

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет будівництва, транспорту та енергетики

Кафедра "Автоматизації виробничих процесів"

"Допущено до захисту"

Зав.кафедрою АВП

к.т.н., доцент

\_\_\_\_\_Дідик О.К.

" \_\_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2023р.

## **ВИПУСКНА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА за першим (бакалаврським) рівнем вищої освіти**

на тему

"Модернізація системи керування електроприводом екструдера при  
виготовленні кормів"

"Modernization of the control system of the electric drive of the extruder  
during the production of folder"

Виконав: здобувач вищої освіти

IV курсу, групи АК-20-3ск

ОПП «Автоматизація та

комп'ютерно-інтегровані технології»

спеціальність 151 «Автоматизація та

комп'ютерно-інтегровані технології»

\_\_\_\_\_Михайло РОГОВ

" \_\_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2023р.

Керівник роботи

професор, канд.техн.наук

\_\_\_\_\_Віктор КАЛІЧ

" \_\_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2021р.

Рецензент \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

м. Кропивницький

## ЗМІСТ

|                                                                                                                                                               |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Вступ.....                                                                                                                                                    | 3  |
| 1 Призначення та область застосування системи керування електроприводом екструдера.....                                                                       | 4  |
| 1.1 Вживання технології екструзії.....                                                                                                                        | 4  |
| 1.2 Основні відомості про екструдер.....                                                                                                                      | 7  |
| 1.3 Опис екструдера.....                                                                                                                                      | 9  |
| 1.4 Опис технологічного процесу.....                                                                                                                          | 12 |
| 2 Огляд існуючих рішень та обґрунтування прийнятого принципу побудови виробу.....                                                                             | 15 |
| 2.1 Опис систем регульованого електроприводу асинхронних двигунів з короткозамкнутим ротором.....                                                             | 15 |
| 2.1.1 Будова асинхронних електродвигунів.....                                                                                                                 | 15 |
| 2.1.2 Системи частотного керування.....                                                                                                                       | 17 |
| 2.2 Частотний спосіб регулювання обертами вала АД.....                                                                                                        | 22 |
| 2.3 Вимоги до систем керування електроприводом екструдера при виготовленні кормів.....                                                                        | 24 |
| 2.4 Вибір принципу побудови системи керування.....                                                                                                            | 25 |
| 3 Опис та обґрунтування обраних проектних рішень та конструкцій.....                                                                                          | 26 |
| 3.1 Вибір перетворювача частоти.....                                                                                                                          | 26 |
| 3.2 Механічна характеристика асинхронного двигуна.....                                                                                                        | 28 |
| 3.3 Розрахунок параметрів лінеаризованої структурної схеми електропривода з асинхронним двигуном. Визначення основних показників динамічних властивостей..... | 30 |
| 3.4 Розрахунок силової частини випрямляча.....                                                                                                                | 34 |
| 4 Розрахунки та експериментальні матеріали, що підтверджують працездатність та надійність виробу.....                                                         | 41 |

|                                                                        |    |
|------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.1 Дослідження регуляторів .....                                      | 41 |
| 4.1.1 Дослідження П-регулятора.....                                    | 41 |
| 4.1.2 Дослідження ПІД-регулятора.....                                  | 44 |
| 4.2 Побудова структурних ланок та дослідження їх<br>характеристик..... | 45 |
| Висновок.....                                                          | 56 |
| Література.....                                                        | 57 |

## ВСТУП

Збільшення виробництва м'ясної і молочної продукції в Україні неможливе без відновлення і збільшення поголів'я великої рогатої худоби. При виробництві кормових сумішей для молочних корів і комбікормів для відгодівлі телят традиційно використовували трав'яне борошно для балансування поживності малоцінної сировини.

Протягом останніх десяти років виробництво трав'яного борошна в Україні практично припинено через високу вартість. Відновлення цехів виробництва трав'яного борошна економічно недоцільно. Більш перспективною є розробка енергозберігаючої технології виробництва комбікормової продукції для великої рогатої худоби з використанням екструдера. Застосування технологічних процесів подрібнення сумішей кормових засобів, гранулювання та екструдювання створює умови для реалізації такої технології на невеликих комбікормових заводах, розташованих в сільській місцевості.

На даний час використання екструдованих продуктів є дуже актуальне, тому раціонально постійно модернізувати екструдер для зменшення затрат, та виготовлення більш високоякісної продукції. Тому для покращення якості кінцевого продукту потрібно повністю контролювати процес переробки сировини. Так як початкова сировина не є однорідною, і її характеристики можуть змінюватися під час технологічного процесу, тому є актуальна розробка керованого електроприводу екструдера.

# 1 Призначення та область застосування системи керування електроприводом екструдера

## 1.1 Вживання технології екструзії

Екструдований корм – перший крок до прибутку. В більшості господарств, особливо коли вони самі готують корми, процес цей складається з подрібнення, змішування і інколи гранулювання. Проте перераховані способи не дозволяють активно впливати на молекулу білка, «розкривати» її, полегшуючи доступ травних ферментів до амінокислот. В результаті тварини і птиця витрачають значну кількість енергії на переварювання корму, збільшуються витрати на виробництво продукції.

*Характеристики кормів.*

Вплив екструзії на білки.

Обробка підвищує перетравлюваність білків, робить доступнішими амінокислоти унаслідок руйнування в молекулах білка вторинних зв'язків.

Завдяки низьким температурам і короткому терміну теплової обробки самі амінокислоти при цьому не руйнуються. Однак екструдери нейтралізують чинники, які негативно впливають на харчову цінність сировини. Екструзія добре впливає на білкові добавки для жуйних тварин, оскільки при цьому збільшується кількість білка, який не руйнується, крім того, забезпечується повніша засвоюваність білка. Тому підвищується продуктивність худоби і знижуються витрати кормів.

Вплив на жири.

Відбувається розрив стінок жирових клітин, це сприяє підвищенню енергетичної цінності продукту. Також підвищується стабільність жирів. Сировина знаходиться під впливом максимальних температур всього 5–6 секунд, а для окислення потрібна набагато вища температура і триваліша теплова обробка.

Вплив на клітковину.

Клітковина в процесі екструзії подрібнюється, що підвищує її перетравлюваність.

#### Вплив на смакові якості.

Практика показує, що екструдкування значно підвищує смакові якості готового продукту. Цьому є декілька причин:

- крохмаль розщеплюється на простіші, солодші компоненти;
- при виході продукту з екструдера випаровується неприємний запах, характерний для деякої сировини (наприклад соєвих бобів);
- готовий продукт має однорідну структуру.

#### Екструдований ячмінь.

Має високі смакові якості і підвищену до 12% перетравлюваність живильних речовин в організмі поросят. Рівень введення до 50% в рецептурах комбікормів стартерів.

#### Екструдована пшениця.

Високоцінний енергетичний компонент з низьким (1,2%) вмістом клітковини. За змістом протеїну і лізину перевершує кукурудзу (майже в 2 рази). Рівень введення, що рекомендується, в зерносуміші до 45%. Добре поєднується з використанням інгредієнтів з високим рівнем клітковини.

#### Вживання екструдованих кормів дозволяє:

- знизити швидкість розщеплення білка;
- підвищити синтез мікробіального білка на 30 %;
- підвищити засвоюваність крохмалю;
- знизити швидкість ферментації крохмалю;
- підвищити енергетичну поживність раціону на 10 - 15 %.

Продукти екструзій актуальні з ряду причин:

- стійкій тенденції до вживання нових м'ясних порід, кросів і гібридів, чий продуктивний потенціал вимагає істотного поліпшення білкового і енергетичного живлення;

- об'єктивного скорочення в раціонах високовартісних ресурсів тваринного походження, рибної муки, а також кукурудзи і соєвого шроту, з використанням замість них некондиційного зернофуражу, іржі, трітікале, висівки і так далі.

- виробництва «власних» комбікормів безпосередньо у господарствах.

У дослідах на молодняку (бички) КРС заміна 2,4 кг комбікорму на таку ж кількість розробленого кормового продукту сприяла підвищенню продуктивності (добовий приріст живої маси) на 25,5%, зниженню витрат сухої речовини на 1 кг приросту живої маси на 13,6%.

Екструзія зерна злакових (кукурудза, ячмінь і ін.) дозволяє збільшувати в них рівень цукрів на 15%, а декстрину (продуктів гідролізу крохмалю) – більш ніж в 5 разів, в порівнянні з вихідною сировиною. Кількість нативного крохмалю зменшується на 12 – 14 %, що дозволяє істотно скоротити використання молочних кормів і білкових джерел мікробіологічного і тваринного походження (на 30 – 60%). Понизити собівартість вирощування поросят до 30 – 40%.

Згодовування поросятам екструдованого корму позитивно позначилося на інтенсивності їх зростання. Так за 35 днів вирощування їх середньодобовий приріст був вищий на 20,4% і склав в середньому 365г.

При годуванні птиці знижується витрата кормів до 25 – 30% і собівартість виробництва м'яса, яєць.

При годуванні риби поїдання корму досягає 100%, оскільки екструдат довго знаходиться на поверхні води. Травна система риб досить примітивна, тому годування здійснюється лише екструдатом. Переваги екструдованих кормів по відношенню до звичайних кормів:

- висока засвоюваність – дозволяє вводити в раціон тварини 25 – 30 % звичайної порції (тобто корму потрібно менше);

- стерильність – ця якість особлива важлива при відгодівлі на ранніх стадіях розвитку;

- відмінні абсорбуючі властивості – при годуванні нейтралізують різні кишкові інфекції і роздратування;

- особливі смакові якості – є стимулятором вживання тваринами при підмішуванні кормів нижчої споживчої якості;
- високі прирости – скорочується час вмісту тварин на відгодівлі;
- низька вологість – дозволяє зберігати його на протязі 6 місяців без змін його властивостей;
- використання в сухому вигляді – без запарювання, отже, економії засобів на розігрівання і чищення годівниці.

## **1.2 Основні відомості про екструдер**

Екструдер (від лат. extrudo – виштовхую), агрегат для розм'якшення матеріалів і надавання ним форми шляхом продавлювання через профілюючий інструмент, перетин якого відповідає конфігурації виробу. Процес переробки матеріалів в екструдері називається екструзією. Він складається з таких основних вузлів: корпус, з нагрівальними елементами; робочий орган; силовий привод; система завдання і підтримки температурного режиму та інші контрольно-вимірювальні і регулюючі пристрої. По типу основного робочого органу екструдери діляться на одношнекові або багатошнекові (черв'ячні) і ін.

Слово «екструзія» в перекладі українською мовою означає дослівно купол вулкана або ж спосіб виверження, який властивий лише вулканам, що мають в'язку лаву. У сучасності цей термін використовується для визначення способу створення тривимірного об'єкту, який утворюється шляхом його витискування з двовимірного контура, при цьому об'єкту додаються висота і об'єм. Машина, яка виробляє процес екструзії, називається екструдером і застосовується в промисловості для виробництва труб різного розміру, в харчовій промисловості для виробництва різних видів макаронних виробів, в автомобільній промисловості при виробництві протекторів для шин і прокладок ущільнювачів для автомобілів і безлічі інших виробів. Так, від вулкана до сучасного виробництва людство зробило всього лише один крок.

Види екструзії:

- Холодна екструзія.
- Тепла екструзія.
- Гаряча екструзія.

Екструзія триває менше 30 с. За цей час сировина встигає пройти декілька стадій обробки: теплову, стерилізацію і знезараження, подрібнення і змішування, часткове зневоднення (до 50% від початкового об'єму), стабілізацію, текстурізацію, експандування і профілізацію.

У основі екструдуювання лежать три процеси:

1. під тиском відбувається температурна обробка кормову;
2. механо-хімічна деформація продукту;
3. "вибух" продукту у фронті ударної розрядки.

Після теплової обробки покращуються смакові якості корму, оскільки утворюються різні ароматичні речовини, зростає активність ферментів в переварюванні кормів, а також нейтралізація деяких токсинів і загибель їх продуцентів.

Зерно обробляють в пресі-екструдері при тискові до 40 атм. і температурі до +200°C. Після цього з пресу-екструдера виходить пористий продукт у вигляді джгута діаметром 20–30 мм, з об'ємною масою 100–120 г/дм<sup>2</sup> і вологістю 7–9%.

При обробці екструзії зерна і зерновідходів, половина роботи шлунку тварини виконується екструдером і тому енергія корму цілком йде на будівництво організму тварини. Як очевидно з вищесказаного екструдовані корми незамінні при відгодівлі молодняка тварин: свиней, коней, КРС, кроликів і т.д.

Екструдований корм практично стерильний після 3–4 місячного зберігання в складських умовах. Навіть м'ясокісна мука, при зберіганні (введена в екструдант) не міняє своїх властивостей. При екструдюванні дія високих температур відбувається по тривалості 10–12 секунд, за цей період часу вітаміни не піддаються руйнуванню. Екструдант, крім того, володіє хорошими абсорбуючими властивостями, тому він може служити профілактичним засобом при шлунково-кишкових розладах.

### 1.3 Опис екструдера

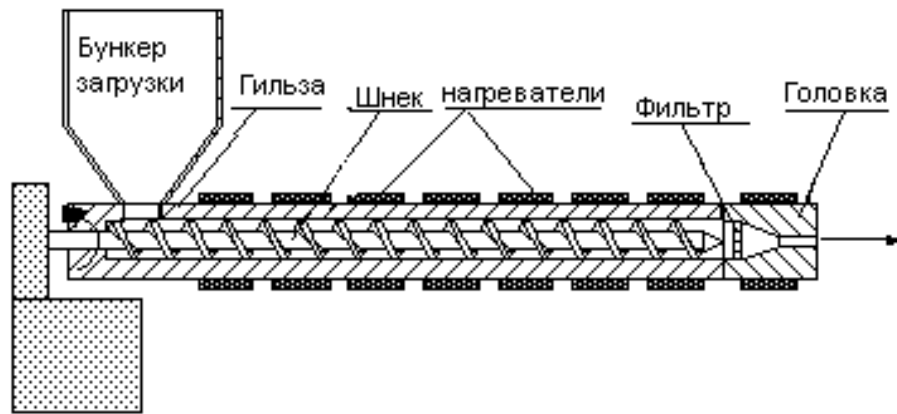


Рисунок 1.1 – Схематичний вигляд екструдера

Екструдер моделі Е-1000 широко застосовуються в комбікормовій і харчовій промисловості. Призначені для обробки екструзії зерна пшениці, ячменю, кукурудзи, гороху, бобів і сої при здобутті високоякісних комбікормів для свиней і жуйних. У екструдері здійснюється витискування джгутів маси, що переробляється, через формуючі фільтри матриці. За рахунок високої температури 110-160°C, тиск 50 атм. і здвигових зусиль відбуваються структурно-механічні і хімічні зміни. Складні структури білків і вуглеводів розпадаються на простіші, клітковина - на вторинний цукор, крохмаль - на простий цукор, шкідлива мікрофлора знезаражується, а в бобах відбувається нейтралізація інгібіторів протеаз, трипсину і уреаз. Також за рахунок різкого падіння тиску при виході розігрітої зернової маси відбувається збільшення в об'ємі продукту, що робить його доступнішим для дії ферментів шлунку тварин.

Екструдер складається з рами, ротора, гвинтової частини, привода, бункера, живильника, відсікача, системи подачі води, системи керування.

