляхом перекидання совка з використанням відповідних підйомних механізмів, при цьому конвертер нахиляють приблизно під кутом 45°, щоб шматки брухту не падали вертикально, а ковзали по футерівці, зменшуючи ризик її пошкодження. Розплавлений чавун подають у попередньо відхилений конвертер також через горловину за допомогою мостового крана і залитого ковша, який зазвичай містить повний об'єм металу для однієї плавки.

Для введення сипучих шлакоутворювальних матеріалів конвертер обладнаний спеціальними завантажувальними системами: поблизу агрегату розташовані бункери з необхідними компонентами, звідки вони за допомогою віброживильників і дозувальних пристроїв подаються до проміжного приймача, а далі через похилу трубу надходять у робочий простір через горловину. Подача цих матеріалів здійснюється у визначені технологічним графіком моменти, коли продувка не проводиться.

1.1.3 Періоди плавлення

На перебіг процесу продування істотно впливають положення фурми, зокрема відстань від її наконечника до поверхні металевої ванни, а також тиск поданого повітря. Як правило, фурму розміщують на висоті в межах 1...3 м, тоді

					КНУ.РБ.141.26.249с.02.34	Арк.
						11
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

як тиск повітря підтримується на рівні 0,9...1,4 Мпа, що залежить від виплавляємої марки сталі. Оптимальне положення фурми визначають експериментально, прагнучи забезпечити інтенсивне зневуглецювання та ефективне шлакоутворення без небажаних викидів.

Виплавка сталі в кисневому конвертері є послідовним процесом, який починається із завантаження металобрухту. Його частка зазвичай становить до 25–27% від загальної маси металеві шихти, а подача здійснюється у нахилений конвертер за допомогою спеціальних совків, об'єм яких підбирають так, щоб виконати операцію за один або два прийоми. Тривалість цього етапу зазвичай не перевищує кількох хвилин, і в окремих випадках для прискорення формування шлаку одразу після або навіть перед завантаженням брухту вводять певну кількість вапна. Після цього до конвертера заливають рідкий чавун температурою приблизно 1300...1450 °С, використовуючи один заливальний ківш, що дозволяє виконати операцію за короткий проміжок часу.

Після заповнення агрегату конвертер повертають у вертикальне положення, опускають фурму і розпочинають подачу кисню. На початковому етапі продування фурму утримують на більшій висоті, що сприяє активізації процесів шлакоутворення, а вже через кілька хвилин її поступово опускають до оптимального рівня, який визначається місткістю конвертера та особливостями технології. У першій частині продування в кілька прийомів додають вапно, а також за необхідності вводять інші добавки, такі як плавиковий шпат, залізна руда або окатиші. Кількість вапна регулюють таким чином, щоб забезпечити потрібну основність шлаку в межах 2,7...3,6, що зазвичай відповідає витратам близько 6...8% від маси отриманої сталі. Загальна тривалість продування, необхідна для досягнення бажаного вмісту вуглецю в металі, як правило, становить від 12 до 18 хвилин.

Раціонально організований режим продування забезпечує інтенсивну циркуляцію розплаву та його ефективне перемішування зі шлаком, що, у свою чергу, прискорює окислення основних домішок чавуну, зокрема кремнію, вуглецю, марганцю та фосфору. Під час цього процесу відбувається взаємодія

					КНУ.РБ.141.26.249с.02.34	Арк.
						12
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

рідкого металу з киснем, який подається через фурму, внаслідок чого перш за все окислюється надлишковий вуглець, значна частина марганцю, а також незначна кількість заліза. Окислення домішок може відбуватися як безпосередньо газоподібним киснем, так і за участю кисню, розчиненого в металі та шлаку.

За умов високої інтенсивності подачі кисню процес окислення значною мірою обмежується перенесенням домішок із глибини ванни до зони контакту фаз, де відбувається їх взаємодія. У такій ситуації поверхневі шари металу швидко окислюються, і через недостатню швидкість підходу нових домішок до цієї області формується переважно оксид заліза, що зумовлює зростання його вмісту в розплаві. Подальше окислення здійснюється через фазу шлакування: напочатку відбувається утворення оксиду заліза, який завдяки перемішуванню переходить у шлак, а розчинений у металі кисень бере участь у реакціях з домішками. Наявний у шлаку оксид заліза також активно взаємодіє з елементами на межі розділу металу та шлаку, сприяючи їх окисленню.

У зонах, де швидкість руху газового потоку є меншою, можливе безпосереднє окислення вуглецю та інших компонентів. Саме процес окислення вуглецю відіграє ключову роль у конвертерному виробництві, оскільки він значною мірою визначає тепловий режим плавки, інтенсивність утворення шлаку та ефективність рафінування металу від газів, сірки фосфору і неметалевих включень. Характерною особливістю цього процесу є нерівномірність окислення вуглецю по всьому об'єму ванни: найбільш інтенсивно воно відбувається в зоні дії кисневого струменя над поверхнею металу, тоді як у глибших шарах швидкість реакцій значно нижча. На початковому етапі продування темп окислення вуглецю залишається відносно невисоким, що пояснюється нижчою температурою розплаву та активним перебігом реакцій окислення кремнію і марганцю.

У міру зменшення вмісту кремнію та марганцю в розплаві і одночасного підвищення температури зона інтенсивного газовиділення поступово розширюється, охоплюючи весь об'єм металевої ванни, що супроводжується

					КНУ.РБ.141.26.249с.02.34	Арк.
						13
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

зростанням швидкості окислення вуглецю. Максимальна інтенсивність цього процесу спостерігається приблизно в середині плавки, коли температура досягає 1400–1450 °С. Наприкінці продування темп реакцій знову знижується через зменшення концентрації вуглецю в металі. Для забезпечення більш рівномірного перебігу окислення і стабільного виділення газів застосовують багатосоплові фурми. Газоподібні продукти реакцій, переважно оксид вуглецю та незначна кількість діоксиду вуглецю, виводяться з конвертера через горловину, тоді як частина оксидів переходить у шлак.

Паралельно з окисними реакціями відбувається формування шлаку, яке має визначальний вплив на перебіг усього процесу. Основним завданням є швидке утворення шлаку з необхідними фізико-хімічними властивостями, зокрема заданою основністю та достатньою текучістю, що значною мірою залежить від швидкості розчинення вапна. Саме шлак відіграє ключову роль у видаленні фосфору і сірки, а також впливає на якість сталі, вихід металу і довговічність футерівки. На початковому етапі продування шлак формується з продуктів окислення компонентів металу, таких як оксиди кремнію, марганцю та заліза, до яких додається оксид кальцію з розчиненого вапна, а також інші оксиди, що надходять із брукхту, залишків попереднього шлаку та матеріалу футерівки. У процесі подальшого розчинення вапна основність шлаку зростає і досягає значень у межах 2,7...3,6.

Хід шлакоутворення та ефективність окислення домішок значною мірою визначаються глибиною проникнення струменя кисню в розплав, яка залежить від тиску і витрати кисню, а також від положення фурми відносно поверхні металу. Регулюючи ці параметри, можна впливати на розподіл кисню між металевою та шлаковою фазами. Зокрема, збільшення глибини проникнення струменя, що досягається підвищенням тиску кисню та зменшенням відстані між наконечником фурми і поверхнею ванни, сприяє інтенсифікації поглинання кисню металом і, відповідно, прискорює окислення домішок.

Одночасно зі зменшенням надходження кисню до шлакової фази погіршуються умови розчинення вапна, що ускладнює процес шлакоутворення.

					КНУ.РБ.141.26.249с.02.34	Арк.
						14
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Якщо ж глибина проникнення струменя кисню зменшується, зростає площа контакту кисню зі шлаком, що позитивно впливає на формування шлакової фази, однак при цьому знижується інтенсивність окислення вуглецю та домішок.

Паралельно з процесом окислення вуглецю розпочинається видалення фосфору, який разом з іншими небажаними домішками переходить у шлак. У сформованій основній шлаковій масі може акумулюватися до 90% фосфору та певна частина сірки. Водночас умови для видалення сірки є менш сприятливими, оскільки шлак вміщує оксид заліза, а необхідна висока основність створюється лише на пізніх етапах продування. У результаті ступінь десульфурації зазвичай становить 30...50%, що забезпечує вміст сірки в сталі на рівні приблизно 0,02...0,04%.

Під час плавки також відбувається нагрівання металу до температури, необхідної для його випуску, яка зазвичай знаходиться в межах 1600...1660°C. Це забезпечується теплом, що виділяється при екзотермічних реакціях окислення компонентів розплаву. Ті ж самі теплові ефекти забезпечують плавлення металобрухту, причому цей процес, як правило, завершується протягом перших двох третин періоду продування.

Разом із корисними процесами має місце і небажане явище випаровування заліза в зоні під фурмою, де температура може досягати 2000–2600 °C. Утворені пари частково окиснюються та виносяться разом із відхідними газами з конвертера, що призводить до втрат металу і потребує подальшого очищення газів від пилу.

На завершальному етапі продування виконують відбір проб металу, вимірюють його температуру та очікують результати аналізу, після чого приймається рішення щодо подальших дій. Процес продування необхідно зупинити саме в той момент, коли вміст вуглецю досягає рівня, передбаченого для відповідної марки сталі. Якщо отримані показники відповідають заданим параметрам, плавку одразу спрямовують на випуск. У випадку відхилень проводять коригування: за надлишкового вмісту вуглецю здійснюють

					КНУ.РБ.141.26.249с.02.34	Арк.
						15
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

короткочасне додаткове продування для його зменшення, а при недостатній температурі підвищують положення фурми та продовжують продування для додаткового нагріву. Процедури відбору проб і їх аналізу займають кілька хвилин, тоді як коригувальні дії призводять до небажаних простоїв обладнання, тому їх прагнуть мінімізувати.

Після досягнення необхідних параметрів метал через лютку випускають у ківш сталерозливу, при цьому організація процесу забезпечує відокремлення металу від шлаку. Це досягається через те, що у конвертері при нахилянні більш важкий метал розташовується в зоні лютки, перешкоджаючи потраплянню туди шлакової маси, яка знаходиться зверху. Такий спосіб випуску запобігає змішуванню металу зі шлаком у ковші та зменшує перехід небажаних домішок, зокрема фосфору й оксидів заліза. Сам процес триває від кількох до кількох хвилин, і в цей час у ківш подають феросплави, необхідні для розкислення та легування сталі. У традиційних технологіях ці добавки вводять одразу в повному обсязі, щоб забезпечити потрібний хімічний склад, включаючи вміст марганцю, кремнію та інших легувальних елементів. Наприкінці випуску до ковша потрапляє незначна кількість шлаку, яка утворює захисний шар і сповільнює охолодження металу.

У сучасних виробництвах, де застосовується позапічна обробка, підхід дещо відрізняється: на стадії випуску вводять лише ті елементи, що менш схильні до окислення, після чого ківш транспортують на спеціальні установки для подальшої обробки. Там у процесі продування аргоном і перемішування металу додають активні елементи з високою спорідненістю до кисню, що дозволяє зменшити їх втрати. Водночас застосовують спеціальні заходи для відсікання шлаку під час завершення випуску, щоб запобігти його потраплянню в ківш, оскільки шлак може містити фосфор та оксиди заліза, здатні погіршити якість сталі. Для додаткового захисту сталі від окислення внаслідок охолодження у ковші формують шлаковий покрив, використовуючи відповідні матеріали, зокрема гранульований доменний шлак, вермикуліт або суміші на основі вапна.

					КНУ.РБ.141.26.249с.02.3Ч	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		16

Після досягнення необхідного вмісту вуглецю подачу кисню припиняють, фурму піднімають, а конвертер нахиляють для випуску металу через лютку у сталерозливний ківш. Далі виконують злив шлаку, який здійснюється через горловину в спеціальний шлаковий ківш, встановлений на самохідному шлаковозі, при цьому агрегат нахиляють у протилежний бік від лютки. Такий спосіб є обов'язковим, оскільки випуск шлаку через лютку може призвести до пошкодження футерівки внаслідок її розчинення. Процес зливу шлаку зазвичай триває кілька хвилин.

Після цього метал направляють на установку позапічної обробки, де проводиться його доведення до необхідних параметрів. Далі ківш транспортують у проліт для розливу, де ливарном краном здійснюється розлив сталі у виливниці. Основні операції розкислення та легування виконуються саме у ковші, що дозволяє забезпечити заданий хімічний склад і властивості металу. У цілому тривалість повного циклу плавки в конвертерах середньої та великої місткості, як правило, становить близько 40–50 хвилин.

1.2 Загальний опис процедури подачі кисню у кисневий конвертер

Подача кисню в конвертер здійснюється через вертикально встановлену водоохолоджувану фурму, яку вводять у робочий простір агрегату через горловину по вісі. Перед фурмою тиск кисню зазвичай становить 1,0...1,6 МПа. Положення фурми відносно поверхні металевої ванни є змінним від 1 до 5 м відносно її рівня у спокійному стані. Переміщення фурми вгору і вниз здійснюється спеціальним механізмом, який працює у взаємозв'язку з приводом повороту конвертера, причому обертання агрегату неможливе, поки фурма не виведена з його внутрішнього простору. Швидкість її переміщення регулюється і зазвичай становить від 0,1 до 1 м/с.

У сучасних кисневих конвертерах широко застосовують багатосоплові фурми, конструкція яких передбачає використання трьох сталевих труб, розташованих одна в одній концентрично. У нижній частині вони оснащені голівкою з соплами, через які подається кисень. Простір між трубами використовується для підведення кисню, а також для циркуляції

					КНУ.РБ.141.26.249с.02.34	Арк.
						17
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

охолоджувальної води, що забезпечує надійну роботу фурми в умовах високих температур. Для агрегатів великої місткості довжина таких фурм може досягати кількох десятків метрів.

Існують різні конструктивні варіанти фурм, зокрема з центральною подачею кисню або з центральною подачею води (рис. 1.2).

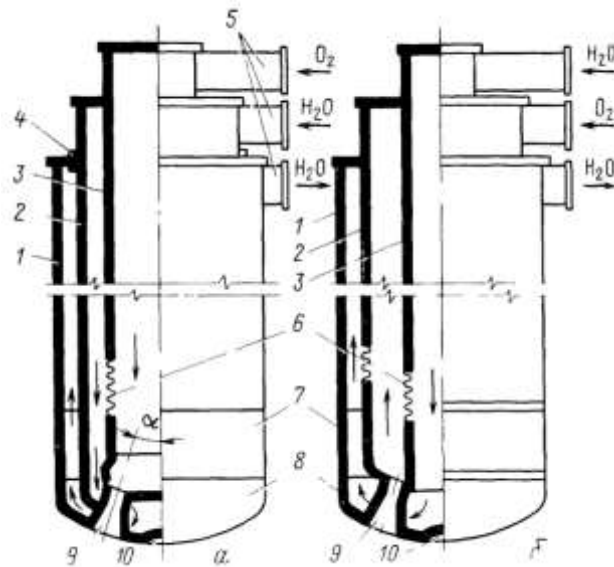


Рис. 1.2. Кисневі фурми [3] а) центральна подача кисню, б) центральна подача води: 1...3 – труба сталева, 4 – ущільнення, 5 – патрубки подачі кисню і води, 6 – компенсатор, 7 – зовнішня труба, 8 – головка, 9 – сопло, 10 – виїмка

Головка фурми є змінним вузлом і виготовляється як зварною, так і литою, найчастіше з використанням міді та сталі.