Рама являє собою зварну конструкцію. На ній встановлено електродвигун привода, передаючий обертання ротору через клиноремінну передачу. Ротор використовується для передачі обертового моменту гвинтій частині від електродвигуна привода і складається з корпусу, вала з підшипниками. Для регулювання зазору в підшипнику використовують гайку, яка стопориться двома планками.

Пробки використовуються для заливання та злиття масла. Рівень масла в роторі контролюють масловказувачем. Трубка використовується для перепускання масла прокачаного підшипником. Гвинтова частина призначена для транспортування, роздрібнення, переміщування перероблюваного продукту.

Гвинтова частина при зборці для перероблення зерна складається з гвинтів, підпорних шайб, компенсаційних шайб зібраних на валу і стягнутих наконечником з лівою різьбою, вхідного, проміжного, вихідного стаканів стягнутих хомутами.

У стакани вбудовані гільзи. Гільзи мають отвір під клапан, на останньому проміжному стакані встановлений датчик температури. Вихідний стакан має різьблений отвір, в якому встановлено гайку з вихідною втулкою. Стакан і гільза мають поєднані отвори для встановлення приймальної воронки. Передача обертового моменту від вала гвинтами і шайбами виконується через шпонки. На внутрішній поверхні гільз виконані прокольні ребра для забезпечення руху маси вздовж вісі гвинтової частини. Для виключення прокручення стаканів відносно один одного передбаченні штифти. Гвинти використовуються для осьової фіксації гільз. В районі підпорних шайб встановленні кільця. На вхідному стакані розміщений клапан для вприскування води в гвинтову частину.

Температура перероблюваного продукту регулюється зміною зазору між гайкою и наконечником, а також зміною діаметра отвору вихідної втулки. Зборка гвинтової частини для переробки сої відрізняється тим, що замість 3 гвинтів, підпорних шайб, 3 компенсаційних шайб, вихідної втулки встановлюється відповідно 3 двозахідних гвинта, підпорні шайби, 3 компенсаційні шайби і вихідна втулка. Привод складається з електродвигуна, приводного шківа встановленого через конусну втулку на валу двигуна, клиноремінної передачі і веденого шківа, встановленого на валу через конусну втулку. Бункер використовується для проміжного накопичення зерна, необхідного для безаварійного включення і відключення екструдера. Живильник використовується для регулювання подачі вхідного продукту в гвинтову частину екструдера. Складається з гвинтового конвеєра, гвинт якого приводиться у рух від двигуна – редуктора.

Вихідний продукт з бункера захоплюється гвинтом і через патрубок подається в приймальну воронку. Подача вхідного продукту регулюється зміною частоти обертання гвинта. Для виключення потрапляння сторонніх сталевих предметів в гвинтову частину у воронці встановлено магнітовловлювач.

Відсікач складається з дробарки виконаної у вигляді завитка, в середині якої обертається ротор з лопатками. Ротор отримує обертання від електродвигуна встановленого разом із завитком на площадці. Площадка у свою чергу зв'язана з рамкою за допомогою поворотних кронштейнів. У непрацюючому положенні дробарка відведена у бік. В робочому положенні приймальний отвір дробарки одівається на гайку і фіксується спеціальним захватом. Система подачі води використовується для зволоження вхідної речовини з крана, манометра, регуляторного вентилу, ротаметра і клапана. Система керування екструдером розташована в ящику керування.

В екструдері будь-якого типа матеріал спочатку розплавляється, потім перетворюється на пластичну масу і після цього отримана маса нагнітається в голівку, що формує. При цьому матеріал, що знаходиться в бункері екструдера, проходить послідовні етапи зміни своєї форми. Вихідна сировина, яка подається в екструдер, може бути порошкоподібною, гранульованою або стрічковою.

Найефективніше проходить процес екструзії при переробці полімерів у вигляді гранул, оскільки саме такий форма вхідного матеріалу менше всього схильна до пульсації потоку маси на виході з екструдера.

Щоб виключити процес утворення «зведень» в бункері і подальшій пульсації, в бункер поміщаються перетрушувачі, які забезпечують рівномірне перемішування матеріалу. Процес перемішування залежить і від сипучості вхідного матеріалу, тому всі матеріали заздалегідь піддають ретельному просушуванню.

У подальших процесах, що відбуваються в екструдері, повітря, що попало при перемішуванні матеріалу, витісняється при ущільненні матеріалу і потрапляє назад в бункер. Коли повітря віддаляється неповністю і потрапляє в готові вироби,

то це вважається виробничим браком. Для того, щоб значно збільшити продуктивність машини, матеріал у вигляді гранул заздалегідь підігрівається.

Бункер екструдера, як правило, забезпечений автоматичним рівнеміром, якими регулюється рівень завантаження бункера вихідним матеріалом. Завантажується бункер за допомогою пневмотранспорту. Під час безупинної роботи екструдера часто трапляється перегрів циліндра, розташованого безпосередньо під воронкою бункера, при цьому перегрівається і сам бункер. У такому разі матеріал, що знаходиться в бункері, починає злипатися, що може зупинити подальші процеси переробки. Щоб запобігти подібний перегрів, в нім зроблені спеціальні порожнини, в яких постійно циркулює вода, що охолоджує.

Нагрів зерна в певних ділянках екструдера відбувається за допомогою дисипативного тепла, що виділяється, від нагрівачів, які розташовані по периметру всього циліндра. Зрідка трапляється, що кількість такого тепла цілком достатньо для того, щоб полімер розплавився, у такому разі нагрівачі можуть бути відключені. Проте на практиці такі ситуації трапляються надзвичайно рідко.

У зоні походження пластикації вихідного матеріалу відбувається повне розплавлення матеріалу під впливом тепла, яке виділяється при внутрішньому, в'язкому терті і починається інтенсивна деформація, що приводить до ефекту змішувача. Розплавлений матеріал поступово стає однорідним, складові його компоненти перемішуються.

Промисловий випуск екструдерів в Україні майже повністю згорнутий. На ринку найчастіше використовується устаткування, вироблене за кордоном.

## **1.4 Опис технологічного процесу**

При русі по тракту робочої зони гвинтової частини, утвореному гвинтовими каналами і ребрами стаканів, суміш подрібнюється, перемішується і піддається механічній і баротермічній дії (50 атм., 170°C). Розігрівши суміші виробляється за рахунок роботи сил внутрішнього тертя і тертя суміші об гвинти і корпусні деталі. При цьому в ній відбуваються складні структурно-механічні і хімічні зміни: в

процесі екструдувannya крохмалю розпадається на простий цукор, шкідлива мікрофлора знезаражується, а в бобах дезактивувалися антиживильні речовини.

З сої, переробленої на екструдері, на гвинтових пресах легко виділяється масло з максимальним виходом.

Підстроювання температури процесу і коефіцієнта вибуху зерна виробляється зміною осевого положення вихідної втулки, переміщеної по різьбленню. На вимогу замовника екструдер комплектується відсікачем, який виробляє різання джгута, що виходить, на шматочки мірної довжини.



Рисунок 1.2 – Робочий орган з відсікачем

Особливості екструдера:

- вітчизняні комплектуючі;
- надійність конструкції і підвищений термін служби швидко зношуваних деталей;
- простота монтажу і обслуговування (середній час на проведення поточного ремонту 2 години);
- універсальність і адаптованість до вітчизняних масловіджимних пресів;
- непримхливість до умов експлуатації.

Застосовуючи екструдер, отримують наступні вигоди:

- щоденний приріст худоби збільшується на 60-70 відсотків;
- щоденне стійке підвищення надоїв молока в 1,5-1,85 разу;
- відбувається повне знезараження корму; захворюваність худоби, викликана мікробами, при вигодовуванні екструдатом зводиться до мінімуму;

- при випаюванні молодняка екструдат з сої служить важливим компонентом замінників молока;
- екструдат з сої може бути використаний на шнекових пресах для здобуття соєвого масла;
- можливість виробництва сухих комбікормів безпосередньо в господарстві.

## **2 Огляд існуючих рішень та обґрунтування прийнятого принципу побудови виробу**

### **2.1 Опис систем регульованого електроприводу асинхронних двигунів з короткозамкнутим ротором**

Метою даної кваліфікаційної роботи є забезпечення регулювання швидкості шнеку для підтримання заданої якості екструдованого корму. Для цього було обрано систему тиристорний перетворювач – двигун (ТП-Д), опис і дослідження якої приведені нижче.

Основними перевагами ТП є:

- високий коефіцієнт підсилення;
- висока швидкодія;
- плавність регулювання;
- виключає інерційність;
- високий ККД перевищує 95% як при номінальних так і при малих навантаженнях;
- невеликі габарити, маса, блочне компонування дозволяє скоротити необхідні виробничі площі, зменшити капітальні затрати і витрати на установку і експлуатацію.

Недоліками можуть бути:

- значні пульсації на виході перетворювача зумовлює проблеми нагріву і комутації;
- для покращення форми кривої випрямленого струму, необхідна установка згладжуючих реакторів;
- при глибокому регулюванні швидкості низький коефіцієнт потужності;
- висока чутливість до перевантаження та викривлення в мережах живлення.

З точки зору економіки система ТП-Д найбільш прийнятна.

#### **2.1.1 Будова асинхронних електродвигунів**

Асинхронний двигун (АД) складається з двох основних частин:

- нерухомого статора;
- рухомого ротора, які розділені повітряним зазором.

За конструкцією ротора двигуни поділяються на два основні типи:

- з короткозамкненим ротором;
- фазним ротором.

Обидва типи мають однакову конструкцію статора.

Конструкцію асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором наведено на рис. 2.1. Фазні обмотки статора з'єднуються зіркою або трикутником (рис. 2.1).

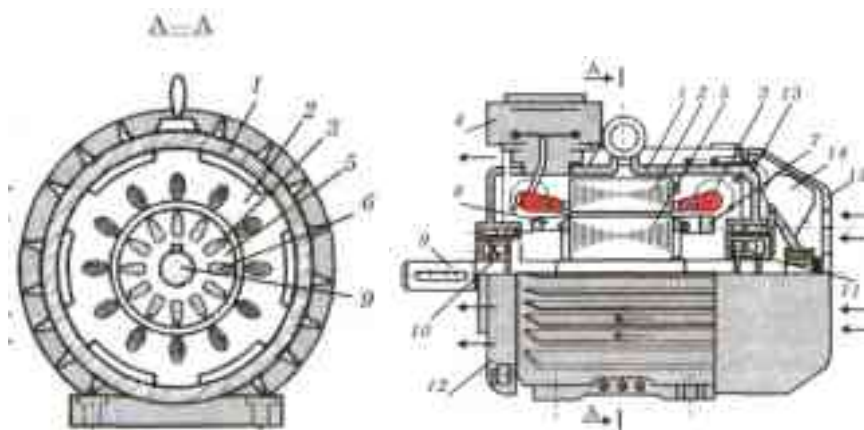


Рисунок 2.1 – Конструкція асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором

На рис. 2.2. приведено схеми з'єднання фаз обмотки статора і відповідні цим з'єднанням перемикання на щитку машини.

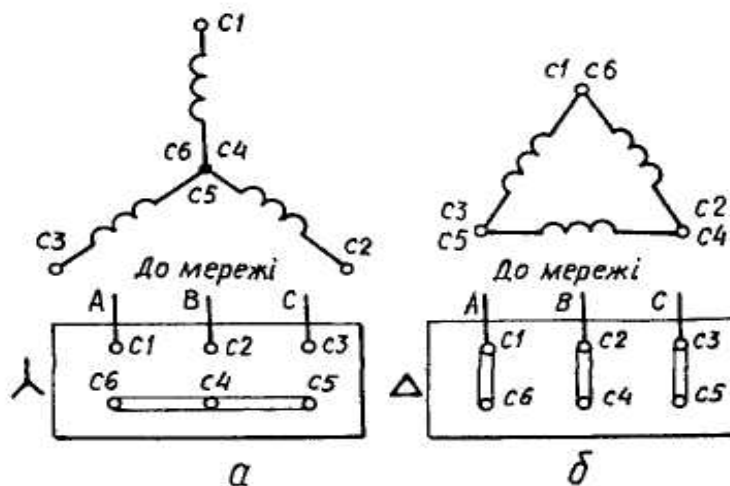


Рисунок 2.2 – Схеми з'єднання фаз обмотки статора:

а – зіркою; б – трикутником

Ротор асинхронного двигуна складається з таких частин:

- стальний циліндр, складений із штампованих, ізольованих один від одного, листів електротехнічної сталі;
- вал ротора, на якому закріплено стальний циліндр ротора, підшипників, вентилятора.

Залежно від типу обмотки ротори поділяються на короткозамкнені та фазні. У пази короткозамкнених роторів укладено стержні із струмопровідного матеріалу, які з торців замикаються кільцями, утворюючи так зване біляче колесо. У пази фазного ротора укладено провідники секцій трифазної обмотки, які з'єднують зіркою.

Трифазний струм, що проходить через обмотку статора АД, створює обертове магнітне поле, яке перетинає провідники обмотки ротора, індукує в них є.р.с. У провідниках замкненої обмотки протікають струми  $I_2$ . При взаємодії цих струмів та обертового магнітного поля виникають електромагнітні сили, які за правилом лівої руки спрямовані в бік обертання поля статора. Ротор починає рухатися в бік руху магнітного поля. Швидкість обертання ротора менша за швидкість обертання магнітного поля. Це можна пояснити так: якщо б ротор обертався із швидкістю поля, то через відсутність відносного руху провідників обмотки ротора та обертового магнітного поля останнє не перетинало б провідників обмотки ротора, у них не індукувалися і не було б струмів, а це означає, що електромагнітний момент дорівнював би нулю. Отже, обертове магнітне поле і ротор асинхронного двигуна принципово обертаються з різними швидкостями – асинхронно, що і визначило назву машини.

### **2.1.2 Системи частотного керування**

Системи електропривода змінного струму значно різноманітніші, ніж системи постійного струму. Це пояснюється складністю і нелінійністю об'єкта керування, необхідністю одночасно регулювати декілька параметрів, векторним характером ланцюгів змінного струму. Із великого числа систем частотного керування АД з КЗ ротором набули широке застосування:

- 1) системами частотного керування;
- 2) системи частотно-струмового керування;
- 3) системи векторного керування;

При частотному керуванні одночасно зі зміною частоти необхідно також змінювати напругу, яка підведена до статора. Якщо знехтувати спадом напруги в ланцюзі статора, то можна вважати, що напруга на обмотці статора дорівнює ЕРС

$$U \approx E = 4.44 N_1 \cdot N_1 \cdot \Phi_m \cdot f_1 = \text{const} \cdot \Phi_m \cdot f_1$$

де  $N_1$  - число витків в обмотці статора.

Існує декілька принципів одночасного регулювання частоти і напруги. Частіше всього бажають зберегти постійною перевантажувальну здатність двигуна, тобто зробити так, щоб при всіх режимах відношення максимального моменту до моменту сил опору залишалось постійним

$$\lambda = \frac{M_k}{M_c} = \text{const}$$

Тому, напругу необхідно регулювати не лише, у функції частоти, але і в функції навантаження.