Сопла та нижню частину зварних головок, які безпосередньо контактують із зоною максимальних температур у конвертері, що можуть досягати близько 2600 °С, виготовляють із міді. Незважаючи на відносно невисоку температуру плавлення цього металу, яка становить приблизно 1083°С, його висока теплопровідність забезпечує ефективне відведення тепла до системи водяного охолодження. Завдяки цьому навіть за екстремальних температурних умов головка не перегрівається та зберігає необхідну міцність і працездатність.

У сучасних конструкціях кисневих фурм у їхній головці зазвичай передбачено від чотирьох до шести або семи сопел типу Лавалю, які забезпечують перетворення енергії тиску кисню на кінетичну, завдяки чому

струмінь на виході досягає надзвукової швидкості близько 500 м/с. Сопла розташовуються у вигляді віяла, розходячись під певними кутами, що сприяє ефективнішому впливу на поверхню металевої ванни.

Охолодження фурми провадиться водою, яка подається під тиском 0,8...1,2 МПа. Продуктивність потоку води підбирають таким чином, щоб різниця температур між входом і виходом не перевищувала 30°C, що дозволяє уникнути утворення відкладень солей жорсткості. З цієї ж причини висуваються вимоги до якості води, зокрема обмежується її карбонатна жорсткість. Щоб не було парових бульбашок швидкість руху води у зовнішній трубі повинна бути не меншою за 5 м/с.

Знос головки фурми найчастіше пов'язаний із прогорянням центральної частини нижньої тарілки або руйнуванням крайок сопел. У першому випадку проблему вирішують удосконаленням системи розподілу води та підвищенням інтенсивності охолодження, а також конструктивними змінами, наприклад виконанням спеціальних заглиблень у центральній зоні. Руйнування крайок сопел зазвичай свідчить про невідповідність їх геометричних параметрів умовам роботи: при надмірному діаметрі вихідного отвору струмінь кисню розширюється всередині сопла, відривається від його стінок і спричиняє підсмоктування крапель металу, що призводить до прискореного зносу. Для запобігання цьому зменшують діаметр вихідного перерізу, забезпечуючи стабільне формування струменя.

На практиці в Україні традиційно використовують фурми з центральною подачею кисню, однак останнім часом випробовуються конструкції з центральним підведенням води, які демонструють значно кращу ефективність охолодження і, відповідно, більший ресурс роботи головки. Сучасні дослідження показують, що оптимальним є використання фурм із чотирма–шістьма соплами, оскільки подальше збільшення їх кількості ускладнює конструкцію і призводить до зниження надійності через термічні напруження. Водночас ведуться розробки нових варіантів головок із більшою кількістю сопел, що дозволяють працювати при підвищених витратах кисню без

					КНУ.РБ.141.26.249с.02.34	Арк.
						19
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

виникнення викидів. Основні геометричні параметри сопел визначають розрахунковим шляхом таким чином, щоб забезпечити надзвукову швидкість витікання кисню, для чого тиск перед соплом повинен перевищувати приблизно до 1,2 МПа.

$$d_{кр} = 3,5 \sqrt{\frac{V}{P}}, \quad (1.1)$$

де V – витрата кисню, що проходить через сопло, визначається параметрами подачі газу та геометрією самого сопла і характеризує кількість кисню, яка надходить у робочу зону за одиницю часу., м³/хв; P – тиск кисню перед входом у сопло, що вимірюється в МПа, є одним із ключових параметрів, який визначає умови його подачі.

Розміри сопла підбираються за певними співвідношеннями: діаметр його вхідної частини $d_{вх}$ зазвичай встановлюють у межах 1,1...1,3 відносно базового значення $d_{кр}$, довжину звужуваної ділянки визначають у межах 0,5...1,0 від цієї ж величини $d_{кр}$, кут розкриття β сопла приймають приблизно 6...10°, а діаметр вихідного перерізу $d_{вих}$, як правило, становить 1,2...1,5 від $d_{кр}$ вихідного параметра.

Довжину розширювальної частини сопла визначають з урахуванням його конструктивних параметрів та умов роботи, забезпечуючи ефективне формування та прискорення потоку газу:

$$l = \frac{d_{вих} - d_{кр}}{2} + g \left(\frac{\beta}{2} \right). \quad (1.2)$$

Внутрішній діаметр труби фурми де проходить кисень визначається за відповідною залежністю, що враховує умови подачі кисню та необхідні параметри його транспортування:

$$D_m > d_{кр} \cdot n \cdot \sqrt{3}, \quad (1.3)$$

					КНУ.РБ.141.26.249с.02.34	Арк.
						20
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

у цьому співвідношенні враховується $d_{кр}$ – граничний переріз вихідних сопел Лавалю, а також n – кількість сопел, що встановлені у фурмі.

1.3 Пристрій подачі кисню в конвертер

Пристрій подачі кисню в конвертер призначений для утримання кисневої фурми при продуванні, її переміщення у вертикальному напрямі, тобто опускання в робочий простір і підйому після завершення процесу, а також для горизонтального переміщення з метою заміни. Таке обладнання встановлюють на металоконструкціях будівлі цеху безпосередньо над конвертерами на висоті, що забезпечує повне виведення фурми з газоохолоджувача під час її підйому.

У більш старих виробничих підрозділах, де використовуються конвертери середньої місткості, застосовують стаціонарні машини, тоді як у сучасних цехах із великовантажними агрегатами перевагу надають пересувним конструкціям. Пересувна машина являє собою платформу, здатну переміщуватися в горизонтальному напрямі по рейках, на якій змонтовано вертикальну направляючу, розташовану по осі конвертера. Крім того, на платформі розміщуються додаткові напрямні з каретками, на яких закріплені робоча та резервна фурми, а також механізми їх підйому і опускання, що приводяться в дію електродвигуном через систему канатів і блоків.

Така система зазвичай має двопозиційне виконання: у робочому положенні одна з фурм опускається в конвертер, тоді як інша знаходиться в резерві. У разі необхідності заміни робочу фурму піднімають у верхнє положення, після чого платформа зміщується таким чином, щоб інша фурма зайняла її місце і могла бути введена в агрегат. Це дозволяє швидко виконувати заміну без тривалих зупинок технологічного процесу. У новіших проєктах передбачаються трипозиційні машини, які забезпечують почергове використання двох продувних фурм, а також додаткової торкрет-фурми, призначеної для обслуговування футерівки.

					КНУ.РБ.141.26.249с.02.3Ч	Арк.
						21
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

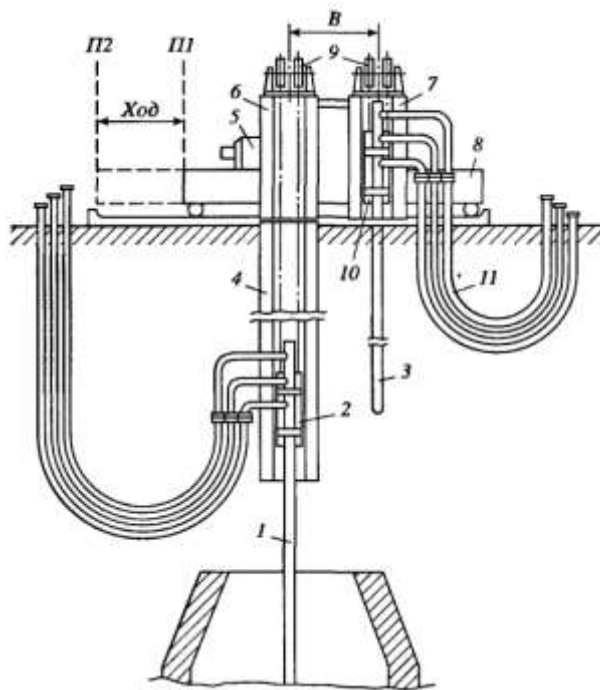


Рис. 1.3. Пересувний механізм подачі кисню в конвертер [3]: 1 – киснева фурма, 2,10 – каретки, 3 – фурма резервна, 4 – напрямна, 5 – механізм вертикального руху фурми, 7 – блоки, 6, 8 – напрямні механізму вертикального руху фурми, 9 – платформа, 11 – рукав

Пристрій верхньої подачі кисню включає дві фурми, з яких одна використовується в роботі, а інша перебуває в резерві, а також механізми, що забезпечують підйом і переміщення фурми. Фурма охолоджується водою, причому температура води, що відводиться, не повинна перевищувати приблизно 40°C, що гарантує надійність її роботи.

Фурму встановлюють у строго вертикальному положенні по осі агрегату, а її переміщення у вертикальному напрямі виконується за допомогою спеціального механізму, який узгоджений із системою повороту конвертера. Така взаємодія забезпечує безпеку експлуатації, оскільки нахил агрегату неможливий, поки фурма не виведена з робочої зони. Конструктивні особливості фурми суттєво впливають на ефективність функціонування конвертера, визначаючи його продуктивність, довговічність футерівки та загальну надійність роботи. Основні паспортні дані механізму вертикального підйому фурми узагальнюються у відповідній табл. 1.1.

					КНУ.РБ.141.26.249с.02.3Ч	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		22

Таблиця 1.1. Паспортні дані машини подачі кисню для конвертера місткістю 330 т [4]

Характеристика	Величина
Маса машини, кг	100000
Маса фурми, кг	4000
Маса противаги, кг	3000
Хід, м	19
ККД редуктора	0,85
ККД підшипників	0,97
ККД ланцюгової передачі	0,96
ККД муфти	0,97
Швидкість руху мінімальна, м/с	0,1 0,2
Швидкість руху номінальна, м/с	0,523 0,734
Мінімальна кутова швидкість, рад/с	12,2 14,84
Максимальна кутова швидкість, рад/с	57,8 66,43
Максимальне прискорення, м/с ²	1,4

До електропривода механізму переміщення фурми висувається комплекс жорстких технологічних вимог, обумовлених складними умовами роботи обладнання. Передусім необхідно забезпечити широкий діапазон регулювання швидкості як під час опускання, так і підйому фурми, що має становити не менше ніж 10:1. Важливим є також досягнення високої точності позиціювання, особливо в момент встановлення фурми у робоче положення для продування. Пуск і гальмування повинні відбуватися плавно, без різких змін швидкості, причому прискорення не має перевищувати допустимого рівня.

Особливу увагу приділяють здатності електропривода працювати в умовах підвищених температур, а також надійності ізоляції, оскільки в робочому середовищі спостерігається значна концентрація струмопровідного пилу. Висока надійність системи є критичною, адже її відмова може призвести до серйозних аварійних ситуацій, включаючи небезпеку вибуху у випадку

					КНУ.РБ.141.26.249с.02.3Ч	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		23

потрапляння води в конвертер. Крім того, конструкція повинна передбачати використання незалежного реверсивного електропривода, що забезпечує зміну напрямку руху фурми та підвищує безпеку і ефективність експлуатації.

1.4 Прорахунок електродвигуна приводу механізму вертикального руху фурми

Важливим аспектом є правильний вибір потужності електродвигуна, оскільки від цього залежать якість роботи. Недостатня потужність призводить до перевантаження двигуна, його перегрівання та передчасного виходу з ладу, що, у свою чергу, збільшує витрати на ремонт і обслуговування. У той же час надмірний запас потужності негативно впливає на енергетичні характеристики, знижує коефіцієнт корисної дії та спричиняє зайві капітальні й експлуатаційні витрати. Тому підбір електродвигуна повинен виконуватися з урахуванням реального навантаження на вал і особливостей режиму роботи приводу.

Потужність електродвигуна прораховується як:

$$P \geq \frac{(m_{\phi} + m_{np}) \cdot g \cdot v_{ном}}{1000 \cdot \eta} = \frac{(4000 + 3000) \cdot 9,81 \cdot 0,523}{1000 \cdot 0,71} = 52,51 \text{ кВт}, \quad (1.1)$$

де $\eta = \eta_{ред} \cdot \eta_{нк}^2 \cdot \eta_{цп}^2 \cdot \eta_{ред} = 0,85 \cdot 0,97^2 \cdot 0,96^2 \cdot 0,97 = 0,71$.

Як привідний агрегат доцільно використати асинхронний електродвигун виробництва SIEMENS серії 1LE1503-2DD6 [5], який розрахований на роботу в умовах широкого регулювання швидкості за допомогою частотних перетворювачів.

Основні технічні характеристики цього двигуна подано у відповідній таблиці 1.2.

					КНУ.РБ.141.26.249с.02.3Ч	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		24

Таблиця 1.2. Паспортні дані електродвигуна 1LE1503-2DD6 [5]

$P_{ном}$, кВт	$n_{ном}$, об / хв	$U_{1ном}$, В	$I_{1ном}$, А	$\eta_{ном}$, % %	$\cos \varphi_{ном}$	$\frac{I_n}{I_{ном}}$	$\frac{M_{max}}{M_{ном}}$	$\frac{M_n}{M_{ном}}$	J , кг / м ²
55	740	380	107	92,5	0,8	5,9	2,5	2,5	1,6

1.5 Вибір частотного перетворювача для приводу механізму вертикального руху фурми

Обираючи перетворювач частоти необхідно враховувати низку важливих факторів, серед яких значення тривалого струму навантаження, допустимий рівень короткочасних перевантажень, параметри напруги живлення як мережі, так і електродвигуна, а також межі регулювання частоти. Окрім цього, важливу роль відіграють принципи і закони частотного керування, можливість використання додаткових функціональних модулів і конкретні умови експлуатації обладнання.

Підбір перетворювача частоти для роботи в парі з електродвигуном є досить складним завданням, що пояснюється відмінностями у теплових режимах цих пристроїв. Якщо для електродвигунів характерна відносно велика тривалість нагрівання, яка може сягати десятків хвилин, то для перетворювачів цей процес відбувається значно швидше – протягом десятків секунд, що накладає певні обмеження на їх роботу.

Такі пристрої розраховані на тривалу експлуатацію за умови протікання номінального струму інвертора, і при перевищенні цього рівня навіть на відносно короткий час можливе досягнення гранично допустимої температури. У випадку перевищення встановлених меж спрацьовують захисні системи, які запобігають перевантаженню та виходу обладнання з ладу. Саме тому в електроприводах, що працюють у режимах із короткочасними перевантаженнями або змінними швидкісними та моментними характеристиками, необхідно забезпечувати такий режим роботи, за якого

еквівалентне значення струму за цикл не перевищує номінально допустимого для інвертора.

Підбір перетворювача частоти здійснюється з урахуванням характеристик живильної мережі та параметрів навантаження. У даному випадку передбачається використання трифазної мережі з напругою 380 В і частотою 50 Гц. Навантаження також має трифазний характер, при цьому максимальне значення вихідної лінійної напруги становить 380 В, а гранична частота роботи визначається відповідно до вимог технологічного процесу.

$$f_{\max} > 50 \frac{\omega_{\max}}{\omega_0 (1 - s_{\max})}, \text{ Гц},$$

Номінальне значення струму інвертора має відповідати встановленій умові та забезпечувати надійну роботу приводу в заданих режимах:

$$I_{\text{інв}} > I_{c \max} = 107 \text{ А},$$

Граничне значення струму інвертора повинно відповідати заданій умові та гарантувати стійку роботу системи навіть у режимах підвищеного навантаження:

$$I_{\text{інв max}} > I_{\max} = 207 \text{ А}.$$

Під час підбору перетворювача частоти необхідно також враховувати реальні умови його експлуатації, зокрема висоту встановлення над рівнем моря та температуру навколишнього середовища, оскільки ці фактори безпосередньо впливають на теплові режими роботи обладнання. Важливо, щоб тривалість перевантаження електродвигуна не перевищувала допустимого часу протікання максимального струму інвертора, а фактична тривалість робочого циклу електропривода була не меншою за встановлений граничний цикл роботи самого перетворювача. З урахуванням зазначених вимог доцільно обрати перетворювач частоти типу SINAMICS G120 6SL3210-1PC31-8UL0 [6] виробництва Siemens.