Критичний момент трифазного асинхронного двигуна

$$M_k = \frac{3U_1^2}{2\omega_0 \left( R_1 + \sqrt{R_1^2 + X_k^2} \right)}, \quad (2.1)$$

$$\text{де } \omega_0 = \frac{2\pi f_1}{Z_n}$$

Якщо знехтувати активним опором статора, то

$$M_k = \frac{3U_1^2}{2\omega_0 X_k}. \quad (2.2)$$

Індуктивний опір пропорційний частоті, тобто  $X_k \propto f_1$ , значить критичний момент прямо пропорційний квадрату напруги і обернено пропорційний квадрату частоти, тому

$$\lambda = \frac{M_k}{M_c} = \text{const} \cdot \frac{U_1^2}{(f_1^2 M_c)}. \quad (2.3)$$

Порівнюючи між собою два режими роботи АД, один із яких приймемо за номінальний, на основі (2.4)

$$\frac{U_1}{U_{1\text{ном}}} = \frac{f_1}{f_{1\text{ном}}} \sqrt{\frac{M_c}{M_{c.\text{ном}}}} \quad (2.4)$$

Таким чином, для збереження постійною перевантажувальну здатність, необхідно змінювати напругу пропорційно частоті і кореню квадратичному від моменту навантаження. Цей загальний принцип регулювання може бути уточнений для конкретних режимів роботи ЕП.

При регулюванні з постійним максимально допустимим моментом можна для всіх режимів прийняти  $M_c = M_{c.\text{ном}}$ , тоді із (2.4) слідує

$$\frac{U_1}{U_{1.\text{ном}}} = \frac{f_1}{f_{1.\text{ном}}} \text{ або } \frac{U_1}{f_1} = \text{const.} \quad (2.5)$$

Механічні характеристики двигуна при такому законі регулювання зображені на рис.2.3 а. Якщо регулювання проводиться з постійною допустимою потужністю  $P = P_{\text{ном}}$ , тоді

$$M_c = \frac{P_{\text{ном}}}{\omega} = M_{c.\text{ном}} \cdot \frac{\omega_{\text{ном}}}{\omega}. \quad (2.6)$$

Можна вважати, що швидкість АД пропорційна частоті, тоді

$$M_c = M_{c.\text{ном}} \cdot \frac{f_{1.\text{ном}}}{f_1}. \quad (2.7)$$

Підставляючи це значення у (2.4), одержимо

$$\frac{U_1}{U_{1.\text{ном}}} = \sqrt{\frac{f_1}{f_{1.\text{ном}}}} \text{ або } \frac{U_1}{\sqrt{f_1}} = \text{const.} \quad (2.8)$$

Механічні характеристики двигуна при зміні напруги пропорційно кореню квадратичному із частоти представлені на рис.2.3(б).

Дослідження частотних ЕП можна проводити в програмі MatLab, реалізація якого описана нижче. Вплив напруги на величину моменту двигуна реалізується за допомогою ланки множення, а перехід від  $\omega$  до ковзання  $s$  реалізуємо за

допомогою ланок ділення одиниці на змінну та множення. Для реалізації моделі асинхронного двигуна використовуємо ланку типу “Fcn”, функцією якої буде уточнена формула Клоса . Ланкою такого ж типу враховуємо вплив зміни напруги живлення  $U^2 / 220^2$ . Напруга, що подається – фазна. За допомогою ланки множення керуюча дія – через ланку впливу напруги вводиться в лінію передачі моменту двигуна. В якості ланки обертових мас використовуємо “Transfer Fcn”. Механічну характеристику виконавчого механізму задаємо нелінійною ланкою типу “Coulamb Vsedus Friction”, яка найкраще описує дію реактивного моменту. Для отримання значень часової вісі використовуємо елемент “Clock”. Елемент “Workspace” використовуємо для запису даних.

Відображення перехідного процесу отримаємо за допомогою елемента “Scope”. Механічні характеристики отримаємо за допомогою елемента “XY Graph”.

Із-за своєї простоти залежності (2.5) і (2.8) широко розповсюджені, на практиці але вони являються наближеними і не забезпечують оптимального регулювання АД.

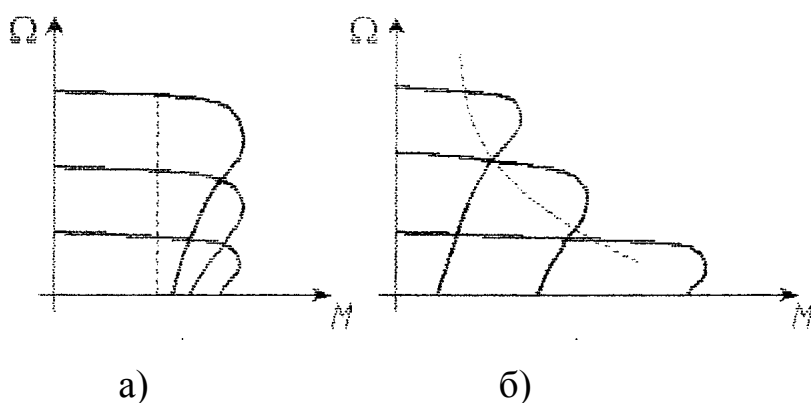


Рисунок 2.3 – Механічні характеристики ЕД при регулюванні швидкості з постійним моментом (а) і постійною потужністю(б).

При малих частотах і малих напругах на АД зростає роль спаду напруги на активному опорі статора. Якщо знижувати напругу статора пропорційно частоті, то це приведе до зменшення магнітного потоку АД. Тому в частотному приводі напруга повинна зменшуватись в меншій мірі, ніж це слідує із (2.5). Для цього

використовують систему IR-компенсації, в якій закон регулювання (2.5) замінюють співвідношенням

$$\frac{|U_1 - I_1 R_1|}{f_1} = \text{const} \quad (2.9)$$

У приводах, в яких проводиться компенсація спаду напруги на опорі статора, підтримується постійне співвідношення між частотою і напругою  $|U_1 - I_1 R_1|$ . Ця напруга відрізняється від напруги мережі на величину спаду напруги на активному опорі статора.

Підвищення напруги відносно закону  $U/f = \text{const}$  показано на рис. 2.4

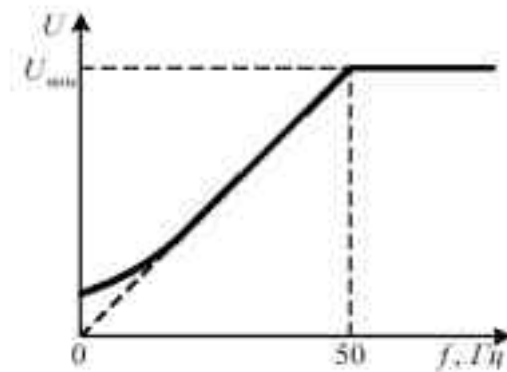


Рисунок 2.4 – Закон регулювання  $U/f = \text{const}$  у перетворювачах частоти

В області малих частот напругу живлення збільшують відносно лінійного закону. В області високих частот напруга живлення доходить до номінального значення і далі свій ріст припиняє. Збільшувати її більше номінальної не можна, тому що під цей рівень напруги розраховується ізоляція двигуна при проектуванні.

Спрощена схема частотного привода з IR- компенсацією представлена на рис.2.5. У приводі використаний АІН з проміжним керуючим випрямлячем (КВ).

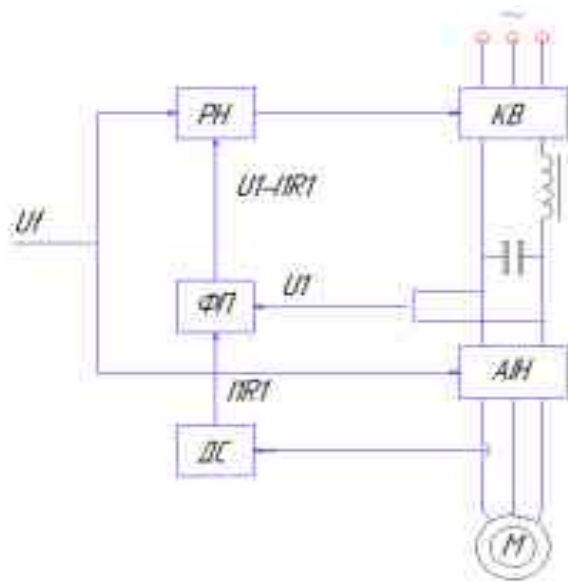


Рисунок 2.5 – Схема частотного регульованого електроприводу з IR-компенсацією

Сигнал  $U_f$ , який визначає задану частоту, поступає на регулятор напруги (РН) і систему керування тиристорами інвертора.

Датчик струму (ДС) проводить вимірювання струму статора  $I_1$  і виробляє напругу, яка пропорційна спаду напруги на опорі статора  $I_1 \cdot R_1$ . У функціональному перетворювачі (ФП) утворюється модуль різниці напруги на статорі АД і спаду напруги  $I_1 R_1$ , який поступає на регулятор напруги.

Цей регулятор виробляє керуючу дію, яка поступає на тиристорний випрямляч і реалізує залежність (2.9). У результаті вихідна напруга тиристорного керованого випрямляча змінюється таким чином, щоб забезпечити необхідний зв'язок між напругою і частотою.

Очевидно, що у приводі з IR-компенсацією існує зворотній зв'язок за напругою статора. Крім того, у цих приводах застосовують зворотні зв'язки за швидкістю, струмом і т. д. (ці зворотні зв'язки на рис.2.5 не показані).

## 2.2 Частотний спосіб регулювання обертами вала АД

Частотне регулювання обертами асинхронного двигуна має ряд найважливіших переваг у порівнянні з іншими способами: використовуються найбільш прості та надійні електродвигуни (короткозамкнуті), регулювання

здійснюється без втрат ковзання (без втрат в опорах), досягається плавне регулювання, характеристики (основна і проміжні) являються жорсткими, що доволі зручно для більшості приводів.

У теперішній час використовуються два види перетворювача частоти: машинні та статичні (тиристорні).

Тиристорні перетворювачі частоти (ПЧ) бувають з безпосереднім зв'язком і з ланкою постійного струму (ЛПС). Перші використовуються у тих випадках, коли потребується менша регульована частота, ніж частота  $f_{живл}$  джерела живлення. Верхня межа регулювання частоти на виході перетворювача складає  $\sim 0,2...0,25 f_{живл}$ . Для згладжування пульсацій і отримання на виході напруги, близької по формі до синусоїдальної, що особливо важливо при низьких частотах для рівномірного обертання двигунів, використовуються згладжуючі дроселі.

Залежно від типу випрямляча та інвертора ПЧ з ЛПС поділяються на ТПЧ з керованим та некерованим випрямлячем, з автономним інвертором струму або напруги. Якщо випрямляч керований, то функцію регулювання напруги на виході тиристорного перетворювача частоти виконує випрямляч, а функцію регулювання частоти – автономний інвертор. У випадку некерованого випрямляча обидві функції виконує автономний інвертор.

У перетворювачі частоти з проміжною ланкою постійного струму (рис.2.6) мається керований тиристорний випрямляч, фільтр і автономний інвертор, на вихід якого підключений двигун змінного струму. Також він містить систему керування випрямлячем СКВ та систему керування автономним інвертором СКАІ. У цьому перетворювачі струм промислової частоти спочатку випрямляється, а потім перетворюється (інвертується) у змінний потрібної регульованої частоти.

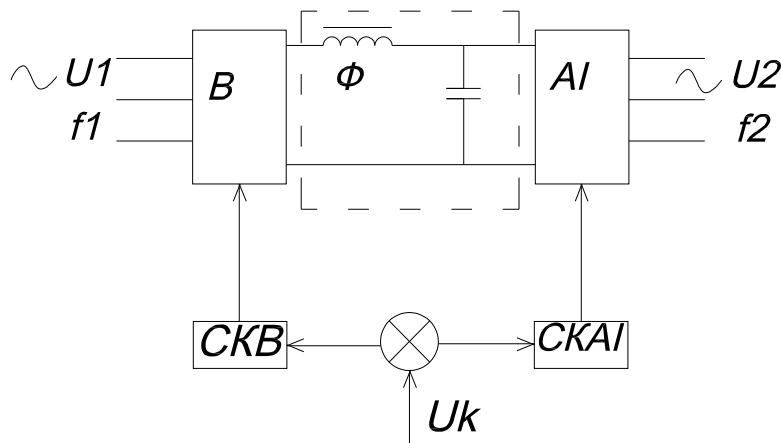


Рисунок 2.6 – Блок-схема ПЧ з ланкою постійного струму

При зниженні частоти індуктивні опори статора та ротора зменшуються пропорційно  $f$ , тому струм буде збільшуватися і машина – перегріватися. Таким чином, необхідно зі зменшенням частоти зменшувати і напругу, тобто слідувати пропорційному закону регулювання ( $U/f = \text{const}$ ).

ПЧ з ЛПС дають змогу регулювати вихідну частоту в широких межах (як вгору, так і вниз від частоти мережі живлення), а також значення вихідної напруги від нуля до максимуму.

Недоліком ПЧ з ЛПС є подвійне перетворення електричної енергії, що знижує ККД перетворювача та збільшує його малогабаритні показники.

### 2.3 Вимоги до систем керування електроприводом екструдера при виготовленні кормів

Ефективність САК у кожному конкретному випадку визначається ступенем задоволення поставлених до неї вимог. Найважливішою вимогою є забезпечення функціональної залежності між сигналами на вході та виході системи. При розробці системи прагнуть знайти розумний компроміс між високою якістю роботи та простотою технічної реалізації САК. Вимоги до САК різні і визначаються багатьма факторами. Звичайно ставлять вимоги: до запасу стійкості; до величини помилки в усталеному режимі (статичної точності); до

поведінки системи в перехідному процесі при певних діяннях; до динамічної точності при діяннях, що неперервно змінюються.

Тепер розглянемо вимоги до системи , яка підлягає розробці в даному дипломному проєкті:

- перехідний процес аперіодичний з перегулюванням (перерегулювання не більше 15%) або монотонний (перерегулювання дорівнює нулю);
- час регулювання не повинен перевищувати 3 с;
- запас по амплітуді не менше 15 дБ;
- запас по фазі не менше 30°.

## **2.4 Вибір принципу побудови системи автоматичного керування**

Оператор в залежності від навантаження екструдера може встановлювати необхідне значення швидкості шнека, а по даним датчика швидкості може контролювати цю швидкість.

Процес можна також регулювати автоматично. При цьому оператор задавачем встановлює необхідне значення швидкості, система автоматичного регулювання, діючи за принципом зворотного зв'язку, підтримує це значення. Керованим об'єктом в САК виступає асинхронний двигун шнека, а інформаційним засобом датчик швидкості. Дані складові частини САК необхідно вибрати та обґрунтувати.

## 3 Опис та обґрунтування обраних проектних рішень та конструкцій

### 3.1 Вибір перетворювача частоти

Для керування швидкістю асинхронного двигуна екструдера вибираємо частотно-регульований електропривод.

Частотно-регульовані електроприводи призначені для плавної зміни частоти обертання електродвигунів змінного струму, що входять до складу загальнопромислових і спеціальних машин і механізмів.

*Модифікації електроприводів:*

1. Частотно-регульовані електроприводи з електромагнітним гальмуванням і розсіюванням енергії на резисторі.

2. Частотно-регульовані електроприводи з електромагнітним гальмуванням і рекуперацією енергії в мережу, що містять вхідний активний випрямляч, що забезпечує:

- практично відсутність емісії вищих гармонік у мережу;
- двонаправлений потік енергії, тобто дозволяє працювати у чотирьох квадрантах;
- економію електроенергії за рахунок виключення необхідності в гальмовому ("зливному") резисторі;
- сталість напруги на ланці постійного струму;
- роботу з  $\cos = 1$  чи навіть випереджальним;

Один вхідний активний випрямляч може працювати з декількома електроприводами.