					КНУ.РБ.141.26.249с.02.3Ч	Арк.
						26
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

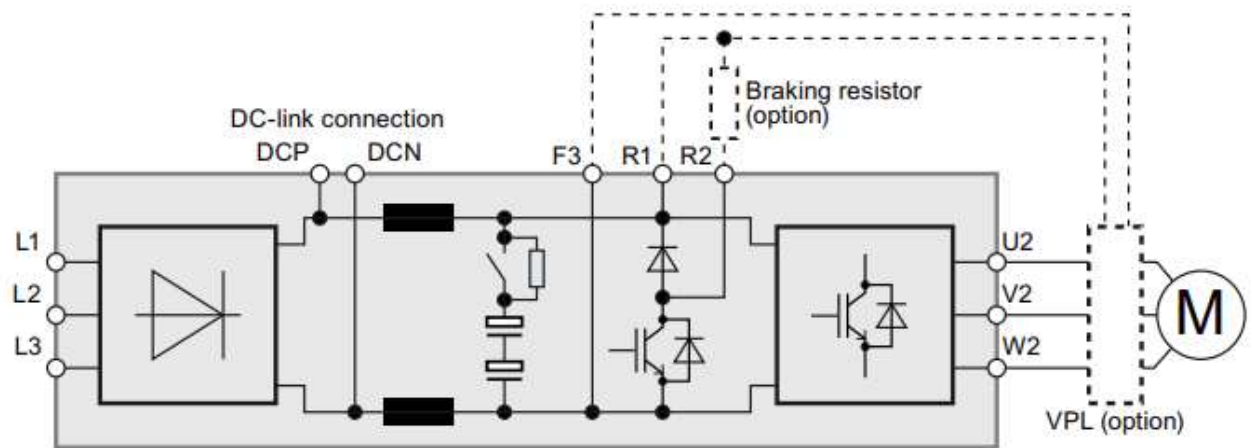


Рис. 1.4. Схема частотного перетворювача SINAMICS G120 6SL3210-1PC31-8UL0 [6]

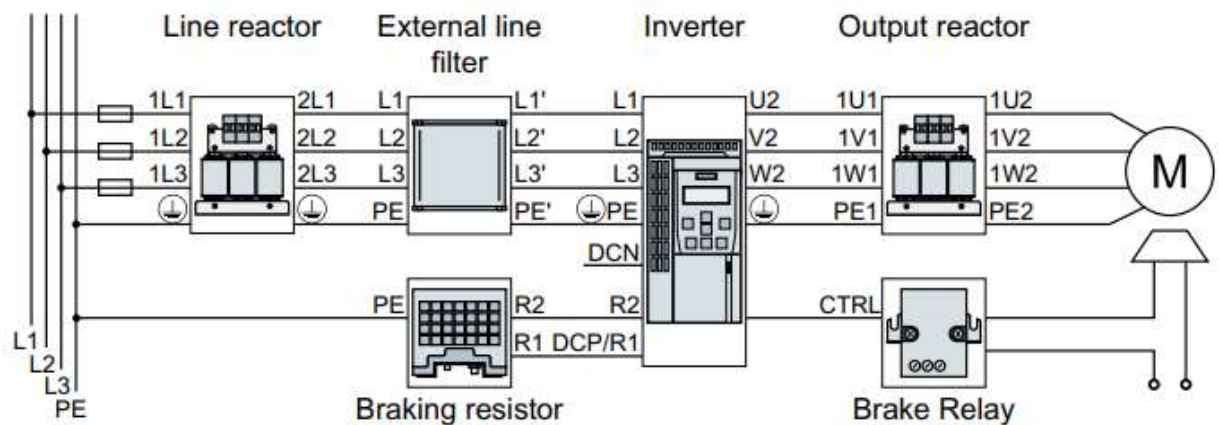


Рис. 1.5. Підключення частотного перетворювача 6SL3210-1PC31-8UL0 до мережі та електродвигуна 1LE1503-2DD6 [6]

Паспортні дані перетворювача див. у табл. 1.3.

Таблиця 1.3. Паспортні дані перетворювача SINAMICS G120 6SL3210-1PC31-8UL0 [6]

$P_{ном}$, кВт	$U_{ном}$, В	$I_{ном}$, А
55	460	178

Висновок до розділу 1

У першому розділі на основі вихідних параметрів механізму розливного крана було виконано розрахунок необхідної потужності привідного електродвигуна. За результатами аналізу із запропонованого переліку обрано двигун 1LE1503-2DD6 і перетворювач частоти SINAMICS G120 6SL3210-1PC31-8UL0, які відповідають умовам технології виробництва сталі за допомогою конверторів та задовольняє вимоги, що висуваються до електропривода кисневої фурми.

					КНУ.РБ.141.26.249с.02.3Ч	Арк.
						28
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

РОЗДІЛ 2. СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА

					КНУ.РБ.141.26.249с.02.СЧ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата				
Розроб.	Гладун І.М.				Спеціальна частина	Літ.	Аркуш	Аркушів
Перевір.	Ільченко О.В.					Н	29	
						ЗЕЕМ-22		
Н.контр.	Ільченко О.В.							
Затверд.	Пересунько І.І.							

2.1 Прорахунок діаграм моментів та швидкостей

Для того щоб оцінювати характер зміни швидкості переміщення фурми на різних етапах руху, зокрема під час розгону, усталеного руху та гальмування, що дає змогу правильно задати режими роботи приводу і уникнути небажаних ривків або перевищення допустимих швидкостей потрібно прорахувати і побудувати діаграму швидкостей. А прорахувавши і проаналізувавши діаграму моментів, матимемо можливість визначити навантаження на двигун і механічну частину приводу, врахувати вплив інерційних сил, сили тяжіння, а також опорів руху, що особливо важливо для вертикального переміщення масивних елементів, яким є киснева фурма.

Прорахуємо діаграми скориставшись додатковими параметрами механічної частини фурми (див. табл. 2.1).

Таблиця 2.1. Параметри механічної частини механізму вертикального руху кисневої фурми

Величина	Значення
Мінімальна кутова швидкість, рад/с	12,2
Максимальна кутова швидкість, рад/с	57,8
Діаметр зірочки приводу, м	0,6
Діаметр шківа гальмування, м	0,5
Діаметр муфти, м	0,5
Маса зірочки приводу, кг	60
Маса шківа гальмування, кг	17
Маса зубчастої муфти, кг	40
Момент інерції гальмівної муфти, кг/м ²	0,52
Передавальне число редуктора	16

Радіус приведення:

$$r = \frac{v_{\phi}}{\omega_{en \max}} = \frac{0,523}{57,8} = 0,009 \text{ м.} \quad (2.1)$$

					КНУ.РБ.141.26.249с.02.СЧ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		30

Момент інерції шківів:

$$J_{ми} = m_{ми} \cdot r_{ми}^2 = 17 \cdot 0,15^2 = 1,0625 \text{ кг} \cdot \text{м}^2. \quad (2.2)$$

Після чого аналогічним чином обчислюють момент інерції зубчастої муфти та гальмівної муфти:

$$J_{мз} = m_{мз} \cdot r_{мз}^2 = 40 \cdot 0,25^2 = 2,5 \text{ кг} \cdot \text{м}^2. \quad (2.3)$$

$$J_{мм} = \frac{GD_{мм}^2}{4} = \frac{0,52}{4} = 0,13 \text{ кг} \cdot \text{м}^2. \quad (2.4)$$

Далі встановлюють значення моменту інерції приводної зірочки, що є важливим для оцінювання динамічних характеристик механізму:

$$J_{нз} = 4 \cdot m_{нз} \cdot \frac{r_{нз}^2}{2} = 4 \cdot 60 \cdot \frac{0,3^2}{2} = 10,79 \text{ кг} \cdot \text{м}^2. \quad (2.5)$$

Виконаємо визначення приведенного моменту інерції при опусканні фурми, який відповідає найменшому значенню цього параметра:

$$\begin{aligned} J_{\min} &= J_{дв} + J_{ми} + J_{мз} + J_{мм} + J_{нз} + m_{пр} \cdot r^2 = \\ &= 1,6 + 1,0625 + 2,5 + 0,13 + 10,79 + 3000 \cdot 0,011^2 = \\ &= 16,45 \text{ кг} \cdot \text{м}^2, \end{aligned} \quad (2.6)$$

Виконаємо визначення приведенного моменту інерції при підйомі фурми, який відповідає найбільшому значенню цього параметра:

$$\begin{aligned} J_{\max} &= J_{дв} + J_{ми} + J_{мз} + J_{мм} + J_{нз} + m_{ф} \cdot r^2 = \\ &= 1,6 + 1,0625 + 2,5 + 0,13 + 10,79 + 4000 \cdot 0,011^2 = \\ &= 16,57 \text{ кг} \cdot \text{м}^2, \end{aligned} \quad (2.7)$$

Статичний моменту підйому:

$$M_c^{\text{підйом}} = M_{\text{вант}}^{\text{прив}} - M_c^{\text{прив}} = 183,75 - 75,05 = 108,7 \text{ Н} \cdot \text{м}, \quad (2.8)$$

де

$$M_{\text{вант}}^{\text{прив}} = \frac{M_{\text{вант}}^{\text{нз}}}{i_{\text{ред}}} = \frac{2940}{16} = 183,75 \text{ Н} \cdot \text{м}, \quad (2.9)$$

					КНУ.РБ.141.26.249с.02.СЧ	Арк.
						31
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

де

$$\begin{aligned} M_{вант}^{нз} &= (m_{пр} - m_{ф}) \cdot g \cdot r_{нз} = \\ &= (4000 - 3000) \cdot 9,8 \cdot 0,3 = 2940 \text{ Н} \cdot \text{м}. \end{aligned} \quad (2.10)$$

$$M_c^{прив} = \frac{M_{вант}^{нз}}{i_{ред} \cdot \eta} - \frac{M_{вант}^{нз}}{i_{ред}} = \frac{2940}{16 \cdot 0,71} - \frac{2940}{16} = 75,05 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (2.11)$$

Статичний момент спуску:

$$M_c^{спуск} = M_{вант}^{прив} + M_c^{прив} = 183,75 + 75,05 = 258,8 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (2.12)$$

Здійснюється перевірка електродвигуна з урахуванням дії динамічних навантажень.

Режим прискорення під час підйому визначається відповідними розрахунками та характеризує процес наростання швидкості руху:

$$M_{підйом} = J_{\min} \frac{a}{r} - M_c^{підйом} = 16,45 \frac{1,4}{0,009} - 108,7 = 2450,19 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (1.2)$$

Режим уповільнення під час підйому описує процес зниження швидкості руху до необхідного рівня:

$$M_{підйом} = J_{\min} \frac{a}{r} + M_c^{підйом} = 16,45 \frac{1,4}{0,009} + 108,7 = 2667,59 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (1.3)$$

Режим прискорення під час спуску відображає процес збільшення швидкості руху в напрямку вниз:

$$M_{спуск} = J_{\max} \frac{a}{r} + M_c^{спуск} = 16,57 \frac{1,4}{0,009} + 258,8 = 2836,36 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (1.4)$$

Режим уповільнення під час спуску характеризує процес зменшення швидкості руху до заданого рівня:

$$M_{спуск} = J_{\max} \frac{a}{r} - M_c^{спуск} = 16,57 \frac{1,4}{0,009} - 258,8 = 2318,76 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (1.5)$$

Проаналізуємо механізм піднімання фурми, умовно подаючи його у вигляді одномасової моделі, що відображає роботу системи як під час підйому, так і при її опусканні.

Параметри, які підлягають визначенню та беруться до уваги під час виконання процесу підйому:

$$J_{\min} = 16,45 \text{ кг} \cdot \text{м}^2;$$

$$M_c^{\text{підйом}} = 108,7 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Величини та параметри, які відіграють суттєву роль під час здійснення процесу опускання.:

$$J_{\max} = 16,57 \text{ кг} \cdot \text{м}^2;$$

$$M_c^{\text{підйом}} = 258,8 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Під час перехідних процесів крутний момент двигуна не виходить за межі значень, встановлених у каталожних характеристиках, що дозволяє прийняти двигун 1LE1503-2DD6 для застосування в приводі механізму підйому кисневої фурми.

Беручи за основу встановлені умови, зокрема величину максимального прискорення $a_{\max} = 1,4 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$, і беручи до уваги шлях, який долає фурма в процесі свого руху $S_{\phi} = 19 \text{ м}$.

Беручи до уваги зміну швидкісного режиму в бік її зменшення $S = 3 \text{ м}$ за визначений інтервал часу до моменту повного припинення руху, $v_{\max} = 0,523 \text{ м/с}$, а також встановлені величини найбільшої та найменшої швидкості, $v_{\min} = 0,1 \text{ м/с}$ на основі цього обчислюють тривалість виконання процесів опускання та піднімання фурми.