3. Частотно-регульовані електроприводи для механізмів, що мають "вентиляторне навантаження" (насоси, вентилятори, центрифуги, димососи і т.д.).

Потужність від 3 до 350 кВт.

4. Частотно-регульовані електроприводи загальнопромислового призначення (конвеєри, рольганги, екструдери і т.д.) з моментом навантаження, що не залежить від швидкості обертання електродвигуна.

Потужність від 2,2 до 315 кВт.

5. Кранові електроприводи з великою перевантажувальною здатністю.

Потужність від 1,7 до 160 кВт.

При необхідності частотно-регульовані електроприводи можуть бути укомплектовані фільтрами для захисту від перенапруг на обмотці електродвигуна. Параметри фільтра визначаються довжиною кабелю від електродвигуна до перетворювача і потужністю електродвигуна.

Технічні характеристики частотно-регульованих електроприводів (рис.3.1):

Коефіцієнт потужності основної гармоніки  $\cos \varphi = 1$ .

ККД при номінальному навантаженні не менш 0,98.

Діапазон регулювання вихідної частоти перетворювача, Гц:

- із постійністю моменту 1...50 Гц;
- із постійністю потужності 50 ... 100 Гц

$U_{\text{вих}} = 0 \dots 220 \text{ В}$ .



Рисунок 3.1 – Механічні характеристики частотно-регульованого електропривода

*Умове позначення частотно-регульованих електроприводів*

Найменування та модифікація виробу

Виконання по потужності, кВт

Виконання:

О - із зупинкою електродвигунів самовибігом;

С - із електромагнітним гальмуванням і розсіюванням енергії на резисторі;

Р - із електромагнітним гальмуванням і рекуперацією енергії в мережу.

Виконання:

- 1 – “вентиляторне” навантаження;
- 2 – загальнопромислове виконання;
- 3 – кранове.

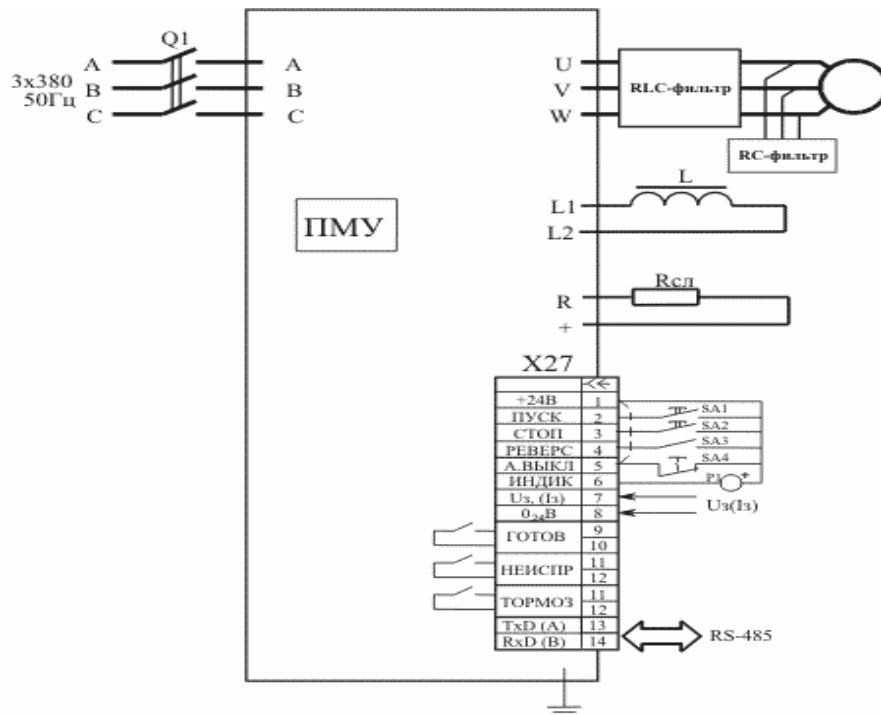


Рисунок 3.2 – Схема підключення частотно-регульованого електропривода

### 3.2 Механічна характеристика асинхронного двигуна

Вибираємо по номінальній потужності та номінальній частоті обертання асинхронний двигун типу: 4A250M4У3 з наступними технічними характеристиками:

$$P_n = 90 \text{ кВт}; \quad J_{\text{дв}} = 1,2 \text{ кг.м}^2; \quad R_1' = 0,024;$$

$$n_0 = 1500 \text{ об/хв.}; \quad \cos \varphi = 0,9; \quad X_1' = 0,093;$$

$$n_n = 1481 \text{ об/хв.}; \quad \eta = 93 \%; \quad R_2'' = 0,014;$$

$$U_n = 220 \text{ В}; \quad X_2'' = 0,12;$$

Будуємо природну механічну характеристику асинхронного двигуна, використовуючи дані з довідників.

Статичний момент буде рівним

$$M_c = M_n = \frac{9,55 \cdot P_n}{n_n} = \frac{9,55 \cdot 90000}{1481} = 573 \text{ Н} \cdot \text{м}; \quad (3.1)$$

Максимальний момент двигуна

$$M_{кр} = \lambda \cdot M_n = 2,3 \cdot 573 = 1317,9 \text{ Н} \cdot \text{м}, \quad (3.2)$$

де  $\lambda = 1,9$  - кратність критичного моменту.

Номінальне ковзання

$$s_{ном} = \frac{\omega_0 - \omega_n}{\omega_0} = \frac{n_0 - n_n}{n_0} = \frac{1500 - 1481}{1500} = 0,013. \quad (3.3)$$

Критичне ковзання

$$s_{кр} = s_{ном} \cdot (\lambda_m + \sqrt{\lambda_m^2 - 1}) = 0,013 \cdot (2,3 + \sqrt{2,3^2 - 1}) = 0,057, \quad (3.4)$$

де  $\lambda_m = 2,3$  - кратність максимального моменту

Для побудови природної характеристики скористаємося спрощеним рівнянням механічної характеристики

$$M = \frac{2 \cdot M_{кр}}{\frac{s}{s_{кр}} + \frac{s_{кр}}{s}} \quad (3.5)$$

Підставивши значення ковзання у рівняння механічної характеристики, отримаємо значення для режиму двигуна

$$M = \frac{2 \cdot 1317,9}{\frac{s}{0,057} + \frac{0,057}{s}}.$$

Результати зводимо у табл. 3.1 і на основі табличних даних на рис.3.3 будуємо природну механічну характеристику.

Таблиця 3.1 – Розрахункові дані  $M(s)$

|   |       |       |        |        |        |       |       |
|---|-------|-------|--------|--------|--------|-------|-------|
| S | 0.01  | 0.02  | 0.05   | 0.07   | 0.09   | 0.2   | 0.3   |
| M | 448.6 | 823.7 | 1292.1 | 1279.5 | 1187.3 | 693.6 | 479.2 |
| S | 0.4   | 0.5   | 0.6    | 0.7    | 0.8    | 0.9   | 1     |
| M | 330.3 | 296.2 | 248.7  | 212.6  | 186.8  | 165.8 | 149.8 |

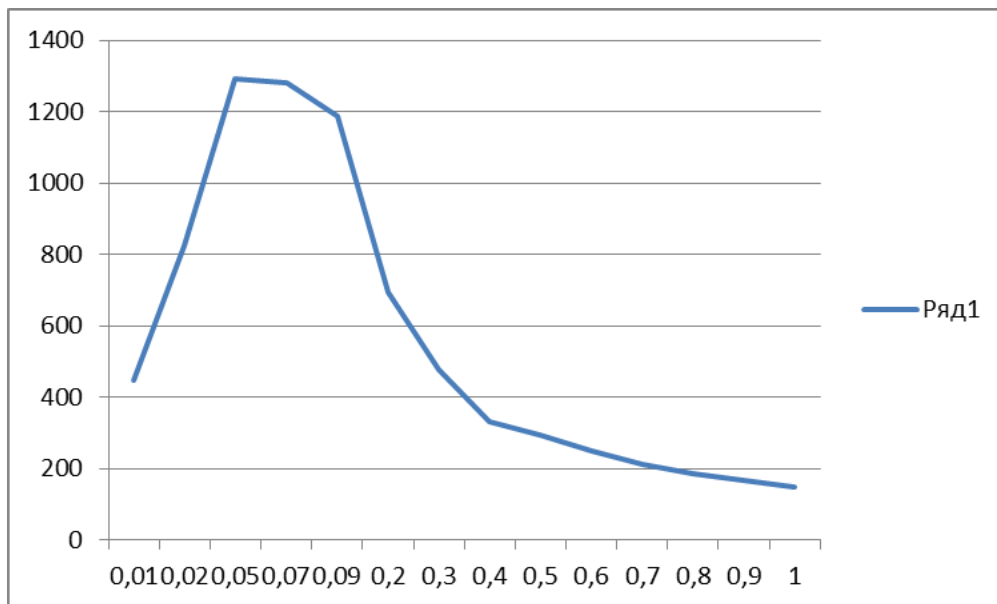


Рисунок 3.3 – Природна механічна характеристика асинхронного двигуна

### 3.3 Розрахунок параметрів лінеаризованої структурної схеми електропривода з асинхронним двигуном. Визначення основних показників динамічних властивостей

При проведенні аналітичних досліджень електропривода з АД можна застосовувати наступну лінеаризовану структурну схему (рис.3.4). Однак слід зазначити, що досліджувані параметри, не повинні виходити за межі робочої частини механічної характеристики, а жорсткість характеристики повинна перераховуватись для кожної з дослідних ділянок.

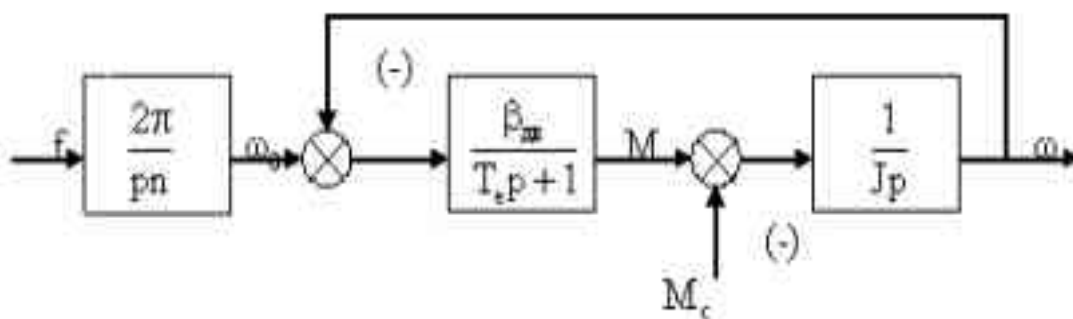


Рисунок 3.4 – Лінеаризована структурна схема АД

Переведемо опори із відносних одиниць у абсолютні, для цього знайдемо коефіцієнт приведення опорів  $K_{пр}$

$$K_{\text{пр}} = \frac{U_{\text{н}}}{I_{\text{н}}}; \quad (3.6)$$

$$K_{\text{пр}} = \frac{220}{162,9} = 1,35;$$

$$I_{\text{н}} = \frac{P_2}{3U_{\text{н}} \cdot \cos \varphi \cdot \eta}; \quad (3.7)$$

$$I_{\text{н}} = \frac{90000}{3 \cdot 220 \cdot 0,91 \cdot 0,93} = 162,9 \text{ А},$$

де  $I_{\text{н}}$  – номінальний струм статора.

Знайдемо абсолютні значення опорів

$$R_1 = R'_1 \cdot K_{\text{пр}}; \quad (3.8)$$

$$R_1 = 0,024 \cdot 1,35 = 0,0324 \text{ Ом},$$

де  $R'_1$  - активний опір фази статора;  $R_1$  - приведений активний опір фази статора.

$$R'_2 = R''_2 \cdot K_{\text{пр}}; \quad (3.9)$$

$$R'_2 = 0,014 \cdot 1,35 = 0,0189 \text{ Ом},$$

де  $R''_2$  - активний опір фази ротора;  $R'_2$  - приведений активний опір фази ротора.

$$X_1 = X'_1 \cdot K_{\text{пр}}; \quad (3.10)$$

$$X_1 = 0,093 \cdot 1,35 = 0,126 \text{ Ом},$$

де  $X'_1$  - реактивний опір фази статора;  $X_1$  - приведений реактивний опір фази статора.

$$X'_2 = X''_2 \cdot K_{\text{пр}}; \quad (3.11)$$

$$X'_2 = 0,12 \cdot 1,35 = 0,162 \text{ Ом},$$

де  $X''_2$  - реактивний опір фази ротора;  $X'_2$  - приведений реактивний опір фази ротора.

Електромагнітна постійна часу  $T_e$

$$T_e = \frac{X_{\text{к}}}{\omega_0 \cdot R_2'}; \quad (3.12)$$

$$T_e = \frac{0,288}{157 \cdot 0,0189} = 0,096 \text{ с}.$$

Знайдемо реактивний опір короткого зімкнення

$$X_k = X_1 + X_2'; \quad (3.13)$$

$$X_k = 0,126 + 0,162 = 0,288 \text{ Ом},$$

де  $X_k$  - реактивний опір короткого замикання.

Знайдемо кутові швидкості

$$\omega_0 = \frac{\pi \cdot n_0}{30}; \quad (3.14)$$

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

$$\omega_n = \frac{\pi \cdot n_n}{30}; \quad (3.15)$$

$$\omega_n = \frac{3,14 \cdot 1481}{30} = 155 \text{ рад/с};$$

де  $\omega_0$  - синхронна кутова швидкість обертання поля статора;  $\omega_n$  - номінальна кутова швидкість обертання валу двигуна;  $n_0$  - синхронна частота обертання поля статора;  $n_n$  - номінальна частота обертання валу двигуна.

Усереднене значення модуля статичної жорсткості механічної характеристики при навантаженнях, що не перебільшують номінальне значення

$$|\beta_{\text{дв}}| \approx \frac{M_n}{\omega_0 - \omega_n}; \quad (3.16)$$

$$|\beta_{\text{дв}}| = \frac{573,3}{157 - 155} = 286,6;$$

$$M_n = \frac{P_n}{\omega_n}; \quad (3.17)$$

$$M_n = \frac{90000}{155} = 573,3 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

де  $M_n$  - номінальний момент двигуна.

Електромеханічна постійна часу електропривода

$$T_m = \frac{J_{\text{заг}}}{|\beta_{\text{дв}}| + \beta_{\text{мех}}}; \quad (3.18)$$

$$T_m = \frac{1,2}{286,6 + 3,65} = 4,13 \cdot 10^{-3} \text{ с};$$

Жорсткість механічної характеристики механізму

$$\beta_{\text{мех}} = \frac{M_H}{\omega_H}; \quad (3.19)$$

$$\beta_{\text{мех}} = \frac{573,3}{155} = 3,65.$$

Співвідношення постійних часу

$$m = \frac{T_m}{T_e}; \quad (3.20)$$

$$m = \frac{0,00413}{0,096} = 0,043.$$

Декремент затухання

$$\xi = \frac{\sqrt{m}}{2}; \quad (3.21)$$

$$\xi = \frac{\sqrt{0,043}}{2} = 0,103.$$

Логарифмічний декремент затухання

$$\lambda = \frac{2\pi \cdot m}{\sqrt{4m - m^2}}; \quad (3.22)$$

$$\lambda = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 0,043}{\sqrt{4 \cdot 0,043 - 0,043^2}} = 1,59.$$

При коефіцієнтах затухання  $< 1$  з прямуюванням до нуля маємо проявлення коливальних властивостей та низьку демпфуючу здатність електропривода. При коефіцієнтах затухання  $> 1$  коливальні властивості в електроприводі відсутні, можна робити висновок про наявність доброї демпфуючої здатності електропривода.