Часова тривалість і відстань, яку проходить фурма в період її розгону v_0 до $v_{\max}$ під час руху вниз у встановленому діапазоні швидкостей:

					КНУ.РБ.141.26.249с.02.СЧ	Арк.
						33
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

$$t_1 = \frac{v_{\max}}{a_{\max}} = \frac{0,523}{1,4} = 0,374 \text{ с},$$

$$S_1 = v_{\text{сеп1}} \cdot t_1 = 0,2615 \cdot 0,374 = 0,0977 \text{ м},$$

$$v_{\text{сеп1}} = \frac{v_{\max}}{2} = \frac{0,523}{2} = 0,2615 \text{ м/с}.$$

Тривалість і довжина пройденого шляху під час процесу уповільнення в межах заданого інтервалу швидкості від $v_{\max}$ до $v_{\min}$ у процесі опускання фурми:

$$t_3 = \frac{v_{\max} - v_{\min}}{a_{\max}} = \frac{0,523 - 0,1}{1,4} = 0,302 \text{ с},$$

$$S_3 = v_{\text{сеп3}} \cdot t_3 = 0,211 \cdot 0,302 = 0,0637 \text{ м},$$

$$v_{\text{сеп3}} = \frac{v_{\max} - v_{\min}}{2} = \frac{0,523 - 0,1}{2} = 0,211 \text{ м/с}.$$

Тривалість процесу та відстань, яку проходить система під час виконання гальмування від $v_{\min}$ до v_0 у процесі опускання фурми:

$$t_5 = \frac{v_{\min}}{a_{\max}} = \frac{0,1}{1,4} = 0,071 \text{ с},$$

$$S_5 = v_{\text{сеп5}} \cdot t_5 = 0,071 \cdot 0,05 = 0,0036 \text{ м},$$

$$v_{\text{сеп1}} = \frac{v_{\min}}{2} = \frac{0,1}{2} = 0,05 \text{ м/с}.$$

Тривалість руху $v_{\min}$ на визначеній ділянці $S_4 = 3 \text{ м}$ під час опускання фурми за заданих умов:

$$t_4 = \frac{S_4}{v_{\min}} = \frac{3}{0,1} = 30 \text{ с}.$$

Час $v_{\max}$ необхідний для подолання заданої ділянки S_2 під час руху фурми вниз за визначених умов:

$$\begin{aligned} S_2 &= S_{\phi} - (S_1 + S_3 + S_4 + S_5) = \\ &= 19 - (0,0977 + 0,0637 + 3 + 0,0036) = \\ &= 15,835 \text{ м}, \end{aligned}$$

$$t_2 = \frac{S_2}{v_{\max}} = \frac{15,835}{0,523} = 30,28 \text{ с}.$$

					КНУ.РБ.141.26.249с.02.СЧ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		34

Тривалість процесу, протягом якого відбувається опускання фурми:

$$t_{on} = t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5 = \\ = 0,374 + 30,28 + 0,302 + 30 + 0,071 = 61,027 \text{ с.}$$

Тривалість і відстань, що проходиться під час розгону фурми від v_0 до v_{max} в процесі її піднімання в заданому інтервалі швидкостей:

$$t_6 = t_8 = t_1 = 0,374 \text{ с,} \\ S_6 = S_8 = S_1 = 0,0977 \text{ м.}$$

Тривалість руху v_{max} під час проходження визначеної ділянки S_7 в процесі піднімання фурми:

$$S_7 = S_\phi - (S_6 + S_8) = 19 - (0,374 + 0,374) = 18,252 \text{ м,} \\ t_7 = \frac{S_7}{v_{max}} = \frac{18,252}{0,523} = 34,89 \text{ с.}$$

Тривалість процесу, протягом якого здійснюється піднімання фурми:

$$t_{підйом} = t_6 + t_7 + t_8 = 0,374 + 34,89 + 0,374 = 35,64 \text{ с.}$$

Виконуємо побудову діаграм, що відображають функціонування механізму.

2.2 Прорахунок параметрів заступної схеми електродвигуна вертикального руху фурми

2.2.1 Прорахунок доповнених параметрів електродвигуна

Додаткові характеристики електродвигуна включають сукупність параметрів, що уточнюють його експлуатаційні та технічні можливості:

$$\omega_0 = \frac{2\pi \cdot n_0}{60} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 750}{60} = 78,5 \text{ с}^{-1}. \quad (2.13)$$

$$\omega_{ном} = \frac{2\pi \cdot n_{ном}}{60} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 740}{60} = 77,45 \text{ с}^{-1}. \quad (2.14)$$

$$s_{ном} = \frac{\omega_0 - \omega_{ном}}{\omega_0} = \frac{78,5 - 77,45}{78,5} = 0,0134. \quad (2.15)$$

					КНУ.РБ.141.26.249с.02.СЧ	Арк.
						35
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

$$U_{1\phi \text{ ном}} = \frac{U_{1л \text{ ном}}}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220 \text{ В.} \quad (2.16)$$

$$I_{1\text{ ном}} = \frac{P_{\text{ном}}}{3U_{1\phi} \cdot \cos \varphi_{\text{ном}} \cdot \eta_{\text{ном}}} = \frac{55 \cdot 10^3}{3 \cdot 220 \cdot 0,82 \cdot 0,925} = 112,92 \text{ А.} \quad (2.17)$$

$$M_{\text{ном}} = \frac{P_{\text{ном}}}{\omega_{\text{ном}}} = \frac{55 \cdot 10^3}{77,45} = 709,75 \text{ Н} \cdot \text{м.} \quad (2.18)$$

$$I_{1\text{ max}} = 5,9 \cdot I_{1\phi \text{ ном}} = 5,9 \cdot 112,92 = 666,22 \text{ А.} \quad (2.19)$$

$$M_{\text{max}} = 2,5 \cdot M_{\text{ном}} = 2,9 \cdot 709,75 = 1774,36 \text{ Н} \cdot \text{м.} \quad (2.20)$$

$$M_{\text{пуск}} = 2,5 \cdot M_{\text{ном}} = 2,5 \cdot 709,75 = 1774,36 \text{ Н} \cdot \text{м.} \quad (2.21)$$

$$s_{\text{max}} = s_{\text{ном}} \left(\lambda_{\text{max}} + \sqrt{\lambda_{\text{max}}^2 - 1} \right) = 0,0134 \left(2,5 + \sqrt{2,5^2 - 1} \right) = 0,064. \quad (2.22)$$

SIEMENS не надає параметрів схеми заміщення для двигуна 1LE1503-2DD6, тому їх необхідно попередньо визначити розрахунковим шляхом.

2.2.2 Прорахунок параметрів заступної схеми в номінальному режимі

Обчислення необхідних параметрів здійснюється на основі Т-подібної заступної схеми електродвигуна 1LE1503-2DD6 див. рис. 2.1.

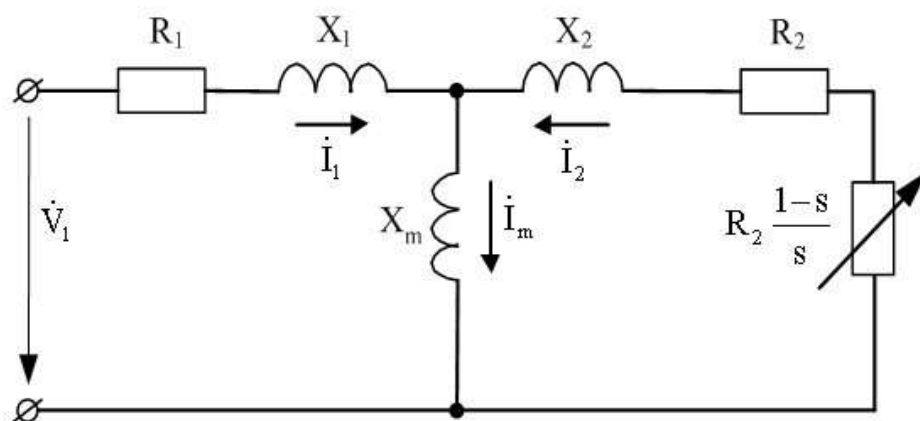


Рис. 2.1. Заступна схема 1LE1503-2DD6

За рис. 2.1 прораховуємо потрібні активні і реактивні опори, індуктивності згідно порядку взятому з [8].

Активні опори фаз статора і ротора за заступною Т-подібною схемою.

$$I_0 = I_{1ном} \left[\sin \varphi_{ном} - \frac{s_{ном}}{s_{max}} \cdot \cos \varphi_{ном} \right] = 112,9 \left[0,6 - \frac{0,013}{0,064} \cdot 0,8 \right] = 48,9 \text{ А.} \quad (2.23)$$

$$\text{де } \sin \varphi_{ном} = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_{ном}} = \sqrt{1 - 0,8^2} = 0,6.$$

$$C_1 = \frac{I_0}{2 \cdot \mu_I \cdot I_{1ном}} + 1 = \frac{48,9}{2 \cdot 5,9 \cdot 112,92} + 1 = 1,037. \quad (2.24)$$

$$I'_{2ном} = I_{1ном} \cdot \cos \varphi = 112,92 \cdot 0,8 = 90,339 \text{ А.} \quad (2.25)$$

$$R'_2 = \frac{M_{ном} \cdot \omega_0 \cdot s_{ном}}{3 I_{2ном}^2} = \frac{709,75 \cdot 78,54 \cdot 0,013}{3 \cdot 90,339^2} = 0,03 \text{ Ом.} \quad (2.26)$$

$$R_1 = R'_2 \cdot 1,551 = 0,03 \cdot 1,551 = 0,047 \text{ Ом.} \quad (2.27)$$

Індуктивні опори фаз статора і ротора за заступною Т-подібною схемою.

$$A_0 = \frac{I_{1ном} \cdot \cos \varphi - I_\mu \cdot \cos \varphi_0}{U_{1\phi}} = \frac{112,92 \cdot 0,8 - 48,9 \cdot 0,052}{220} = 0,4. \quad (2.28)$$

$$A_1 = \frac{m \cdot U_{1\phi}^2 \cdot (1 - s_{ном})}{2 \cdot C_1 \cdot \lambda_{max} \cdot P_{ном}} = \frac{3 \cdot 220^2 \cdot (1 - 0,013)}{2 \cdot 1,037 \cdot 2,5 \cdot 55 \cdot 10^3} = 0,5. \quad (2.29)$$

$$B = \frac{1}{s_{ном}} + \frac{1}{s_{кр}} - \frac{2 \cdot A_0 \cdot A_1}{s_{ном}} = \frac{1}{0,013} + \frac{1}{0,064} - \frac{2 \cdot 0,4 \cdot 0,5}{0,013} = 60,655. \quad (2.30)$$

$$C = \frac{1}{s_{ном} \cdot s_{max}} - \left(\frac{1}{s_{ном}^2} + \frac{1}{s_{max}^2} \right) \cdot A_0 \cdot A_1 =$$

$$= \frac{1}{0,013 \cdot 0,064} - \left(\frac{1}{0,013^2} + \frac{1}{0,064^2} \right) \cdot 0,4 \cdot 0,5 = 0,061. \quad (2.31)$$

Уточнюємо значення коефіцієнтів:

$$\beta = -\frac{B}{2} + \sqrt{\frac{B^2}{4} - C} = -\frac{60,655}{2} + \sqrt{\frac{60,655^2}{4} - 0,061} = -1,013 \cdot 10^{-3}. \quad (2.32)$$

$$\gamma = \sqrt{\frac{1}{s_{\max}^2} - \beta^2} = \sqrt{\frac{1}{0,064^2} - (-1,013 \cdot 10^{-3})^2} = 15,653. \quad (2.33)$$

$$X_{\text{НОМ}} = \gamma \cdot C_1 \cdot R'_2 = 15,653 \cdot 1,037 \cdot 0,03 = 0,493 \text{ Ом}. \quad (2.34)$$

$$X'_{2\sigma} = \frac{0,58 \cdot X_{\text{НОМ}}}{C_1} = \frac{0,58 \cdot 0,493}{1,037} = 0,276 \text{ Ом}. \quad (2.35)$$

$$X_{1\sigma} = 0,42 \cdot X_{\text{НОМ}} = 0,42 \cdot 0,493 = 0,207 \text{ Ом}. \quad (2.36)$$

$$\begin{aligned} E_1 &= \sqrt{(U_{1\phi} \cdot \cos \varphi - R_1 \cdot I_{\text{НОМ}})^2 + (U_{1\phi} \cdot \sin \varphi - X_{1\sigma} \cdot I_{\text{НОМ}})^2} = \\ &= \sqrt{(220 \cdot 0,8 - 0,047 \cdot 112,92)^2 + (220 \cdot 0,6 - 0,207 \cdot 112,92)^2} = \\ &= 201,71 \text{ В}. \end{aligned} \quad (2.37)$$

$$X_0 = \frac{E_1}{I_0} = \frac{201,71}{48,9} = 4,125 \text{ Ом}. \quad (2.38)$$

Базові параметри електродвигуна 1LE1503-2DD6.

$$X_1 = X_0 + X_{1\sigma} = 4,125 + 0,207 = 4,332 \text{ Ом}. \quad (2.39)$$

$$X_2 = X_0 + X'_{2\sigma} = 4,125 + 0,276 = 4,401 \text{ Ом}. \quad (2.40)$$

$$L_s = \frac{X_1}{\omega_0} = \frac{4,332}{78,54} = 0,055 \text{ мГн}. \quad (2.41)$$

$$L_r = \frac{X_2}{\omega_0} = \frac{4,401}{78,54} = 0,056 \text{ мГн}. \quad (2.42)$$

$$L_0 = \frac{X_0}{\omega_0} = \frac{4,125}{78,54} = 0,053 \text{ мГн}. \quad (2.43)$$

$$T_s = \frac{L_s}{R_1} = \frac{0,055}{0,047} = 1,171 \text{ мс}. \quad (2.44)$$

$$T_r = \frac{L_r}{R'_2} = \frac{0,056}{0,03} = 1,846 \text{ мс}. \quad (2.45)$$

$$\sigma = 1 - \frac{L_0^2}{L_s \cdot L_r} = 1 - \frac{0,053^2}{0,055 \cdot 0,056} = 0,107. \quad (2.46)$$

Проаналізуємо статику електродвигуна в природному і штучному варіантах.

2.3 Статика електродвигуна приводу руху кисневої фурми

Використовуючи відомі параметри заступної схеми та враховуючи їх зміну залежно від ковзання, можна виконати точні розрахунки й побудувати як механічні, так і електромеханічні характеристики електродвигуна.

Механічна характеристика описує взаємозв'язок між швидкістю обертання та моментом на валу, проте у розрахунках оперують електромагнітним моментом, тому фактично отримують залежність швидкості саме від цієї величини.

Електромеханічна характеристика, у свою чергу, відображає залежність швидкості обертання або ковзання від струму статора, причому при її побудові враховують значення частоти, що задається інвертором.

$$M(s) = \frac{3 \cdot U_{1\phi \text{ ном}}^2 \cdot R'_2(s)}{\omega_0 \cdot s \left[\left(R_1 + \frac{R'_2(s)}{s} \right)^2 + (X_{1\sigma}(s) + X'_{2\sigma}(s))^2 \right]}, \quad (2.47)$$

$$I'_2(s) = \frac{U_{1\phi \text{ ном}}}{\pm \sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2(s)}{s} \right)^2 + [X_{1\sigma}(s) + X'_{2\sigma}(s)]^2}}. \quad (2.48)$$

Отримані механічна та швидкісна характеристики подані на відповідних рис. 2.2 а і рис. 2.2 б.

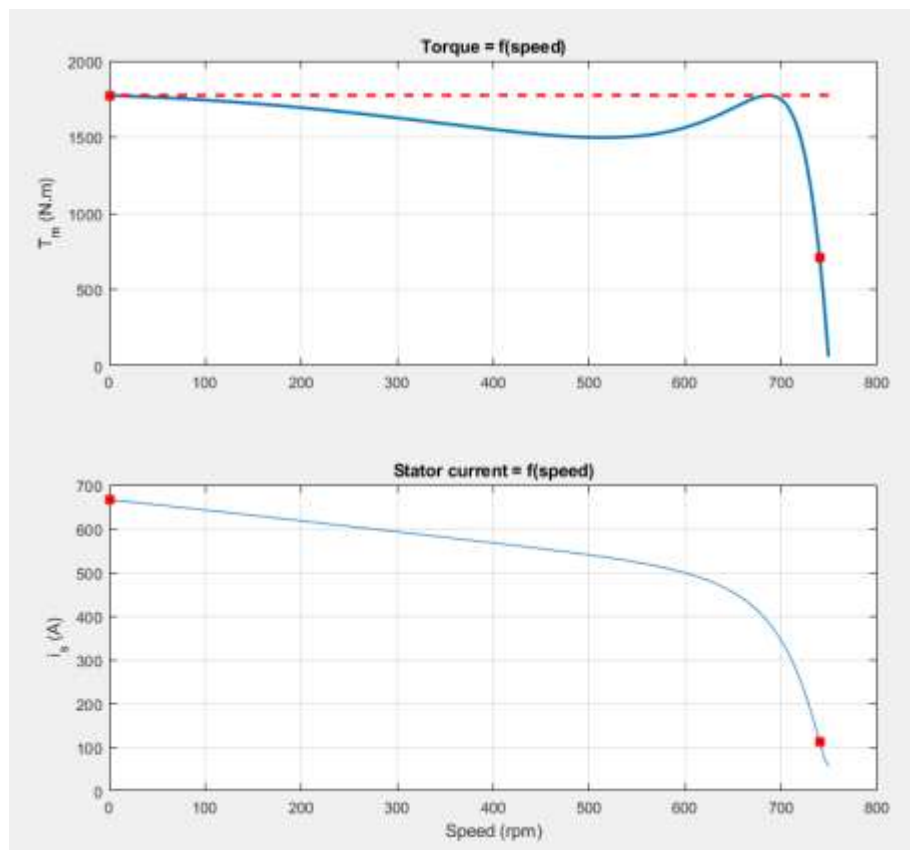


Рис. 2.2. Природна характеристика 1LE1503-2DD6: а) механічна; б) швидкісна

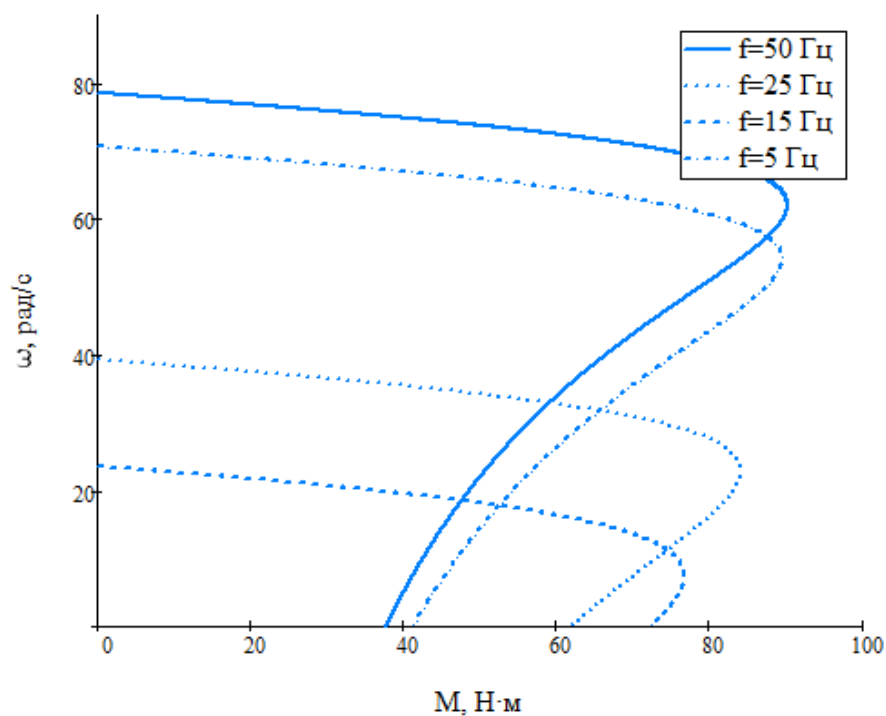


Рис. 2.3. Штучні характеристики 1LE1503-2DD6 (механічні) в системі частотного регулювання

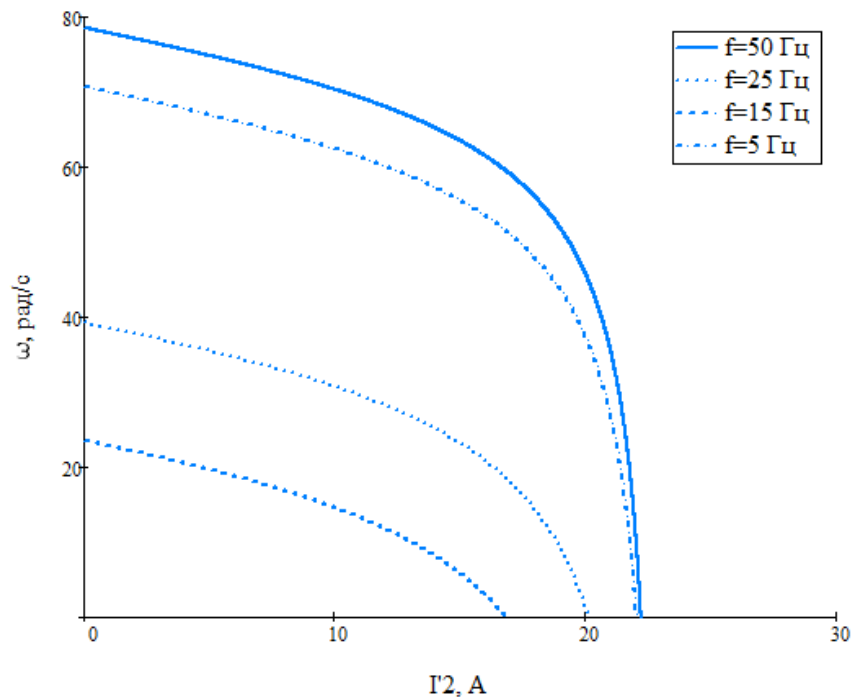


Рис. 2.4. Штучні характеристики 1LE1503-2DD6 (швидкісні) в системі частотного регулювання

2.4 Динаміка прямого пуску двигуна механізму вертикального руху кисневої фурми

Рівняння асинхронного двигуна яким є 1LE1503-2DD6 виражаються відносно синхронної системи відліку [7, 10]:

$$\theta = \int_0^t 2\pi f_{ном} dt, \quad (2.49)$$

де $f_{ном}$ – номінальна частотаю

Для визначення рівнянь асинхронного двигуна в іменованих величинах використовується перетворення Парка.

Рівняння напруги на статорі [7, 9]:

$$u_{ds} = \frac{1}{\omega_{\delta}} \frac{d\psi_{ds}}{dt} - \omega \psi_{qs} + R_s i_{ds}; \quad (2.50)$$

$$u_{qs} = \frac{1}{\omega_{\delta}} \frac{d\psi_{qs}}{dt} - \omega \psi_{ds} + R_s i_{qs}, \quad (2.51)$$

та

$$u_{0s} = \frac{1}{\omega_{\bar{\sigma}}} \frac{d\psi_{0s}}{dt} + R_s i_{0s}, \quad (2.52)$$

де u_{ds} , u_{qs} і u_{0s} – напруги статора по осі d, осі q та нульової послідовності, що визначаються таким чином [7]:

$$\begin{bmatrix} u_{ds} \\ u_{qs} \\ u_{0s} \end{bmatrix} = P_s \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix},$$

u_a , u_b і u_c – напруги статора на виводах ~1 та ~2.

$\omega_{\bar{\sigma}}$ – базова швидкість;

ψ_{ds} , ψ_{qs} і ψ_{0s} – це зв'язки потоку статора по осях d, q та нульової послідовності.

R_s – це опір статора.

i_{ds} , i_{qs} і i_{0s} – струми статора по осях d, q та нульової послідовності, що визначаються таким чином:

$$\begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{0s} \end{bmatrix} = P_s \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix},$$

i_a , i_b і i_c – струми статора, що протікають від виводу ~1 до виводу ~2.

Перетворення Парка-Горєва відображає рівняння статора в систему відліку, яка є нерухомою відносно номінальної електричної частоти [7]:

$$P_s = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta_e & \cos \left(\theta_e - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left(\theta_e + \frac{2\pi}{3} \right) \\ -\sin \theta_e & -\sin \left(\theta_e - \frac{2\pi}{3} \right) & -\sin \left(\theta_e + \frac{2\pi}{3} \right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix}, \quad (2.53)$$

де θ_e – електричний кут.

					КНУ.РБ.141.26.249с.02.СЧ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		42

Рівняння напруги ротора [7]:

$$u_{dr} = \frac{1}{\omega_{\delta}} \frac{d\psi_{dr}}{dt} - (\omega - \omega_r) \psi_{qr} + R_{rd} i_{dr} = 0; \quad (2.54)$$

та

$$u_{qr} = \frac{1}{\omega_{\delta}} \frac{d\psi_{qr}}{dt} + (\omega - \omega_r) \psi_{dr} + R_{rd} i_{qr} = 0, \quad (2.55)$$

де u_{dr} та u_{qr} – напруги ротора по осях d та q.

ψ_{dr} та ψ_{qr} – зв'язки потоку ротора по осях d та q.

ω – синхронна швидкість. Для синхронної системи відліку це значення дорівнює 1.

ω_r – механічна швидкість обертання.

R_{rd} – опір ротора відносно статора.

i_{dr} та i_{qr} – струми ротора по осях d та q.

Рівняння зв'язку потоку статора [7]:

$$\psi_{ds} = L_{ss} i_{ds} + L_m i_{dr}; \quad (2.56)$$

$$\psi_{qs} = L_{ss} i_{qs} + L_m i_{qr}, \quad (2.57)$$

$$\psi_{0s} = L_{ss} i_{0s}, \quad (2.58)$$

де L_{ss} – самоіндуктивність статора,

L_m – індуктивність намагнічування.

Рівняння зв'язку потоку ротора [7]:

$$\psi_{dr} = L_{rrd} i_{dr} + L_m i_{ds}; \quad (2.59)$$

$$\psi_{qr} = L_{rrd} i_{qr} + L_m i_{qs}; \quad (2.60)$$

де L_{rrd} – власна індуктивність ротора відносно статора.

Крутний момент ротора [7]:

$$M = \psi_{ds} i_{qs} - \psi_{qs} i_{ds}. \quad (2.61)$$

Власна індуктивність статора L_{ss} , індуктивність розсіювання статора L_{ls} та індуктивність намагнічування L_m пов'язані між собою [7]:

$$L_{ss} = L_{ls} + L_m. \quad (2.62)$$

Власна індуктивність ротора L_{rrd} , індуктивність розсіювання ротора L_{lrd} та індуктивність намагнічування L_m пов'язані між собою:

$$L_{rrd} = L_{lrd} + L_m. \quad (2.63)$$

Якщо відома крива насичення, рівняння для визначення індуктивності намагнічування в стані насичення як функції магнітного потоку [7]:

$$L_{m\text{ нас}} = f(\psi_m); \quad (2.64)$$

$$\psi_m = \sqrt{\psi_{dm}^2 + \psi_{qm}^2}. \quad (2.65)$$

У разі відсутності насичення рівняння зводиться до [7]:

$$L_{m\text{ нас}} = L_m. \quad (2.66)$$

Модель для симуляції пуску двигуна 1LE1503-2DD6 механізму вертикального руху кисневої фурми в MATLAB в основу якої покладені формули (2.49)–(2.66) див. на рис. 2.5.

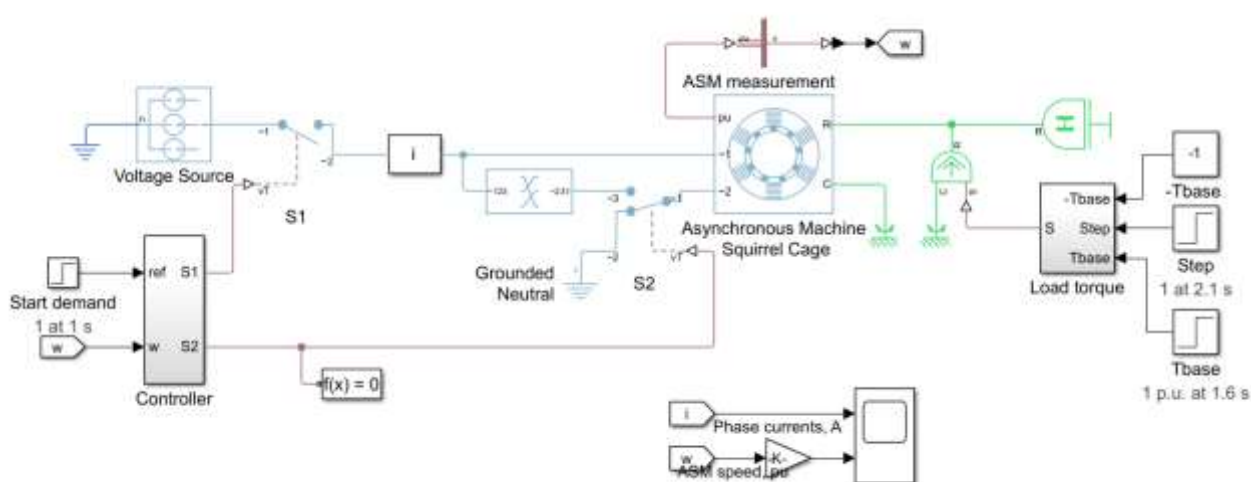


Рис. 2.5. Модель для симуляції пуску двигуна 1LE1503-2DD6 механізму вертикального руху кисневої фурми в MATLAB

Скориставшись величинами (2.13)–(2.46) обчисленими по заступній схемі (рис. 2.1) просимулемо пуск двигуна 1LE1503-2DD6 на номінальній частоті мережі.

При моделюванні прямого пуску в 1LE1503-2DD6 механізму вертикального руху кисневої фурми проявляється значний пусковий струм, який у кілька разів перевищує номінальне значення і створює суттєве навантаження на електромережу, що призводить до просідання напруги в точці підключення та може погано впливати на роботу інших електроприймачів.