Частота електромеханічного резонансу

$$\Omega_{\text{ем}} = \frac{1}{2\pi \sqrt{T_e \cdot T_m}}; \quad (3.23)$$

$$\Omega_{\text{ем}} = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{0,00413 \cdot 0,096}} = 8 \text{ Гц}.$$

При використанні електромеханічної системи слід звернути увагу на здатність електроприводу значно підсилювати коливання сигналів при коефіцієнті згасання, що лежить в межах від 0 до 1. При цьому сигнали з резонансними частотами можуть надходити як з каналу збурення так і керування. Також підсилення може виникати не тільки на частоті електромеханічного резонансу, а й на частотах, що мають таку складову при розкладенні періодичного сигналу в ряд Фур'є.

### **3.4 Розрахунок силовій частини випрямляча**

Випрямлячем називається пристрій призначений для перетворення енергії джерела змінного струму в постійний струм. Необхідність в подібному перетворенні з'являється, коли живлення користувача здійснюється постійним струмом, а джерелом електричної енергії є джерело змінного струму, наприклад промислова мережа частотою 50 Гц.

Принцип випрямлення базується на отриманні за допомогою тиристорної схеми із двополярних напруг однополярних напівхвиль напруги, які після фільтра становляться згладженими. При великих потужностях навантаження задачу перетворення електричної енергії змінного струму в постійний струм вирішують за допомогою 3-фазних керованих випрямлячів, виконаних за мостовою схемою.

Схема імпульсно-фазового керування забезпечує, подачу відкриваючих імпульсів на тиристори перетворювача і разом з перетворювачем вирішує комплекс задач, пов'язаних з формуванням і регулюванням його вихідної напруги.

Загальними вимогами, що пред'являються до системи керування перетворювачем є:

- 1) надійність відкривання тиристорів силовій схеми в усіх режимах її роботи;
- 2) плавне (в необхідному діапазоні) регулювання кута  $\alpha$  подачі керуючих імпульсів на тиристори;
- 3) висока завадостійкість і надійність.

Для розрахунку силової частини випрямляча перетворювача частоти з автономним інвертором напруги нам потрібні наступні параметри:  $U_{1л}=0,38\text{кВ}$  – лінійна напруга мережі; схема з'єднання обмоток трансформатора – зірка/зірка;  $U_{дн}$  (В) – номінальна випрямлена напруга;  $I_{дн}$  (А) – номінально випрямлений струм навантаження. Схема випрямляча – трифазна мостова.

Значення  $U_{дн}$  можна знайти через діюче значення вихідної напруги інвертора

$$U_{2д} = \frac{\sqrt{\frac{\gamma_1}{\pi} + 1}}{\sqrt{6}} \cdot U_{дн}; \quad (3.24)$$

звідси

$$U_{дн} = \frac{\sqrt{6} \cdot U_{2д}}{\sqrt{\frac{\gamma_1}{\pi} + 1}},$$

де  $\gamma_1$  - кут одночасної роботи тиристорів основної і оберненої груп в АІН.

Він знаходиться з формули

$$\gamma_1 = \text{tg}\varphi \ln \frac{4a - 5}{a - 2}, \quad (3.25)$$

де  $\varphi$  - кут здвигу перших гармонік напруги та струму двигуна;

$$a = \exp\left(-\frac{\pi}{3\text{tg}\varphi}\right); \quad (3.26)$$

Номінально випрямлений струм

$$I_{дн} = \frac{\frac{3}{\sqrt{2}} U_{дн}}{\pi^2 \cos\varphi Z} \left( \frac{\pi}{6} + \frac{1}{6} \gamma_1 - \frac{a - 1}{a - 2} \text{tg}\varphi \right), \quad (3.27)$$

де  $Z$  – сумарний опір статора двигуна.

$$Z = \sqrt{R_1^2 + X_1^2}. \quad (3.28)$$

Значення  $\varphi$  знайдемо через параметр двигуна  $\cos\varphi=0,9$

$$\varphi = \arccos 0,9 = 25,84^\circ, \quad \text{tg}\varphi = \text{tg} 25,84 = 0,4842;$$

$$a = \exp\left(-\frac{\pi}{3 \cdot 0,4842}\right) = 0,12;$$

$$\gamma_1 = 0,4842 \cdot \ln \frac{4 \cdot 0,12 - 5}{0,12 - 2} = 0,4247 ;$$

$$Z = \sqrt{0,024^2 + 0,122^2} = 0,130 \text{ Ом} ;$$

$$U_{dn} = \frac{\sqrt{6} \cdot 220}{\sqrt{\frac{0,4247}{\pi} + 1}} = 503,6 \text{ В} ;$$

$$I_{dn} = \frac{\frac{3}{\sqrt{2}} \cdot 503,6}{\pi^2 \cdot 0,9 \cdot 0,13} \left( \frac{\pi}{6} + \frac{1}{6} \cdot 0,4247 - \frac{0,12 - 1}{0,12 - 2} \cdot 0,4842 \right) = 340,2 \text{ А} .$$

Проведемо розрахунок потужності на навантаженні

$$P_{dn} = U_{dn} \cdot I_{dn} ; \quad (3.29)$$

$$P_{dn} = 503,6 \cdot 340,2 = 171,3 \text{ кВА} .$$

Знайдемо габаритну потужність трансформатора (без урахування процесу комутації)

$$St = 1,045 \cdot P_{dn} = 1,045 \cdot 171,3 = 179 \text{ кВА} . \quad (3.30)$$

З умови  $Str > St$  попередньо було вибрано потужність трансформатора 250 кВА, після першого етапу розрахунку з урахуванням процесу комутації і 10%-го підвищення напруги, ця потужність задовольняє розраховану, отже залишаємо вибраний трансформатор ТМ-250/10-У(ХЛ)1, який має характеристики (табл.3.2)

Таблиця 3.2 – Потужність трансформатора ТМ-250/10

| St, кВА | P <sub>0</sub> , кВА | P <sub>0</sub> , кВА | P <sub>к</sub> , кВА | P <sub>к</sub> , кВА | U <sub>к</sub> , % | U <sub>к</sub> , % | m, кг |
|---------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|--------------------|--------------------|-------|
| 250     |                      | 1                    |                      | 4                    |                    | 4,5                | 1150  |

Визначимо  $U_{d0}$  з рівняння характеристики регулювання випрямляча (при куті регулювання  $\alpha = 0$ )

$$U_{dn} = U_{d0} \cdot \left( \cos \alpha - B \cdot \frac{U_k \%}{100} \right), \quad (3.31)$$

де  $U_{d0}$  – напруга холостого ходу випрямляча.

Для трифазної мостової схеми  $B = 0,5$

$$U_{d0} = \frac{U_{dn}}{\left( \cos \alpha - B \frac{U_k \%}{100} \right)} = \frac{503,6}{1 - 0,5 \cdot 0,055} = 517,9 \text{ В} .$$

Визначимо номінальну фазову напругу вторинної обмотки трансформатора  $U_{2n}$  з виразу зовнішньої характеристики керованого випрямляча з урахуванням комутації

$$U_{do} = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} U_{2n} = 2,34 U_{2n}; \quad (3.32)$$

$$U_{2n} = \frac{U_{do}}{2,34} = \frac{517,9}{2,34} = 221,3B.$$

Необхідна лінійна напруга  $U_{2лп}$  становить

$$U_{2лп} = U_{2n} \cdot \sqrt{3} = 221,3 \cdot \sqrt{3} = 383,3B. \quad (3.33)$$

Вибираємо лінійну напругу вторинної обмотки потужного трансформатора з номінального ряду 230В, 380В, 660В, 825В.  $U_{2л} = 660B$ .

$$\text{Звідки фазна напруга становить } U_2 = \frac{U_{2л}}{\sqrt{3}} = \frac{660}{\sqrt{3}} = 381,5B.$$

Знаходимо  $U_{do}$  для вибраного значення фазної напруги вторинної обмотки трансформатора  $U_2$

$$U_{do} = 2,34 \cdot U_2 = 2,34 \cdot 381,5B = 892,7B. \quad (3.34)$$

За відомими значеннями  $U_{1л}$  і  $U_2$  ( $U_2$  — напруга не на вторинній обмотці трансформатора, а та, яка використовується для розрахунку випрямляча, що живиться від вторинної обмотки трансформатора, з'єднаної зіркою), з урахуванням 10%-го коливання напруги, визначимо коефіцієнт трансформації силового трансформатора

$$n_{mp} = \frac{W_1}{W_2} = \frac{0,9 U_{1л}}{\sqrt{3} U_2} = \frac{0,9 \cdot 660}{\sqrt{3} \cdot 381,5} = 0,9. \quad (3.35)$$

Фазний діючий струм вторинної обмотки трансформатора за умови, що випрямлений струм ідеально згладжений ( $L_n \rightarrow \infty$ ), дорівнює

$$I_2 = 0,817 I_{dn} = 0,817 \cdot 340,2A = 277,9A. \quad (3.36)$$

Діючий струм первинної обмотки трансформатора, пов'язаний зі струмом вторинної обмотки коефіцієнтом трансформації, визначається за формулою

$$I_1 = \frac{0,817 I_{dn}}{n_{mp}} = \frac{I_2}{n_{mp}} = \frac{277,9 A}{0,9} = 308,7 A. \quad (3.37)$$

Будуємо регулюючу характеристику (рис.3.5) і для напруг  $U_{dn}$  і  $U_{dn}/2$  знаходимо наближені значення кутів регулювання  $\alpha_n$  і  $\alpha_{n1}$

$$\alpha_n \approx 5^\circ, \alpha_{n1} \approx 60^\circ.$$

$$\begin{aligned} \alpha_n &= \arccos(U_{dn}/U_{do} + B \cdot Uk\%/100) = \arccos(503,6/517,9 + 0,5 \cdot 5,5/100) = \\ &= \arccos(0,97 + 0,0275) = \arccos(0,9975) = 4,05^\circ; \end{aligned} \quad (3.38)$$

$$\begin{aligned} \alpha_{n1} &= \arccos(U_{dn}/U_{do} \cdot 2 + B \cdot Uk\%/100) = \arccos(0,485 + 0,0275) = \\ &= \arccos(0,5125) = 59,2^\circ. \end{aligned} \quad (3.39)$$

Для знайдених кутів регулювання, а також для кута рівного “0” будуємо зовнішні характеристики випрямляча.

Потужність вторинної обмотки трансформатора  $S_2$ , з урахуванням 10%-ної зміни напруги, знаходимо через добуток значення кількості фаз  $m$ , фазної напруги вторинної обмотки трансформатора і струму вторинної обмотки. Звідси

$$S_2 = m \cdot 1,1 \cdot U_2 \cdot I_2; \quad (3.40)$$

$$S_2 = 3 \cdot 1,1 \cdot 381,5 \cdot 277,9 = 349,9 \text{ кВА}.$$



Рисунок 3.5 Регулююча характеристика.

Типова потужність трансформатора для трифазної мостової схеми дорівнює

$$S_t \approx S_2 = 349,9 \text{ кВА}. \quad (3.41)$$

Коефіцієнт використання трансформатора

$$K_t = P_{dn} / S_t, \text{ де}$$

$$P_{dn} = U_{dn} \cdot I_{dn}; \quad (3.42)$$

$$K_t = 171,3 \text{ кВА} / 349,9 \text{ кВА} = 0,5.$$

Знайдемо сумарний індуктивний опір розсіяння, приведений до вторинної обмотки трансформатора

$$X_a = U_k\% \cdot U_2 / I_2 \cdot 100 = 5,5 \cdot 381,5 / 277,9 \cdot 100 = 0,075. \quad (3.43)$$

Тепер визначимо кути комутації струму випрямляча з формули

$$\cos \alpha - \cos(\alpha + \gamma) = 2 \cdot I_{dn} \cdot X_a / \sqrt{6} \cdot U_2 = 2 \cdot 349,9 \cdot 0,075 / \sqrt{6} \cdot 381,5 = 0,056. \quad (3.44)$$

При куті регулювання  $\alpha = \alpha_n$

$$\begin{aligned} \gamma &= \arccos(\cos(\alpha_n) - 0,056) - \alpha_n = \arccos(\cos(4,05^\circ) - 0,056) - 4,05^\circ = \\ &= \arccos(0,94) - 4,05^\circ = 19,69^\circ - 4,05^\circ = 15,64^\circ \end{aligned} \quad (3.45)$$

При куті регулювання  $\alpha = \alpha_{n1}$

$$\gamma_1 = \arccos(\cos(59,2^\circ) - 0,056) - 59,2^\circ = 62,8^\circ - 59,2^\circ = 3,6^\circ. \quad (3.46)$$

Знаходимо кут зсуву першої гармоніки для 2-х випадків:

а) при  $\alpha = \alpha_n$

$$\varphi = \alpha_n + \gamma / 2 = 4,05^\circ + 15,64^\circ / 2 = 11,87^\circ; \quad (3.47)$$

б) при  $\alpha = \alpha_{n1}$

$$\varphi_1 = \alpha_{n1} + \gamma_1 / 2 = 59,2^\circ + 3,6^\circ / 2 = 61^\circ. \quad (3.48)$$

Коефіцієнт спотворення форми кривої змінного струму, що споживається з мережі (коефіцієнт несинусоїдальності) при  $L \rightarrow \infty$  для трифазної мостової схеми дорівнює

$$K_c = 3 / \pi = 0.955.$$

Розрахуємо коефіцієнт потужності випрямляча

$$\lambda = K_c \cdot \cos \varphi. \quad (3.49)$$

а) при  $\alpha = \alpha_n$

$$\lambda = 0.955 \cdot \cos 11,87^\circ = 0,93;$$

б) при  $\alpha = \alpha_{n1}$

$$\lambda = 0,955 \cdot \cos 61^\circ = 0,46.$$

Розрахуємо  $I_{асер}$  і  $U_{звмах}$  для вибору тиристорів.

Обернену максимальну напругу вибираємо з урахування коливань мережі  $\pm 10\%$ , а також з урахуванням комутаційних перенапружень. Тому в формулу розрахунку  $U_{звмах}$  вводимо коеф. 1,4

$$I_{асер} \geq I_a = I_{дн} / 3 = 349,9A / 3 = 116,6A; \quad (3.50)$$

$$U_{звмах} \geq (1,4\pi U_{до}) / 3 = 1,4 \cdot 3,14 \cdot 517,9 / 3 = 758,9B. \quad (3.51)$$

Виберемо тиристор типу Т161-125. Максимально допустимий середній струм у відкритому стані –  $I_{асер} = 125 A$ , повторююча імпульсна напруга у закритому стані  $U_{звмах} = 300-1800B$ .

Характеристики тиристора Т161-125:

$I_{асер} = 125A$ ;  $U_{звмах} = 300-1800B$ ;  $t_{вкл} = 80$  мкс;  $U_k = 3,5B$ ;  $I_{вкл} = 200mA$ .