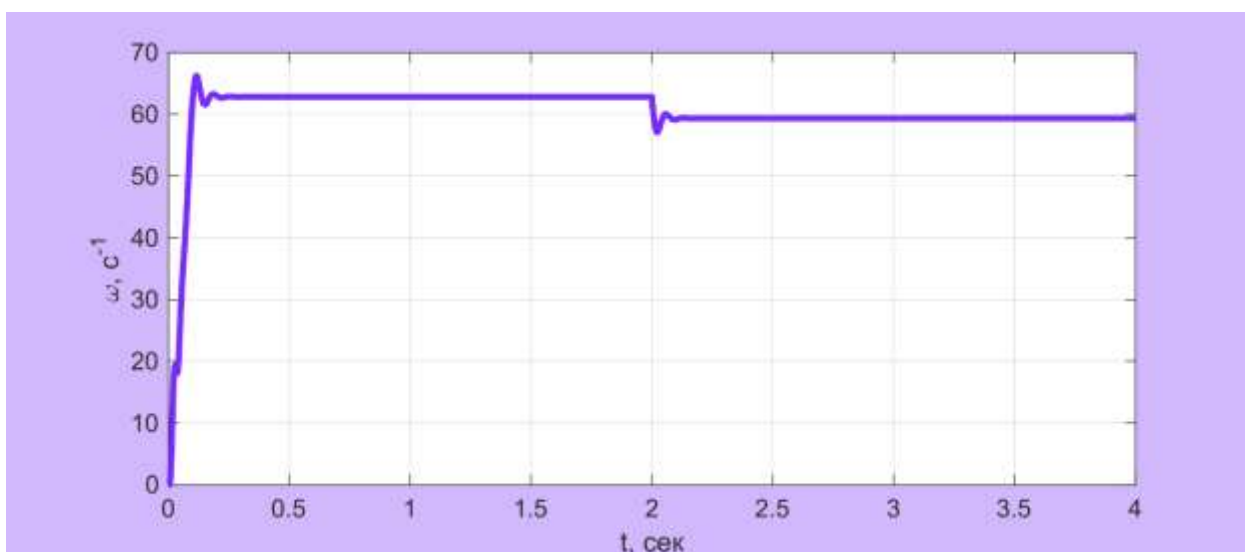


Рис. 2.6. Перехідний процес в 1LE1503-2DD6 за швидкістю

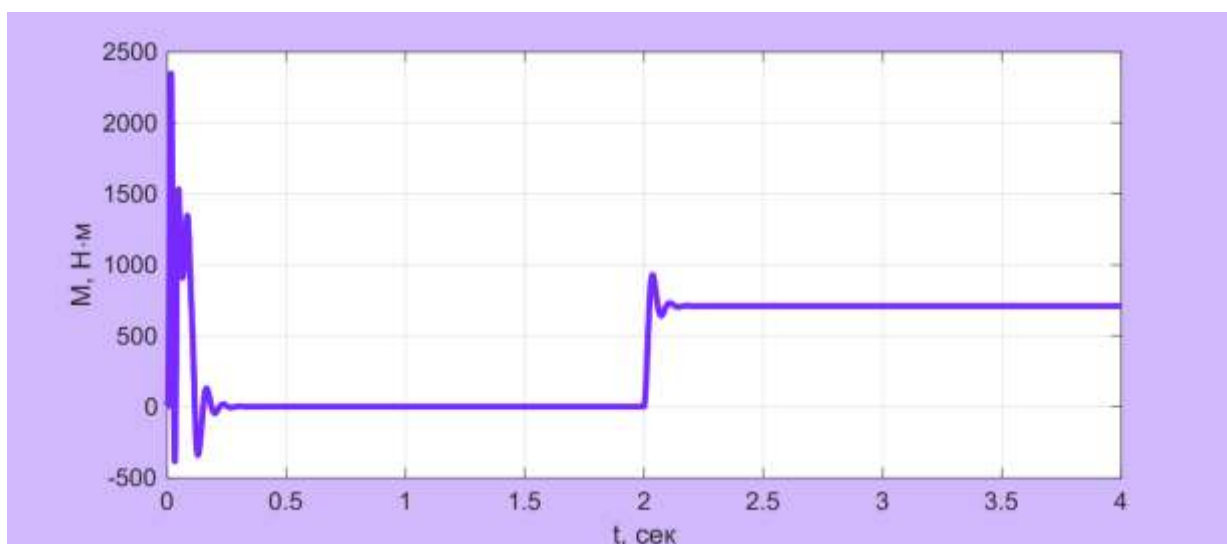


Рис. 2.7. Перехідний процес в 1LE1503-2DD6 за моментом

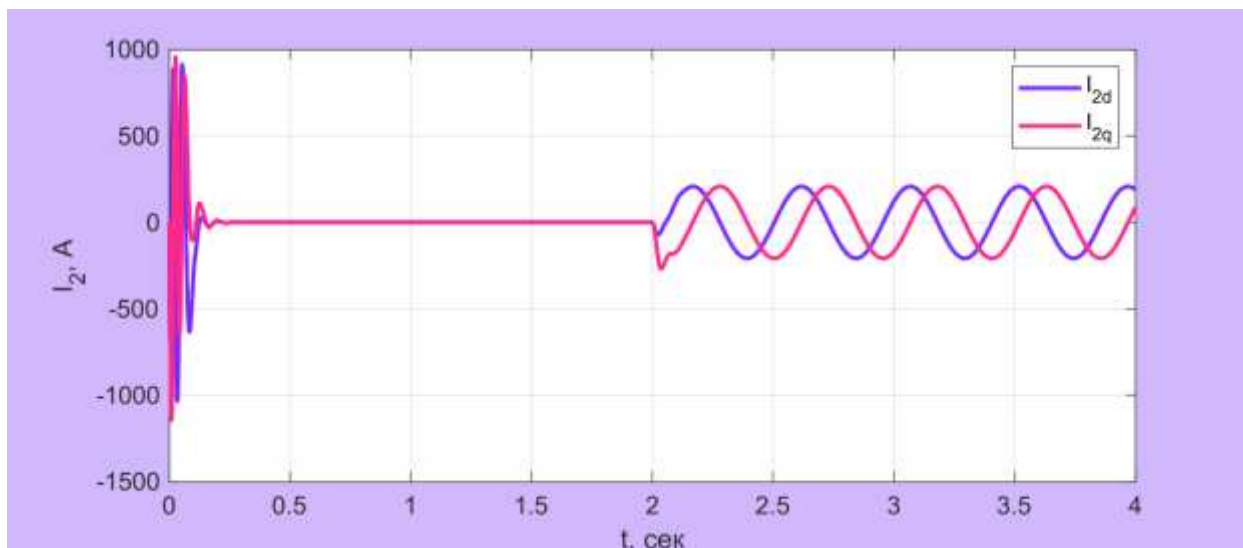


Рис. 2.8. Перехідний процес в 1LE1503-2DD6 за струмом ротора

Одночасно спостерігається різкий стрибок електромагнітного моменту, який хоча і забезпечує розгін двигуна, але має пульсуючий характер, що викликає механічні удари в приводі, підвищені вібрації та додаткові навантаження на вал, підшипники і зчеплення з робочим механізмом. У процесі моделювання також добре видно, що тривалість перехідного процесу може бути досить значною, особливо при великому моменті навантаження, що призводить до підвищених теплових втрат у обмотках статора і ротора, а отже до їх перегріву та зниження ресурсу ізоляції.

Моделювання також показує, що при прямому пуску відсутній контроль швидкості і плавності розгону, через що неможливо адаптувати режим пуску до характеристик навантаження, а це особливо критично для механізмів з великою інерцією або чутливих до ударних навантажень систем. У сукупності ці ефекти демонструють, що прямий пуск, незважаючи на простоту реалізації, супроводжується електромагнітними та механічними перевантаженнями, які можуть призводити до зниження надійності як самого двигуна, так і всієї електричної системи.

Висновки до розділу 2

У другому розділі на основі параметрів електродвигуна кисневої фурми конвертера було виконано розрахунок Т-подібної схеми заміщення, а також

сформовано статичні залежності, зокрема механічну та електромеханічну характеристики. Окрім цього, аналогічні характеристики визначено для режиму роботи двигуна з частотним керуванням. У результаті аналізу встановлено, що для системи перетворювач частоти – асинхронний двигун із застосуванням двигуна 1LE1503-2DD6 доцільно використовувати закон регулювання з підтриманням постійного співвідношення напруги до частоти.

					КНУ.РБ.141.26.249с.02.СЧ	Арк.
						47
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

РОЗДІЛ 3. ПРОЄКТНА РОЗРОБКА

					КНУ.РБ.141.26.249с.02.ПР					
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата						
Розроб.	Гладун І.М.				Проектна розробка			Літ.	Аркуш	Аркушів
Перевір.	Ільченко О.В.							Н	48	
								ЗЕЕМ-22		
Н.контр.	Ільченко О.В.									
Затверд.	Пересунько І.І.									

3.1 Опис системи управління електроприводом механізму вертикального руху кисневої фурми

3.1.1 Пряме керування моментом асинхронного двигуна

Принцип прямого керування моментом (ПКМ) під час управління АД базується на безпосередньому регулюванні електромагнітного моменту та потоку статора без використання проміжних контурів струму або координатних перетворень, характерних для векторного керування, і фактично є методом, у якому керуючі дії формуються на основі миттєвого стану електромагнітної системи двигуна. Основна ідея полягає в тому, що замість формування напруг або струмів за заданими законами, система безпосередньо вибирає такий стан інвертора, який забезпечує необхідну зміну моменту і магнітного потоку в кожен момент часу [11].

В основі ПКМ лежить оцінювання вектора потокозчеплення статора, який визначається інтегруванням різниці між прикладеною напругою та падінням напруги на активному опорі статора, тобто потокозчеплення розраховується за рівнянням, що відображає електромагнітний баланс у статорному колі

$$\vec{\psi}_1 = \int (\vec{u}_1 - R_s \vec{i}_1) dt, \quad (3.1)$$

де вектор потокозчеплення є інтегралом прикладеної напруги з урахуванням падіння напруги на опорі обмотки. На основі цього вектора визначається його модуль та кутове положення у просторі, що дозволяє оцінити сектор, у якому він знаходиться.

Електромагнітний момент двигуна у методі ПКМ визначається безпосередньо через вектори потокозчеплення та струму статора як їх векторний добуток, що відображає фізичний зміст взаємодії магнітного поля і струмів у машині [11]

$$M_e = \frac{3}{2} p (\vec{\psi}_1 \times \vec{i}_1), \quad (3.2)$$

					КНУ.РБ.141.26.249с.02.ПР	Арк.
						49
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

де p – число пар полюсів, а момент пропорційний площі паралелограма, утвореного цими векторами, тобто їх взаємній ортогональній складовій.

На відміну від класичних систем керування, у ПКМ відсутній етап формування сигналів ШІМ у традиційному розумінні, а використовується таблиця перемикання станів інвертора, яка вибирає один із шести активних або двох нульових векторів напруги залежно від поточного стану системи. Для цього використовуються гістерезисні регулятори моменту і потоку, які порівнюють задані значення з оціненими і формують сигнали помилки у вигляді дискретних рівнів. Якщо момент або потік виходять за межі заданої гістерезисної смуги, система миттєво змінює стан інвертора, щоб повернути їх у допустимий діапазон [11].

Важливим елементом є розбиття площини вектора потокозчеплення на шість секторів по 60 електричних градусів, що відповідає шести активним векторним станам інвертора. Знаючи сектор і знак відхилення моменту та потоку, система за спеціальною таблицею комутацій визначає, який саме вектор напруги слід прикласти до двигуна. Таким чином досягається безпосередній вплив на зміну довжини вектора потокозчеплення (його модуля) та його обертання у просторі, що відповідно змінює момент [11].

З фізичної точки зору, якщо потрібно збільшити момент, система вибирає такий вектор напруги, який збільшує кут між вектором потокозчеплення ротора і статора, що веде до збільшення електромагнітної взаємодії. Якщо потрібно зменшити момент, вибирається вектор, який зменшує цей кут. Аналогічно регулюється і модуль потокозчеплення: одні вектори напруги його збільшують, інші – зменшують або утримують приблизно сталим.

Особливістю методу є те, що перемикання інвертора відбувається не з фіксованою частотою, а залежно від стану системи, тобто частота комутації є змінною і визначається динамікою помилок моменту та потоку. Це забезпечує дуже швидку реакцію системи, оскільки відсутні інерційні ланки у вигляді ПІ-регуляторів струму, а керуючий вплив формується безпосередньо.

					КНУ.РБ.141.26.249с.02.ПР	Арк.
						50
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Разом із тим, така стратегія призводить до наявності пульсацій моменту і струму, оскільки керування здійснюється дискретними стрибками між векторами напруги.

3.1.2 Пряме керування моментом на базі фаззи-контролера

Розробка фаззи-контролера в системі ПКМ асинхронного двигуна спрямована на усунення основних недоліків класичного ПКМ, зокрема значних пульсацій електромагнітного моменту та потокозчеплення, а також змінної частоти комутації інвертора, і базується на заміні традиційних гістерезисних компараторів та таблиці перемикання інтелектуальною системою нечіткого логічного виведення, яка формує більш гнучкий і плавний закон керування.

У процесі побудови такого регулятора вихідною точкою є визначення вхідних і вихідних змінних системи. Як правило, у якості вхідних величин використовуються миттєві похибки електромагнітного моменту та потокозчеплення статора, тобто різниці між заданими і оціненими значеннями цих параметрів, а також інколи додатково вводиться інформація про сектор розташування вектора потокозчеплення або швидкість його зміни. Таким чином фаззи-контролер отримує повну інформацію про поточний електромагнітний стан двигуна.

Наступним етапом є фаззифікація цих вхідних змінних, що полягає у переході від точних числових значень до нечітких множин. Для цього кожна вхідна змінна розбивається на декілька, наприклад для похибки моменту можуть використовуватись такі як “велика від’ємна”, “мала від’ємна”, “нульова”, “мала додатна”, “велика додатна”. Аналогічним чином задаються функції належності для похибки потокозчеплення.

Ключовим елементом є база правил нечіткої логіки, яка фактично замінює класичну таблицю перемикання ПКМ. Ця база формується у вигляді набору логічних висловлювань типу “якщо–то”, які відображають експертні знання про поведінку електропривода. Наприклад, якщо момент значно менший за заданий і потокозчеплення також занижене, тоді необхідно вибрати такий вектор напруги, який одночасно збільшує і момент, і потокозчеплення. Якщо ж момент

					КНУ.РБ.141.26.249с.02.ПР	Арк.
						51
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

перевищує заданий, а потокозчеплення знаходиться у нормі, обирається вектор, що зменшує момент без істотного впливу на потік. Таким чином формується багатовимірна карта керуючих дій, яка є більш гнучкою, ніж жорстка дискретна таблиця.

У процесі нечіткого виведення виконується агрегація правил, де для кожного правила визначається ступінь його активації залежно від значень функцій належності вхідних змінних. Далі всі активовані правила об'єднуються, формуючи нечітку множину вихідної змінної. Вихідною змінною фаззі-контролера у системі ПКМ може бути або безпосередній вибір вектора напруги інвертора, або більш узагальнена величина, наприклад бажаний кут зміни вектора потокозчеплення чи індекс керування для просторово-векторної модуляції.

Після цього виконується дефазифікація, тобто перетворення нечіткого результату у чітке керуюче значення. Найчастіше використовується метод центру ваги, який забезпечує плавну зміну вихідного сигналу. Це дозволяє уникнути різких стрибків, характерних для гістерезисного керування, і тим самим значно зменшити пульсації моменту та струму.

Важливою особливістю розробки фаззі-контролера є вибір кількості та форми функцій належності, а також налаштування бази правил. Ці параметри визначають якість керування і зазвичай підбираються або на основі експертних знань, або з використанням методів оптимізації, таких як генетичні алгоритми чи нейромережі. При цьому враховується компроміс між точністю регулювання і складністю реалізації.

Інтеграція фаззі-контролера у ПКМ призводить до зміни принципу формування керуючих сигналів: замість жорсткого вибору одного з шести векторів напруги використовується більш плавний і адаптивний механізм, який може враховувати нелінійності двигуна, зміну параметрів і зовнішні збурення. Це особливо важливо при роботі на низьких швидкостях, де класичний ПКМ має проблеми через похибки оцінювання потокозчеплення.

					КНУ.РБ.141.26.249с.02.ПР	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		52

3.2 Розробка фаззі-контролера прямого керування моментом в системі управління електроприводом вертикального руху кисневої фурми

У системі ПКМ з фаззі-контролером набір вхідних і вихідних змінних визначається тим, що ми фактично замінюємо класичні гістерезисні компаратори та таблицю перемикання на блок нечіткого прийняття рішень, який повинен напругу керувати інвертором через вибір вектора напруги.

Вхідними змінними для такого нечіткого регулятора мають виступати дві головні керовані похибки електромеханічної системи асинхронного двигуна: похибка електромагнітного моменту та похибка потокозчеплення статора. Похибка моменту визначається як різниця між заданим і оціненим моментом двигуна, тобто $e_M = M_{завд} - M_e$, і вона показує, наскільки двигун недовантажений або перевантажений відносно бажаного режиму. Друга змінна – це похибка потокозчеплення статора $e_\psi = \psi_{завд} - |\psi_1|$, яка характеризує відхилення магнітного стану машини від оптимального рівня збудження. Саме ці дві змінні формують основну “карту стану” електропривода, на основі якої приймається рішення про зміну керуючого вектора напруги.

У більш розширених варіантах фаззі-ПКС до цих двох сигналів додають ще одну або дві похідні змінні. Найчастіше це зміна похибки моменту Δe_M , яка дозволяє оцінити динаміку зміни навантаження і покращити швидкодію регулятора. Інколи також додають інформацію про сектор положення вектора потокозчеплення, тобто дискретну змінну $S_\psi \in \{1...6\}$, яка показує, в якій просторовій області знаходиться магнітне поле статора. Це важливо, тому що в ПКМ керування безпосередньо залежить від геометрії просторових векторів напруги.

Вихідною змінною фаззі-контролера в ПКМ є керуюча дія інвертора, тобто вибір оптимального вектора напруги. У класичному ПКМ це був дискретний індекс комутації U_k , який відповідає одному з шести активних або двох нульових векторів інвертора. У випадку нечіткого регулятора вихід може задаватися у двох основних формах: або як дискретний номер вектора напруги

$U_{on} \in \{U_1 \dots U_6, U_0\}$, або як безперервна керуюча величина, яка потім перетворюється через просторово-векторну модуляцію у відповідні імпульси керування транзисторами.

У більш сучасних реалізаціях вихід нечіткого регулятора часто задається не напряму як “який вектор увімкнути”, а як узагальнений керуючий вектор напруги статора $\vec{u}_1^{завд}$, тобто бажаний напрям і амплітуда напруги, яка повинна бути синтезована інвертором. Далі цей вектор розкладається на активні та нульові стани інвертора через алгоритм модуляції.

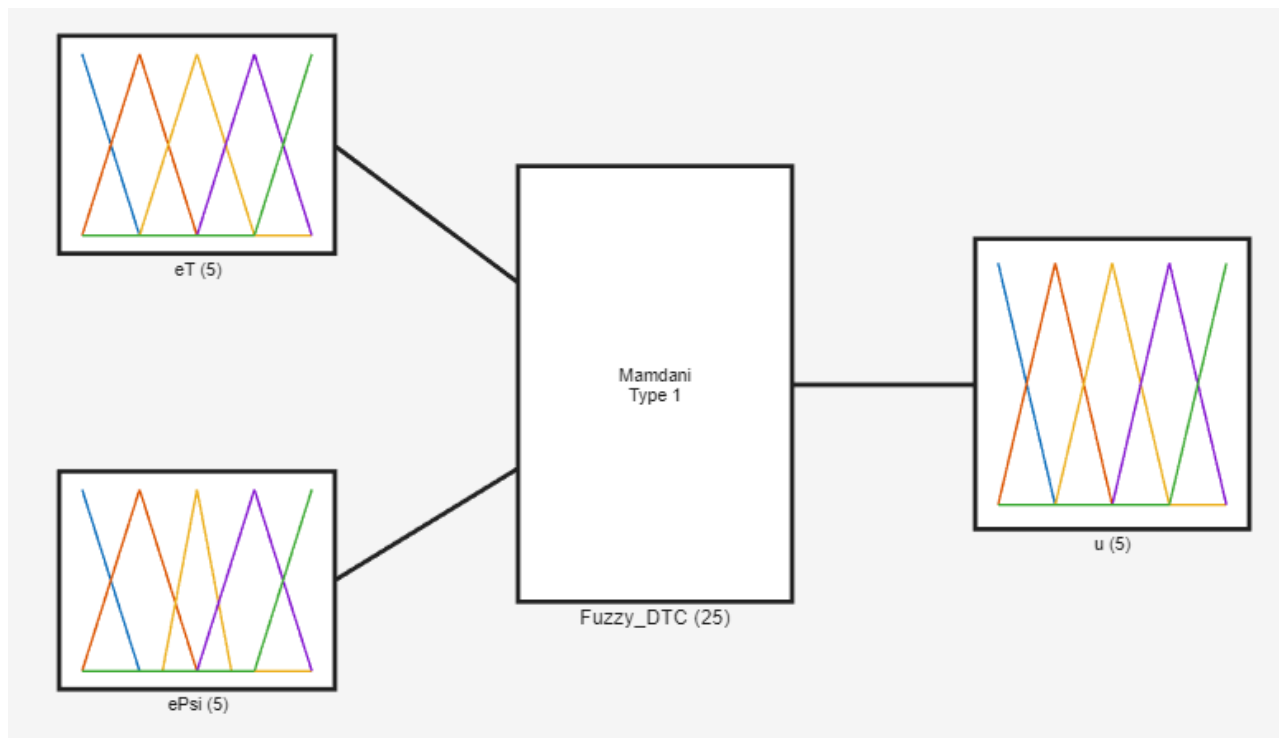


Рис. 3.1. Структура фаззі-контролера прямого керування моментом електропривода механізму вертикального руху кисневої фурми

Таким чином, у структурі фаззі-ПКМ маємо: на вході – похибка моменту e_M , похибка потокозчеплення e_ψ , а на виході – вибір вектора напруги інвертора або еквівалентний керуючий сигнал для його формування через SVM. Це дозволяє замінити жорстку логіку перемикавання на більш плавну та адаптивну систему прийняття рішень.

3.2.1 Вхідна змінна: похибка моменту

Спочатку нормуємо момент (для двигуна 55 кВт номінальний момент приблизно):

$$M_{ном} = \frac{9550 \cdot P_{ном}}{n} = \frac{9550 \cdot 55}{740} \approx 709 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (3.3)$$

Нормована похибка:

$$e_M \in [-1, 1]. \quad (3.4)$$

Нечіткі множини для e_M :

NB (Negative Big)

NS (Negative Small)

ZE (Zero)

PS (Positive Small)

PB (Positive Big)

Функції належності (трикутні):

$$\mu_{NB}(e_M) = \begin{cases} 1, & e_M \leq -1 \\ \frac{-0,5 - e_M}{0,5}, & -1 < e_M < -0,5; \\ 0, & e_M \geq -0,5 \end{cases} \quad (3.5)$$

$$\mu_{NS}(e_M) = \begin{cases} 0, & e_M \leq -1 \\ \frac{e_M + 1}{0,5}, & -1 < e_M < -0,5; \\ \frac{-e_M}{0,5}, & -0,5 \leq e_M < 0 \end{cases} \quad (3.6)$$

$$\mu_{ZE}(e_M) = \begin{cases} 0, & |e_M| \geq 0,5 \\ 1 - \frac{|e_M|}{0,5}, & |e_M| < 0,5; \end{cases} \quad (3.7)$$

$$\mu_{PS}(e_M) = \begin{cases} 0, & e_M \leq 0 \\ \frac{e_M}{0,5}, & 0 < e_M < 0,5 \\ \frac{1-e_M}{0,5}, & 0,5 \leq e_M < 1 \end{cases}; \quad (3.8)$$

$$\mu_{PB}(e_M) = \begin{cases} 0, & e_M \leq 0,5 \\ \frac{e_M - 0,5}{0,5}, & 0,5 < e_M < 1. \\ 1, & e_M \geq 1 \end{cases} \quad (3.9)$$

3.2.2 Вхідна змінна: похибка поточкозчеплення

Нормування:

$$e_\psi \in [-1,1]. \quad (3.10)$$

Множини для e_μ такі ж: NB, NS, ZE, PS, PB

Функції належності аналогічні до e_M , але потік контролюється точніше, ніж момент:

$$\mu_{ZE}(e_\psi) = \begin{cases} 0, & |e_M| \geq 0,3 \\ 1 - \frac{|e_\psi|}{0,3}, & |e_M| < 0,3 \end{cases}. \quad (3.11)$$

3.2.3 Вихідна змінна: керуючий вектор інвертора

Задається як дискретний індекс:

$$u \in \{U_0, U_1, U_2, U_3, U_4, U_5, U_6\}. \quad (3.12)$$

Для фаззи логіки нормуємо:

$$u \in [-1,1]. \quad (3.13)$$

Множини для u :

NB – сильне зменшення моменту/потoku, NS, ZE, PS, PB – сильне збільшення

					КНУ.РБ.141.26.249с.02.ПР	Арк.
						56
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Функції належності:

$$\mu_{NB}(u) = \begin{cases} 1, & u \leq -1 \\ \frac{-0,5 - u}{0,5}, & -1 < u < -0,5; \end{cases} \quad (3.14)$$

$$\mu_{ZE}(u) = \begin{cases} 1 - \frac{|u|}{0,4}, & |u| < 0,4; \\ 0, & \text{інше} \end{cases} \quad (3.15)$$

$$\mu_{PB}(u) = \begin{cases} 0, & u < 0,5 \\ \frac{u - 0,5}{0,5}, & 0,5 < u < 1. \\ 1, & u \geq 1 \end{cases} \quad (3.16)$$

Підсумкові належності системи бачимо на рис. 3.2.

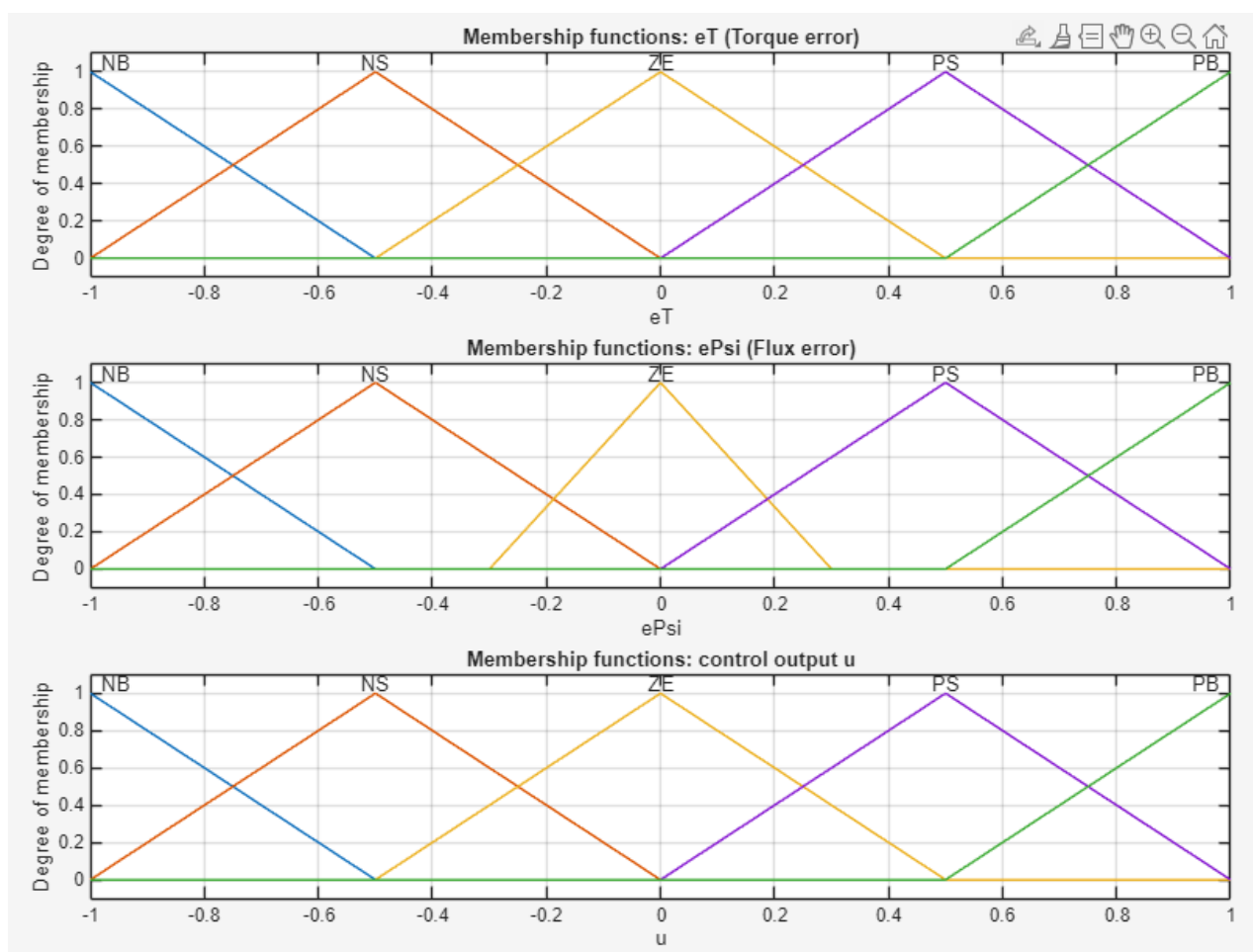


Рис. 3.2. Функції належності фаззі-контролера прямого керування моментом електропривода механізму вертикального руху кисневої фурми

Таблиця правил фаззі-контролера (див. табл. 3.1) відображає прямий фізичний зв'язок між станом двигуна і вибором вектора напруги, забезпечуючи баланс між точністю регулювання моменту та стабілізацією потокозчеплення.

Якщо момент нижчий за заданий, правила формують дію на його збільшення, якщо вищий, то на зменшення. Аналогічно, при зниженому потокозчепленні обираються вектори, що підсилюють магнітне поле, а при завищеному послаблюють його. Центральна область похибок відповідає режиму утримання, де керування мінімальне.

Таблиця 3.1 – База правил фаззі-контролера

e_M / e_ψ	NB	NS	ZE	PS	PB
NB	ZE	PS	PB	PB	PB
NS	NS	ZE	PS	PB	PB
ZE	NS	NS	ZE	PS	PS
PS	NB	NS	NS	ZE	PS
PB	NB	NB	NS	NS	ZE

3.3 Симуляція роботи системи прямого керування моментом електроприводу механізму вертикального руху фурми

Загальна симуляційна модель прямого керування моментом електроприводу механізму вертикального руху фурми і блоків системи управління моделі показані на рис. 3.3 – 3.5.