Втрати потужності на вентилях розрахуємо за формулою

$$dPa = m_t \cdot dU_a \cdot I_a, \quad (3.52)$$

де –  $m_t$  кількість тиристорів у випрямлячі (для даної схеми становить 6);  $dU_a$  – падіння напруги на тиристорах;  $I_a$  – прямий струм тиристора.

$$dPa = 6 \cdot 1,75 \cdot 10A = 0,105кВт.$$

Для розрахунку коефіцієнта корисної дії випрямляча, без урахування споживання енергії СІФК, знайдемо його значення для 2-х випадків: при вихідній напрузі  $U_d = U_{дн}$  і  $U_d = U_{дн}/2$ .

Для цього попередньо знаходимо коефіцієнти завантаження для 2-х випадків:

$$a) \beta = U_d / U_{дн} = U_{дн} / U_{дн} = 1$$

$$\eta = (\beta \cdot P_{дн}) / (\beta \cdot P_{дн} + \beta^2 \cdot dPa + P_o + \beta^2 P_k), \quad (3.53)$$

де  $P_{дн}$  – номінальна корисна потужність;  $dPa$  – втрати потужності на вентилях;  $P_o$  – втрати у магнітопроводі трансформатора;  $P_k$  – втрати в обмотках трансформатора.

$$\eta = (1 \cdot 1,959) / (1 \cdot 1,959 + 1^2 \cdot 0,105 + 0,06 + 1^2 \cdot 0,05) = 0,901;$$

$$б) \beta = U_d / U_{дн} = U_{дн} / 2U_{дн} = 0.5$$

$$\eta = (0,5 \cdot 1,959) / (0,5 \cdot 1,959 + 0,5^2 \cdot 0,105 + 0,06 + 0,5^2 \cdot 0,05) = 0.908.$$

## 4 Розрахунки та експериментальні матеріали, що підтверджують працездатність та надійність виробу

### 4.1 Дослідження регуляторів

#### 4.1.1 Дослідження П-регулятора

Виведемо основні передаточні функції системи.

Передаточна функція перетворювача частоти

$$W_{пч} = \frac{K_{пч}}{1 + \tau p}, \quad (4.1)$$

де  $\tau$  - постійна часу перетворювача частоти.

Передаточна функція за керуючою дією (на вході напруга, що подається на якірне коло, на виході – кутова швидкість)

$$W_1 = \frac{K_d}{T_m T_e p^2 + T_m p + 1}, \quad (4.2)$$

де  $T_e$ ,  $T_m$  - електромагнітна та електромеханічна постійні часу відповідно.

Запишемо передаточну функцію за збурюючою дією

$$W_2 = \frac{K_d (1 + T_e p)}{T_m T_e p^2 + T_m p + 1}. \quad (4.3)$$

Передаточна функція тахогенератора

$$W_{тг} = K_{зз} = K_{тг}. \quad (4.4)$$

Передаточна функція регулятора

$$W_{рег} = K_{рег}. \quad (4.5)$$

Загальний вигляд передаточної функції

$$\omega(p) = W_1 U_3(p) - W_2 M_c(p); \quad (4.6)$$

$$\omega(p) = W_{рег} \cdot W_{пч} \cdot W_1 \cdot (U_3(p) - U_{зз}(p) - W_2 \cdot M_c(p)); \quad (4.7)$$

$$U_{зз}(p) = W_{тг} \omega(p). \quad (4.8)$$

Отримаємо загальний вираз передаточної функції

$$\omega(p) = \frac{W_{\text{рег}} \cdot W_{\text{пч}} \cdot W_1}{1 + W_{\text{рег}} \cdot W_{\text{пч}} \cdot W_1 \cdot W_{\text{тг}}} \cdot U_3(p) - \frac{W_2}{1 + W_{\text{рег}} \cdot W_{\text{пч}} \cdot W_1 \cdot W_{\text{тг}}} \cdot M_c(p). \quad (4.9)$$

Підставивши значення передаточних функцій і виконавши перетворення отримаємо вираз характеристичного рівняння

$$A(p) = (1 + \tau p)(T_m T_e p^2 + T_m p + 1) + K, \quad (4.10)$$

де

$$K = K_{\text{рег}} \cdot K_{\text{пч}} \cdot K_d \cdot K_{\text{тг}}, \quad (4.11)$$

де  $K_{\text{рег}}, K_{\text{пч}}, K_d, K_{\text{тг}}$  - коефіцієнт підсилення регулятора, перетворювача частоти, двигуна і тахогенератора відповідно.

Для статичного режиму маємо

$$p=0 \quad \omega = \frac{K_{\text{рег}} \cdot K_{\text{пч}} \cdot K_d}{1 + K} \cdot U_3 - \frac{K_m}{1 + K} \cdot M_c. \quad (4.12)$$

Для зменшення статизму та збільшення діапазону кутової швидкості необхідно збільшити  $K$  за рахунок П-регулятора. Однак виникає питання щодо стійкості системи.

Дослідимо це питання.

Використаємо алгебраїчний критерій Гурвіца, для цього характеристичне рівняння запишемо у наступному вигляді

$$A(p) = (1 + \tau p)(T_m T_e p^2 + T_m p + 1) + K; \quad (4.13)$$

$$A(p) = a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0; \quad (4.14)$$

$$a_3 = T_m \cdot T_e \cdot \tau; \quad (4.15)$$

$$a_2 = T_m \cdot (T_e + \tau); \quad (4.16)$$

$$a_1 = T_m + \tau; \quad (4.17)$$

$$a_0 = 1 + K = K_0. \quad (4.18)$$

Знаходимо визначник Гурвіца

$$\Delta_3 = \det \begin{bmatrix} a_2 & a_0 & 0 \\ a_3 & a_1 & 0 \\ 0 & a_2 & a_0 \end{bmatrix} = a_0 \begin{bmatrix} a_2 & a_0 \\ a_3 & a_1 \end{bmatrix} = a_0 \Delta_2; \quad (4.19)$$

$$\Delta_2 = \det \begin{bmatrix} a_2 & a_0 \\ a_3 & a_1 \end{bmatrix} = a_2 \cdot a_1 - a_3 \cdot a_0 > 0 . \quad (4.20)$$

$\Delta_3$  повинно бути  $>0$ , а так, як  $a_0 > 0$ , то для умови стійкості  $\Delta_2 > 0$ .

$$\Delta_2 = T_m \cdot (T_m + \tau) \cdot (T_e + \tau) - K_0 \cdot T_m \cdot T_e \cdot \tau > 0 . \quad (4.21)$$

Виконаємо перетворення

$$T_m \cdot (T_m + \tau) \cdot (T_e + \tau) > K_0 \cdot T_m \cdot T_e \cdot \tau ;$$

$$\frac{(T_m + \tau) \cdot (T_e + \tau)}{T_e \cdot \tau} > K_0 ;$$

$$\frac{T_m \cdot T_e + T_m \cdot \tau + T_e \cdot \tau + \tau^2}{T_e \cdot \tau} > K_0 ;$$

$$\frac{T_m}{\tau} + \frac{T_m}{T_e} + 1 + \frac{\tau}{T_e} > K_0 ;$$

$$K_0 - 1 < \frac{T_m}{\tau} + \frac{T_m}{T_e} + \frac{\tau}{T_e} ;$$

$$\left[ K < \frac{T_m}{\tau} + \frac{T_m}{T_e} + \frac{\tau}{T_e} \right] - \text{система повинна бути стійкою у такому випадку.}$$

Коли агрегат знаходиться в робочому режимі під навантаженням, то збільшується електромеханічна постійна часу  $T_m$ , отже коефіцієнт запасу  $K$  збільшується. Тобто ми знайшли запас стійкості при найгіршому режимі роботи.

У даному випадку розглядається система без навантаження на валу двигуна, тому  $\beta_{\text{мех}} = 0$ , звідси

$$T_m = \frac{J_{\text{заг}}}{|\beta_{\text{дв}}| + \beta_{\text{мех}}} = \frac{1,2}{286,6} = 4,19 \cdot 10^{-3} \text{ с}; \quad (4.22)$$

$$K < \frac{4,19 \cdot 10^{-3}}{0,1} + \frac{4,19 \cdot 10^{-3}}{0,096} + \frac{0,1}{0,096} = 1,1255 , \quad (4.23)$$

де  $\tau = 0,1 \text{ с}$ . – постійна часу перетворювача частоти.

Отже як ми бачимо з критерія Гурвіца система повинна бути стійкою у тому випадку, коли коефіцієнт регулятора  $K$  буде меншим за 1,1255.

Знайдемо граничний коефіцієнт підсилення П-регулятора  $K_{\text{рег}}$

$$K_{\text{рег}} < \frac{K}{K_{\text{пч}} \cdot K_{\text{д}} \cdot K_{\text{тг}}},$$

Коефіцієнт підсилення перетворювача частоти

$$K_{\text{пч}} = \frac{f}{U} = \frac{50}{10} = 5, \quad (4.24)$$

де  $f$  – частота напруги мережі;  $U$  – сигнал керування перетворювача частоти.

Коефіцієнт підсилення двигуна

$$K_{\text{дв}} = \frac{\omega_0}{f} = \frac{157}{50} = 3,14, \quad (4.25)$$

де  $\omega_0$  - синхронна кутова швидкість обертання поля статора.

На вхід П-регулятора подається напруга не більше 10В, тому на виході тахогенератора ставимо ділник напруги з кратністю 1\40.

Коефіцієнт підсилення тахогенератора

$$K_{\text{тг}} = \frac{U_{\text{н.вих}}}{\omega_{\text{н.тг}} \cdot 40} = \frac{230}{155,1 \cdot 40} = \frac{1,464}{40}, \quad (4.26)$$

де  $U_{\text{н.вих}}$  – вихідна напруга тахогенератора;  $\omega_{\text{н.тг}}$  - номінальна кутова швидкість тахогенератора.

$$K_{\text{рег}} < \frac{1,1255}{5 \cdot 3,14 \cdot \frac{1,464}{40}} = 1,96.$$

Отже граничний коефіцієнт підсилення П-регулятора  $K_{\text{рег}}=1.96$ . З нерівності видно, що система без навантаження буде стійкою при  $K_{\text{рег}} < 1.96$ . При перевищенні цього коефіцієнту система стає нестійкою. Це ми можемо наглядно побачити побудувавши структурні ланки та дослідивши їх характеристики у комп'ютерній програмі MatLab.

#### 4.1.2 Дослідження ПД-регулятора

Настроїмо контур регулювання швидкості на технічний оптимум

$$W_{\text{рег}} \cdot \frac{K_{\text{д}} \cdot K_{\text{пч}} \cdot K_{\text{тг}}}{(1 + T_{\text{пч}}p) \cdot (T_{\text{е}}T_{\text{м}}p^2 + T_{\text{м}}p + 1)} = \frac{1}{2T_{\mu}p \cdot (T_{\mu}p + 1)}. \quad (4.27)$$

Прийmemo  $T_{пч} = T_{\mu}$ , тоді

$$W_{рег} = \frac{(1 + T_{пч}p) \cdot (T_e T_m p^2 + T_m p + 1)}{2T_{пч}p \cdot (T_{пч}p + 1) \cdot K_d \cdot K_{пч} \cdot K_{тг}}. \quad (4.28)$$

Зробимо заміну

$$T_1 = 2T_{пч} \cdot K_d \cdot K_{пч} \cdot K_{тг}, \quad (4.29)$$

тоді

$$W_{рег} = \frac{T_e T_m p^2 + T_m p + 1}{T_1 p} = \frac{T_e T_m}{T_1} p + \frac{T_m}{T_1} + \frac{1}{T_1 p}. \quad (4.30)$$

Підставимо у формули раніше обчислені значення і отримаємо складові

ПД-регулятора

$$T_1 = 2 \cdot 0,1 \cdot 3,14 \cdot 5 \cdot \frac{1,464}{40} = 0,12$$

$$W_{рег} = \frac{0,096 \cdot 0,00419}{0,12} p + \frac{0,00419}{0,12} + \frac{1}{8,33p} = 0,0034p + 0,035 + \frac{1}{8,33p}.$$

## 4.2 Побудова структурних ланок та дослідження їх характеристик

Для дослідження структурних схем контуру швидкості використовуємо інтегроване середовище MatLab 6 з його розширенням Simulink, яке є основою автоматичного складання і розв'язання рівнянь стану динамічних об'єктів і систем. При обчисленні за допомогою Simulink у структурі самої системи використовуються додаткові пристрої: вимірювачі сигналів, осцилографи, оптимізатори, які необхідні для контролю параметрів схеми та її налагодження на необхідний оптимум.

Момент навантаження та задаючий сигнал моделюються блоками Step, які відповідно налаштовані на обрахований момент навантаження та на рівень задаючого сигналу (він коливається у межах від 0,5 до 10 В). Сам момент навантаження подається із деякою затримкою відносно задаючого впливу з метою уникнення від'ємної ділянки моменту двигуна. Усі передаточні функції об'єктів регулювання виконані на основі блоку Transfer Fcn. Блоками Saturation

створюється обмеження задаючого сигналу і він налаштовується на максимальну напругу задання на рівні  $\pm 10$  В. У параметрах обчислення (Simulation Parameters) обчислення виконується методом Рунге-Кутта з фіксованим кроком з дискретністю отриманих точок 0,0001. Отримані характеристики виводяться на екран через Scope.

Побудуємо структурну схему асинхронного двигуна (рис.4.1) і подамо на його вал момент навантаження (збурюючу дію) з затримкою 1,5с за допомогою блоку Step. Задаючим сигналом являється частота напруги мережі рівна 50 Гц. У блоки Transfer Fcn вводяться раніше обчислені передаточні функції ланок. Електромагнітна складова двигуна задається аперіодичною ланкою першого порядку, у ній підсилювальна складова відповідає значенню статичної жорсткості механічної характеристики двигуна  $\beta_{\text{дв}}$ , а запізнююча складова – електромагнітній постійній часу  $T_e$ . Коефіцієнт підсилення двигуна реалізується підсилювальною ланкою і знаходиться як відношення кутової швидкості поля статора до частоти напруги мережі. Для переходу від кутової швидкості до частоти обертання валу двигуна використовується підсилювальна ланка з коефіцієнтом підсилення рівним  $30/\pi$ .

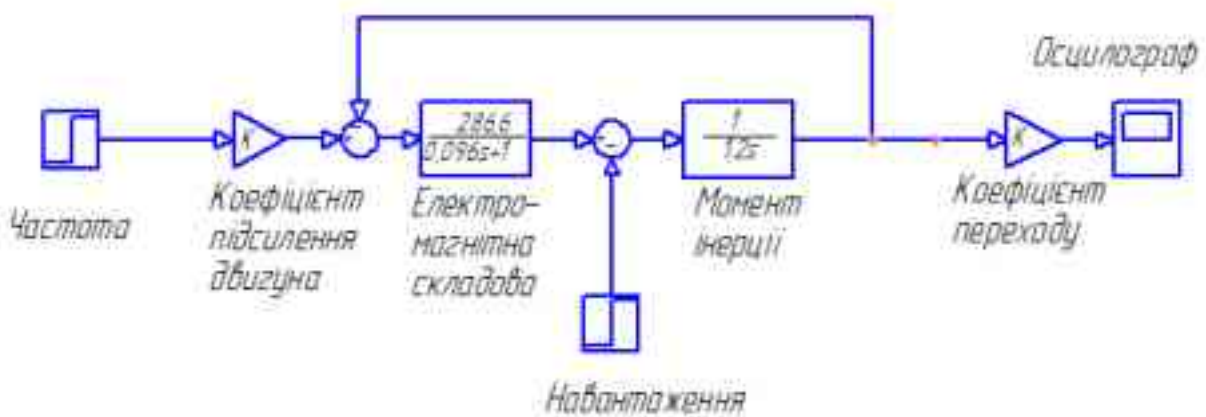


Рисунок 4.1 – Структурна схема асинхронного двигуна з навантаженням на його валу

Приведемо графік перехідного процесу цієї структурної схеми за допомогою блоку Scope (рис.4.2).