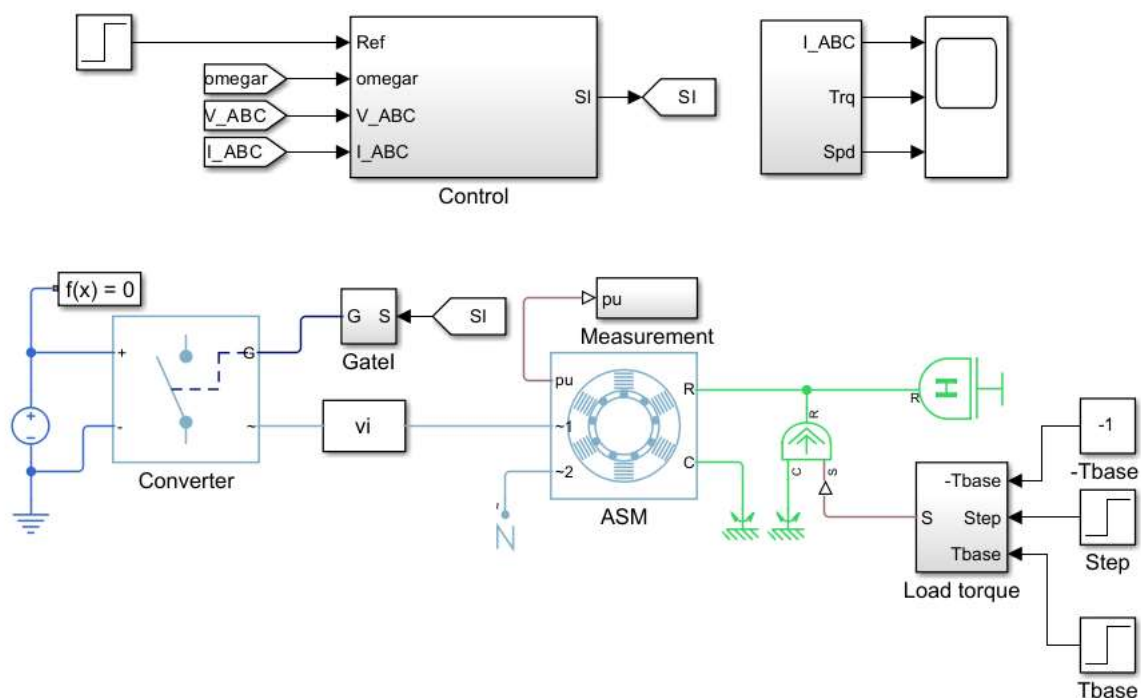


Рис. 3.3. Загальна симуляційна модель прямого керування моментом електроприводу механізму вертикального руху фурми [12]

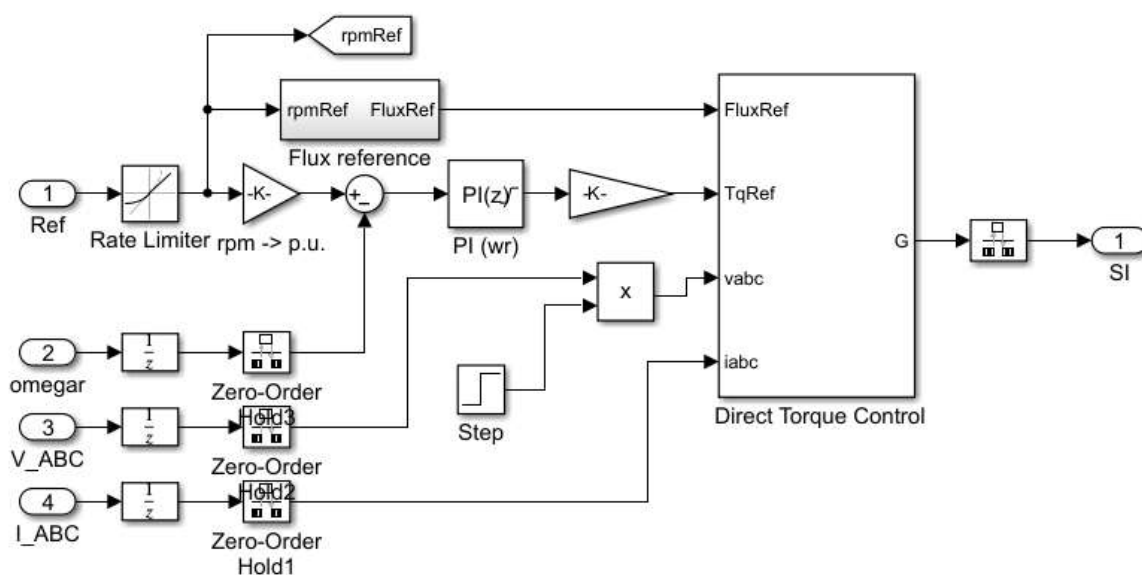


Рис. 3.4. Блок Controller [12]

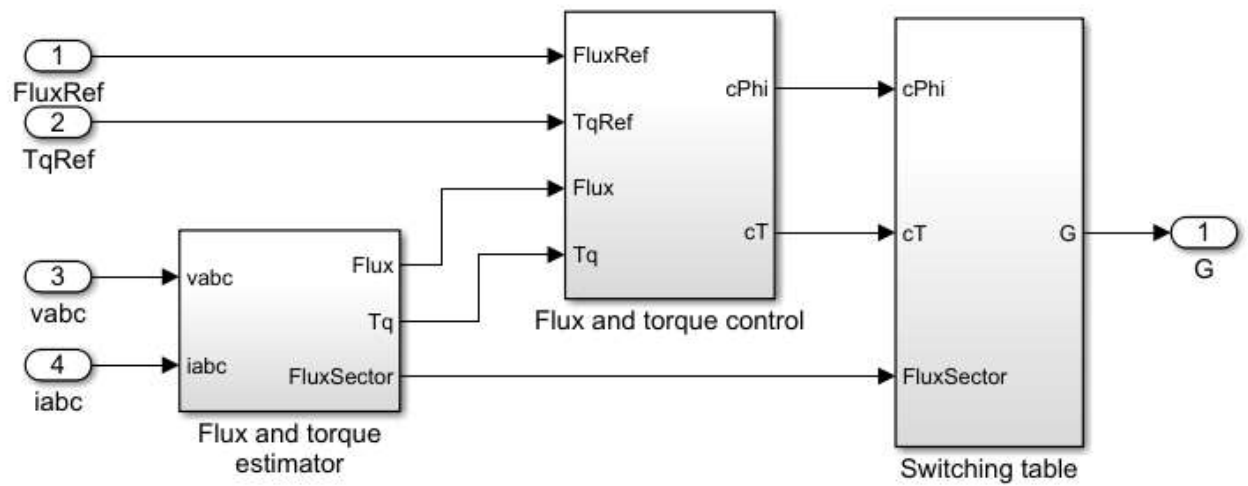


Рис. 3.5. Блок Direct Torque Control [12]

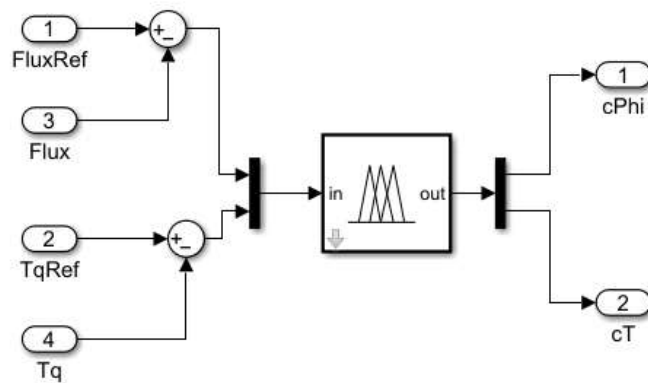


Рис. 3.6. Блок Flux and torque Control

Перехідні процеси в електроприводі були розраховані на персональному комп'ютері з застосуванням прикладного програмного забезпечення MATLAB (рис. 3.7).

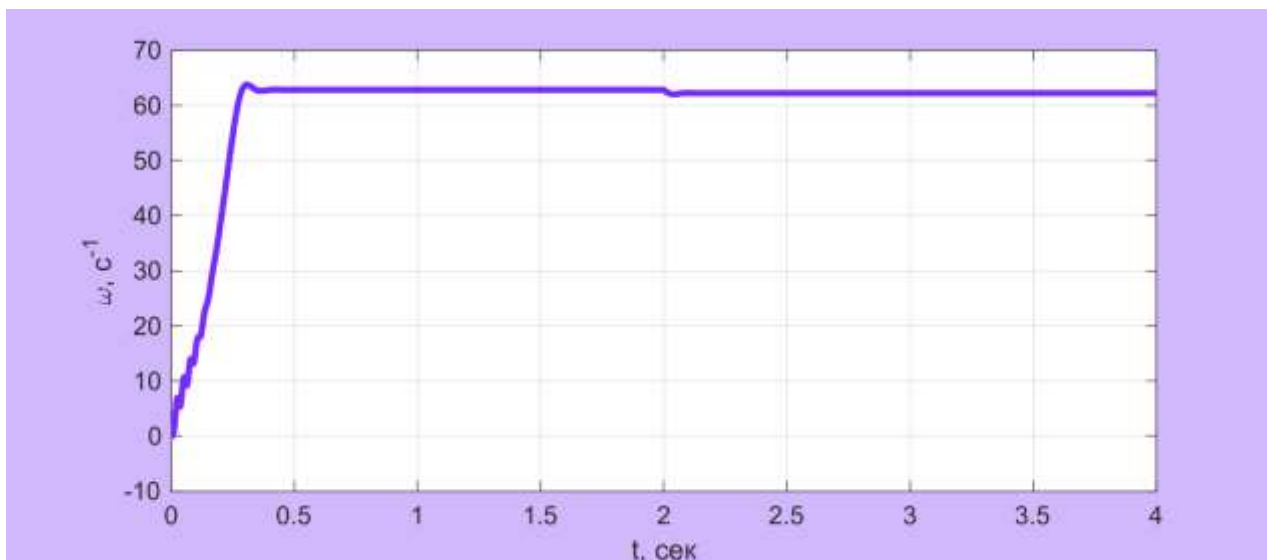


Рис. 3.7. Динаміка за швидкістю при задіянні прямого керування моментом електроприводу механізму вертикального руху фурми

З графіку (рис. 3.7), що система управління відпрацьовує стабілізацію при накиданні навантаження.

Висновки до розділу 3

У третьому розділі були створена система прямого керування моментом електроприводу механізму вертикального руху кисневої фурми кисневої фурми, у якій застосовуються фаззі-контролер, що відпрацьовує похибки за моментом і потокозчепленням для керування інвертором в системі частотного регулювання. У середовищі MATLAB/Simulink створено симуляційну модель системи на якій проведено симуляцію функціонування системи, що показала її працездатність, що вказує на можливість застосування модернізованого приводу при виготовленні сталі в конвертерному цеху ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг».

Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата

КНУ.РБ.141.26.249с.02.ПР

Арк.

61

Висновки

1. Обґрунтовано вибір силового та перетворювального обладнання для електроприводу механізму вертикального руху кисневої фурми конвертерного цеху. На основі кінематичного та динамічного розрахунку механізму підібрано асинхронний двигун та частотний перетворювач виробництва SIEMENS, що забезпечують необхідний діапазон регулювання швидкості, точність позиціонування та плавність пуско-гальмівних режимів відповідно до технологічних вимог конвертерного виробництва.

2. Розрахунок Т-подібної заступної схеми та симуляція перехідних процесів при прямому підключенні до мережі підтвердили наявність значних пускових струмів та різких пульсацій електромагнітного моменту, що зумовлює механічні удари в кінематичному ланцюзі та просідання напруги в цеховій мережі, обґрунтовуючи доцільність переходу на частотно-регульований привід.

3. Проаналізовано ефективність класичного методу прямого керування моментом. Дослідження показало, що традиційне пряме керування моментом забезпечує високу швидкодію, однак характеризується суттєвими недоліками: значними пульсаціями моменту та струму, а також змінною частотою комутації інвертора, що ускладнює точне позиціонування фурми та обмежує роботу приводу на низьких швидкостях.

4. Розроблено систему прямого керування моментом для електроприводу механізму вертикального руху фурми із фаззі-контролером. Замінено жорсткі гістерезисні компаратори та таблицю перемикавання на блок нечіткої логіки з функціями належності для похибок моменту та потокозчеплення статора. Оптимізована база з 25 правил логічного виведення для отримання керуючого вектора напруги.

5. Комп'ютерна симуляція запропонованого електропривода з фаззі-керування у середовищі MATLAB/Simulink продемонструвала стабілізацію системи при накиданні номінального навантаження та відсутність критичних перерегулювань. Отримані результати засвідчують технічну доцільність впровадження розробленого приводу в конвертерному цеху ПАТ

					КНУ.РБ.141.26.249с.02.В	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		62

«АрселорМіттал Кривий Ріг» для підвищення надійності механізму подачі
кисню завдяки точності позиціювання фурми.

.

					КНУ.РБ.141.26.249с.02.В	Арк.
						63
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Бібліографія

1. Методичні вказівки з дисципліни «Технологія конструкційних матеріалів і матеріалознавство» до виконання лабораторного практикуму з розділу «Металургія чорних металів» для студентів механічних спеціальностей усіх форм навчання / Укл.: Трофименко В.В., Клименко О.П., Овчаренко В.І. Дніпропетровськ: УДХТУ, 2012. 36 с.

2. Металургія сталі. Конвертерне виробництво: теорія, технологія, якість металу, конструкція агрегатів, рециркуляція матеріалів і екологія / О.Г. Величко, Б.М. Бойченко, П.С. Харлашин, М.Є. Нехаєв. Дніпро: РВА «Дніпро-VAL», 2015. 434 с.

3. Машины і агрегати киснево-конвертерних і електро-сталеплавильних цехів: електронний посібник. *Науково-методичний центр*. URL:

https://vukladach.pp.ua/MyWeb/manual/pidruchnuku13122023/Mahunu_i_agregatu_ztaleplavelnih_cehiv/2_2/2.htm (дата звернення: 19.05.2026)

4. Машины для подання кисню до конвертера. *ПАТ «Азовмаш»*. URL: <https://www.azovmash.com/ua/catalog/266> (дата звернення: 05.05.2026)

5. Catalog D 81.1. SIMOTICS Motors SIMOTICS GP, SD, XP, DP Low-Voltage Motors Type series 1FP1, 1LE1, 1LE5, 1MB1, 1MB5 and 1PC1 Frame sizes 63 to 450 · Power range 0.09 to 1000 kW. URL: https://cache.industry.siemens.com/dl/files/197/109749197/att_1110720/v1/Motors-D81-1-complete-English-12-2021-Update_2022-07.pdf (дата звернення: 12.05.2026)

6. SINAMICS G120 frequency converters. Hardware Installation Manual PM240-2 Power Modules, IP20 / push-through technology (PT). URL: https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:48fca72b-670d-40f6-aa0d-f25cef30e33c/SINAMICSG120-Manual-de-instalacao-PM240-2-EN_original.pdf (дата звернення: 25.05.2026)

7. Induction Machine Squirrel Cage. *MATLAB Help Center*. URL: <https://www.mathworks.com/help/sps/ref/inductionmachinesquirrelcage.html>

					КНУ.РБ.141.26.249с.02.Л	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		64

8. Теорія електропривода: підручник / М.Г. Попович, М.Г. Борисюк, В.А. Гаврилюк та ін.; За ред. М.Г. Поповича. Київ: Вища школа, 1993. 494 с.
9. Моделювання електромеханічних систем / О.П. Чорний, А.В. Луговой, Д.Й.Родькін, Г.Ю. Сисюк, О.В.Садовой. Кременчук: КНУ ім. М. Остроградського, 2001. 410 с.
10. Моделювання електромеханічних систем. Математичне моделювання систем асинхронного електроприводу: навчальний посібник / О. І. Толочко. Київ: НТУУ «КПІ», 2016. 150 с.
11. Chakraborty S., Huddar A.P. Direct Torque Control of Induction Motor. *International Journal of Advanced in Management, Technology and Engineering Sciences*. 2018. Vol. 8, No 3. Pp. 1–6. URL: <https://ijamtes.org/gallery/1%20conference.pdf>
12. Control Speed of Induction Machine with Direct Torque Control Method. *MATLAB Help Center*. URL: <https://www.mathworks.com/help/sps/ug/asynchronous-machine-direct-torque-control.html> (дата звернення: 02.06.2026)

					КНУ.РБ.141.26.249с.02.Л	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		65