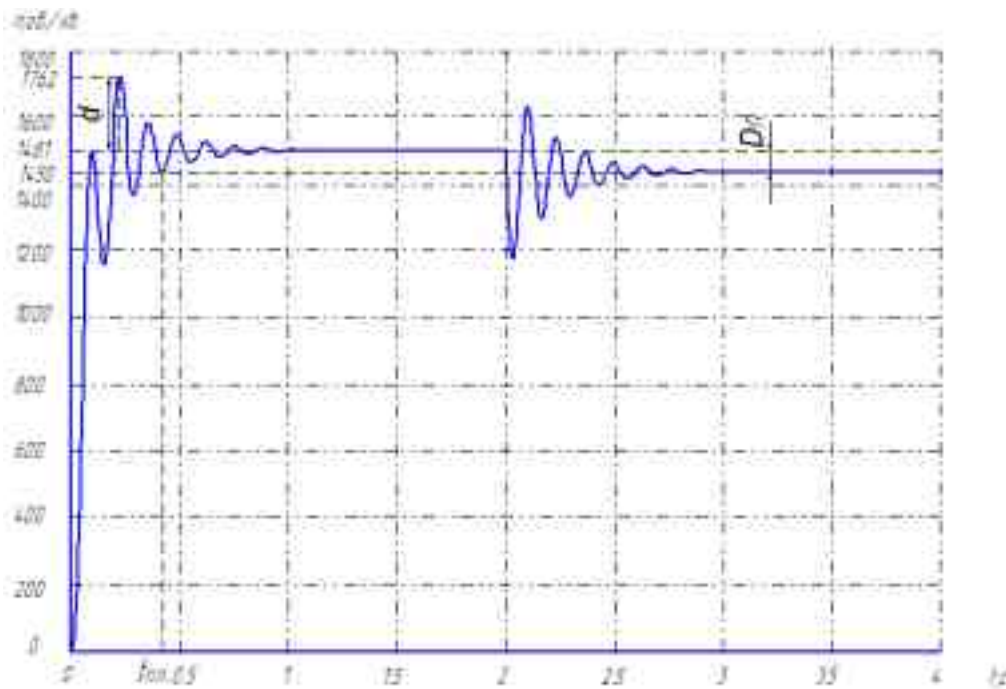


Рисунок 4.2 – Графік перехідного процесу асинхронного двигуна з навантаженням на його валу

Дослідивши цей графік, можна визначити наступні динамічні характеристики цієї моделі двигуна: перерегулювання, час перехідного процесу, статичну похибку (провал швидкості).

Перерегулювання визначається за максимальним відхиленням регулюючої координати під час перехідного процесу наступним чином

$$\delta = \frac{h_{\max} - h_{\text{ном}}}{h_{\text{ном}}} \cdot 100\% = \frac{1762 - 1481}{1481} \cdot 100\% = 18,9\% . \quad (4.31)$$

Час перехідного процесу визначається в межах  $\pm 5\%$  від усталеного режиму:  $t_{\text{п.п.}} = 0,4\text{с} .$

Статична похибка за збуренням визначається наступним чином

$$\Delta n = n_0 - n_n = 1481 - 1450 = 31 \text{ об./хв.} \quad (4.32)$$

Синтезуємо попередню структурну схему асинхронного двигуна. Навантаження реалізується в моделі включенням ланки зворотнього зв’язку “шнек” з коефіцієнтом  $\beta$  (рис.4.3).

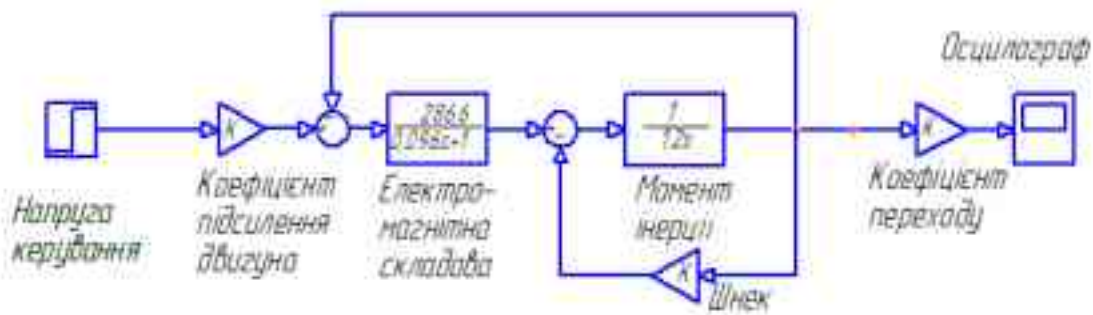


Рисунок 4.3. Структурна схема асинхронного двигуна з навантаженням на його валу

Приведемо графік перехідного процесу цієї структурної схеми (рис 4.4).

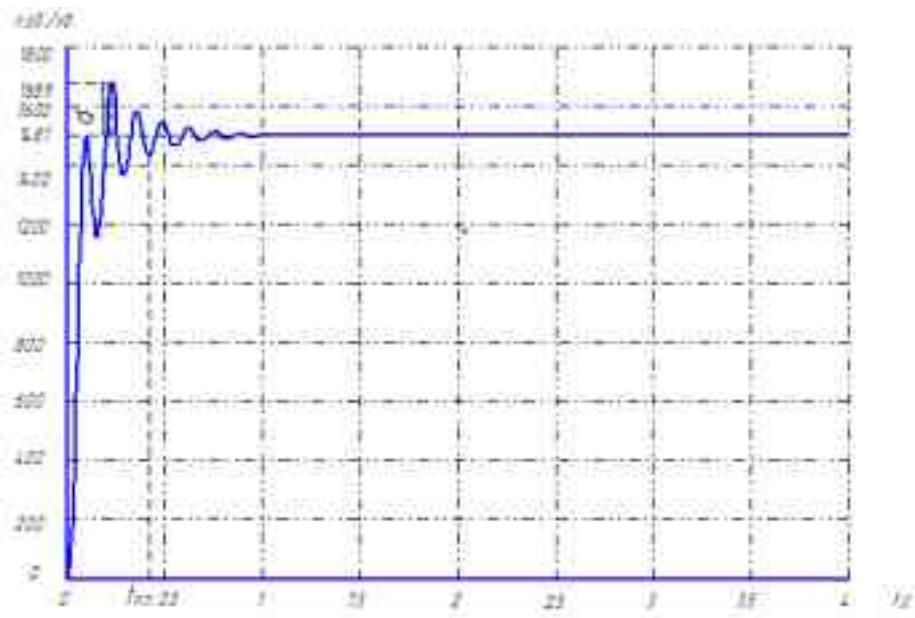


Рисунок 4.4 – Графік перехідного процесу асинхронного двигуна з навантаженням на його валу

Дослідивши цей графік ми отримаємо наступні динамічні характеристики:

Перерегулювання:  $\delta = \frac{1689 - 1481}{1481} \cdot 100\% = 14\%.$

Час перехідного процесу:  $t_{n.n.} = 0,4c.$

Таким чином, дослідивши перехідні процеси двох структурних схем, можна зробити висновок, що динамічні характеристики першої системи, тобто коли на валу двигуна відсутнє навантаження, гірші. Отже, у подальшому ми будемо досліджувати гірший режим роботи системи.

Для нормальної роботи в системі повинна бути відсутня статична похибка. Для її усунення потрібно лінеаризувати замкнену систему. Для цього вводимо у структурну схему від'ємний зворотній зв'язок за швидкістю.

Для реалізації зворотного зв'язка вибираємо тахогенератор постійного струму типу: ТД-101 з наступними основними параметрами:

- вихідна напруга  $U_{н.вих.} = 230V$ ;
- номінальна частота обертання: 1500 об./хв.

У структурну схему вводимо також П-регулятор та перетворювач частоти. Для цього у підсилюючу ланку зворотного зв'язку вводимо раніше обчислений коефіцієнт тахогенератора та дільника напруги, а у ланку П-регулятора коефіцієнт підсилення  $K=2$ , тобто менший граничного коефіцієнта 5,89. Структурна ланка перетворювача частоти реалізується за допомогою блоку Transfer Fsp., у нього вводиться аперіодична ланка першого порядку з коефіцієнтом підсилення перетворювача частоти  $K=5$  та затримкою часу 0,1с. Керуючий сигнал  $U_k$  задається напругою менше 10V. Для встановлення номінальної частоти обертання валу двигуна підстроюємо значення керуючого сигналу  $U_k$ . Для контролю проміжних параметрів системи: напруги керування зворотного зв'язку, напруги керування перетворювача частоти та самої частоти на виході перетворювача використовуються блоки Scope. Структурна схема такої системи представлена на рис. 4.5.

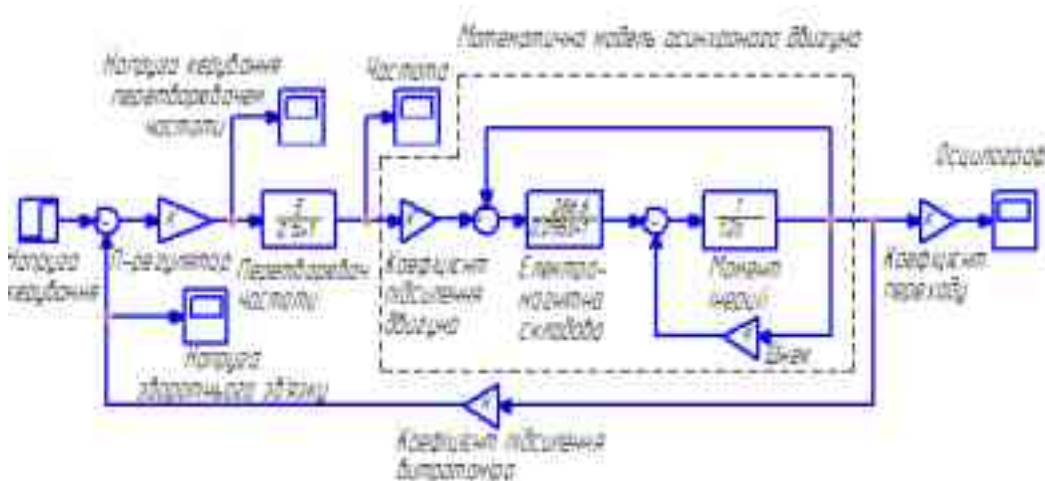


Рисунок 4.5 – Структурна схема асинхронного двигуна з від'ємним зворотнім зв'язком за швидкістю з П-регулятором

Приведемо графік перехідного процесу цієї структурної схеми (рис. 4.6).

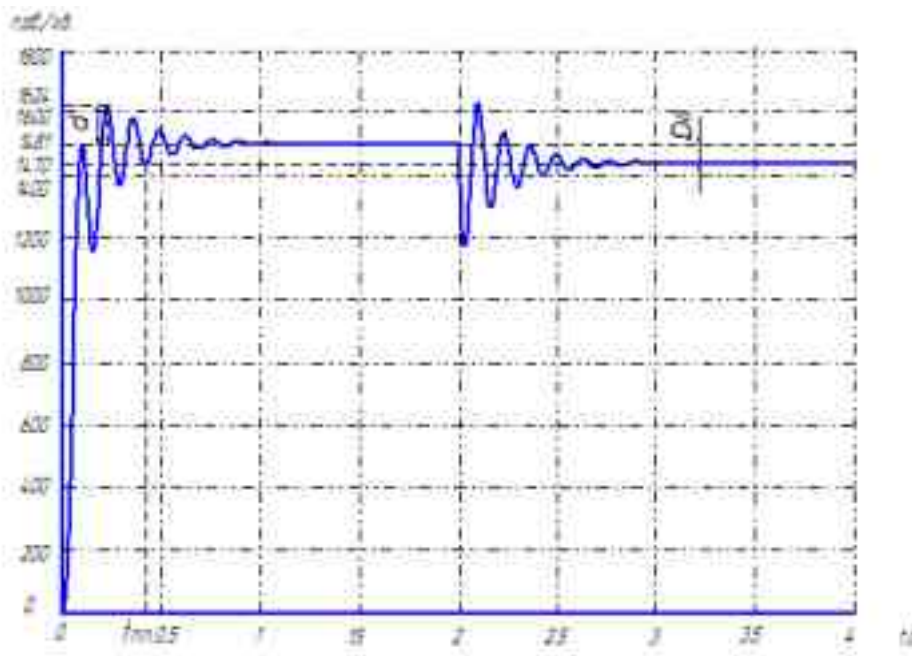


Рисунок 4.6 – Графік перехідного процесу асинхронного двигуна з від’ємним зворотнім зв’язком за швидкістю з П-регулятором ( $K=2$ )

Дослідивши цей графік ми отримаємо наступні динамічні характеристики:

Перерегулювання:  $\delta = \frac{1624 - 1481}{1481} \cdot 100\% = 9,7\%$ .

Час перехідного процесу:  $t_{п.п.} = 0,42\text{с}$ .

Статична похибка за збуренням:  $\Delta n = 1481 - 1470 = 11 \text{об./хв.}$

Провівши порівняння динамічних характеристик з першим графіком, бачимо, що у системі зі зворотнім зв’язком значно зменшується перерегулювання, статична похибка зменшилася, час перехідного процесу майже не змінився.

Підставимо у ланку П-регулятора коефіцієнт підсилення  $K=4$  і отримаємо графік перехідного процесу з цим значенням (рис. 4.7).

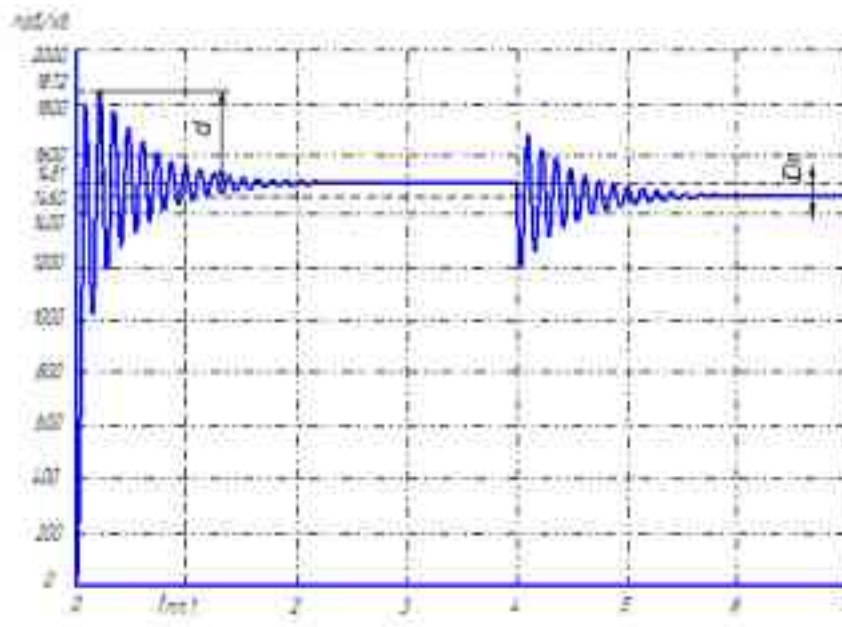


Рисунок 4.7 Графік перехідного процесу асинхронного двигуна з від'ємним зворотнім зв'язком за швидкістю з П-регулятором ( $K=4$ )

Дослідивши цей графік ми отримаємо наступні динамічні характеристики:

Перерегулювання:  $\delta = \frac{1872 - 1481}{1481} \cdot 100\% = 26,4\%$ .

Час перехідного процесу:  $t_{п.п.} = 1\text{с}$ .

Статична похибка за збуренням:  $\Delta n = 1481 - 1460 = 21\text{об./хв}$ .

Проведемо порівняння динамічних характеристик П-регулятора з коефіцієнтом підсилення  $K=2$  та  $K=4$ .

Видно, що статична похибка зменшується, а динамічні характеристики погіршуються.

Дослідимо систему з П-регулятором на стійкість методом частотних характеристик ЛАЧХ та ЛФЧХ. Для цього у інтегрованому середовищі MatLab 6 використаємо розширення Linear analysis.

Приведемо частотні характеристики даної системи (рис. 4.8).

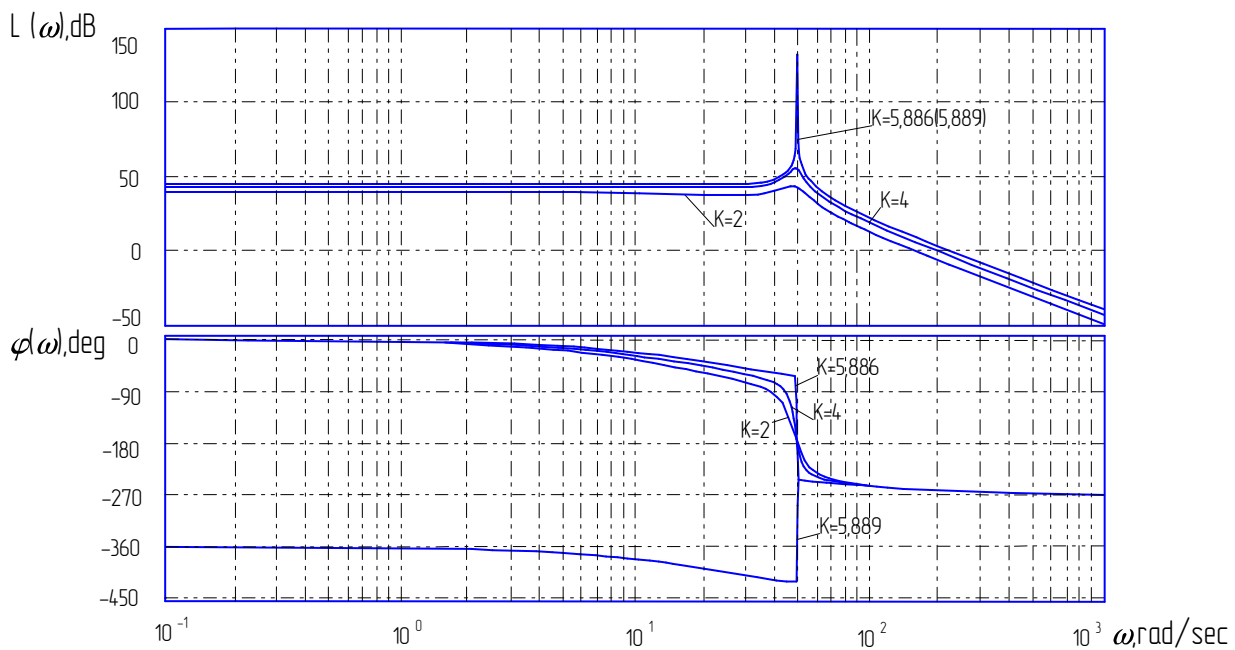


Рисунок 4.8 – Частотні характеристики асинхронного двигуна з від’ємним зворотнім зв’язком за швидкістю з П-регулятором

З графіка можна побачити, що система стає нестійкою при граничному коефіцієнті  $K=5,89$ , який ми знайшли теоретично методом дослідження системи на стійкість за критерієм Гурвіца. Отже, система з П-регулятором при  $K=2$  та  $K=4$  стійка.

Дослідимо систему з П-регулятором на запас стійкості методом частотних характеристик ЛАЧХ та ЛФЧХ. Для цього розірвемо від’ємний зворотній зв’язок за швидкістю.

Мінімальний запас розімкненої системи повинен бути:

- по амплітуді  $\Delta h = 13\text{dB}$ ;
- по фазі  $\Delta\psi = 30\text{deg}$ .

Приведемо частотні характеристики даної системи (рис. 4.9).

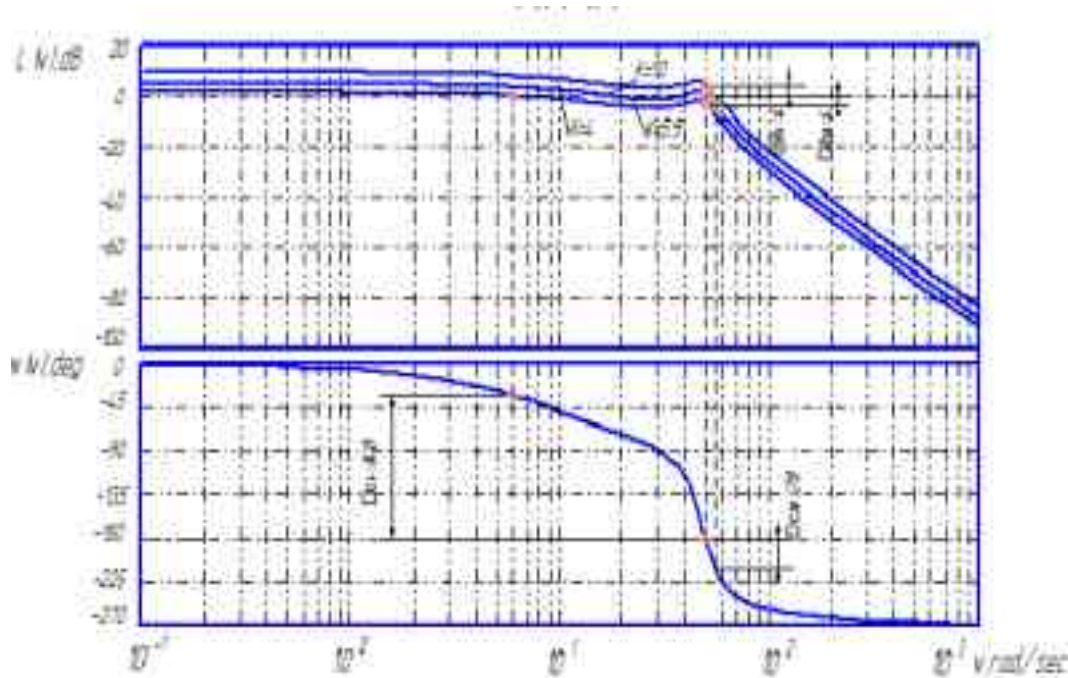


Рисунок 4.9 – Дослідження запасу стійкості системи з ПІ-регулятором

З графіка видно, що для ПІ-регулятора з коефіцієнтом підсилення  $K=4$  виконується запас по фазі, а по амплітуді ні. Отже, ПІ-регулятор не задовольняє нашу систему.

Замінімо у структурній схемі ПІ-регулятор на ПДІ-регулятора. Для цього вводимо у структурну ланку раніше розраховані складові ПДІ-регулятора (рис.4.10).

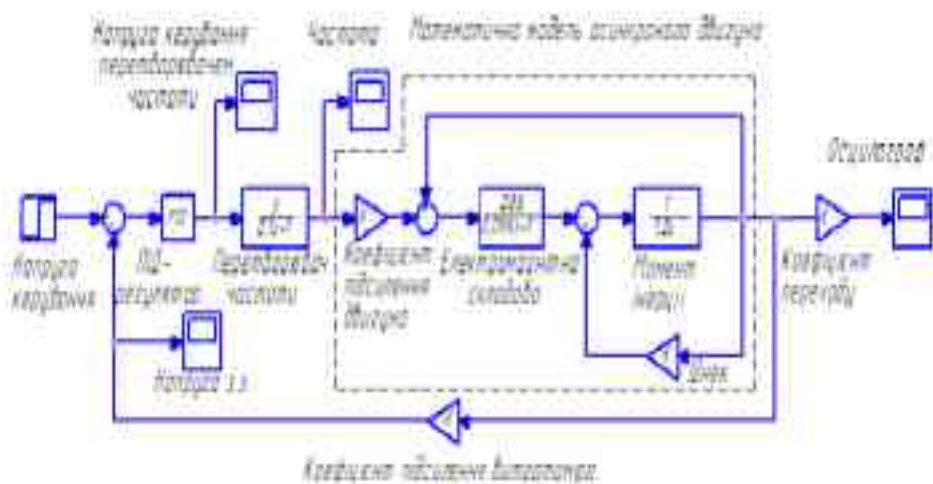


Рисунок 4.10 – Структурна схема асинхронного двигуна з від'ємним зворотнім зв'язком за швидкістю з ПДІ-регулятором

Приведемо графік перехідного процесу цієї структурної схеми (рис. 4.11).



Рисунок 4.11 – Графік перехідного процесу асинхронного двигуна з від’ємним зворотнім зв’язком за швидкістю з ПД-регулятором

Дослідивши цей графік ми отримаємо наступні динамічні характеристики:

Перерегулювання:  $\delta = \frac{1541 - 1481}{1481} \cdot 100\% = 4\%$ .

Час перехідного процесу:  $t_{п.п.} = 0,8\text{с}$ .

Статична похибка за збуренням відсутня.

Отже, динамічні характеристики даної системи нас повністю влаштовують.

Дослідимо систему з ПД-регулятором на запас стійкості методом частотних характеристик ЛАЧХ та ЛФЧХ (рис.4.12).

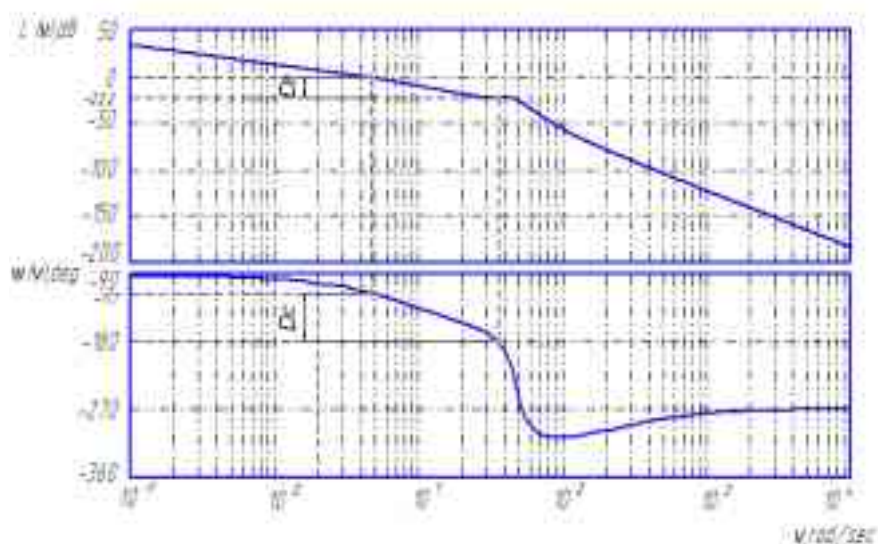


Рисунок 4.12 – Дослідження запасу стійкості системи з ПД-регулятором

Визначимо запас системи з його частотних характеристик:

- по амплітуді  $\Delta h = 22,2\text{dB}$ ;
- по фазі  $\Delta\psi = 63\text{deg}$ .

Також графік показує, що у ПД-регулятора відсутнє підвищення сигналу на резонансній частоті. Тобто, збільшується демпфуюча здатність електропривода (здатність електропривода гасити коливання вихідних параметрів).

Отже, робимо висновок, що дана система з ПД-регулятором задовольняє нас, як за динамічними характеристиками, так і по запасу стійкості.

## ВИСНОВОК

В процесі виконання випускної кваліфікаційної роботи:

1. Розглянуті шляхи підвищення продуктивності роботи оператора, зниження собівартості та енергоємності продукції, покращення умов праці та підвищення безпеки життєдіяльності.
2. Виконано інженерні розрахунки з метою виявлення доцільності використання електрообладнання встановленої потужності.
3. Вибрано та економічно обґрунтовано електропривод екструдера Е-1000.
4. Доведено доцільність встановлення електропривода з асинхронним двигуном з частотним керуванням.
5. Розроблено та розраховано схему тиристорного випрямляча та його СІФК для живлення асинхронного двигуна.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Василега П.О., Муріков Д.В. Електропривод робочих машин. Суми. 2006. 228с.
2. Онушко В.В. Монтаж, налагодження, експлуатація і ремонт електротехнічних пристроїв. Полтава: ПНТУ, 2000.
3. Матвієнко М.П. Основи електротехніки. Київ: Ліра-К. 2017. 228 с.
4. Пічугін С.Ф. Надійність технічних систем. - Полтава: ПНТУ, 1999.
5. Проектування систем електрифікації та автоматизації АПК / І. І. Мартиненко та ін. Київ: НМЦ Мінагропрому України, 2008. 330 с.
6. Корчемний М.О., Клендій М.В., Потапенко М.В. Теоретичні основи автоматики. Тернопіль : Навчальна книга – Богдан, 2011. 304 с.
7. Штіфзон О.Й., Новіков П.В., Бунь В.П. Теорія автоматичного управління. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. 144 с.
8. Åström K.J., Hägglund T. Advanced PID control. ISA (The Instrumentation, System, and Automation Society), 2006. 460 p.
9. Ладанюк А.П. Теорія автоматичного керування. Київ: НУХТ, 2004. 124с.
10. Автоматизація технологічних процесів і виробництв харчової промисловості: Підручник/ Ладанюк А.П., Трегуб В.Г., Ельперін І.В., Цюцюра В.Д. – К.: Аграрна освіта, 2001 – 224 с.
11. Іванов А. О. Теорія автоматичного керування. Дніпропетровськ: Національний гірничий університет. 2003. 250 с.
12. Пушкар М.С., Проценко С.М. Проектування систем автоматизації. Дніпропетровськ: Національний гірничий університет, 2013. 268 с.
13. Стеклов В.К. Проектирование систем автоматического управления. Киев: Высшая школа, 1995. 231 с.
14. Ткачов В.В., Чернишев В.П., Одиновол М.М. Технічні засоби автоматизації. Дніпропетровськ: Національний гірничий університет, 2008. 174 с.

15. Електропривод / Лавріненко Ю.М. та ін. Київ: Видавництво «Ліра-К». 2009. 504 с.
16. Електропривід сільськогосподарських машин, агрегатів та потокових ліній / Жулай Є.Л. та ін. Київ: Вища освіта. 2001. 288 с.
17. Електропривод / Марченко О.С. та ін. Київ: Урожай, 1995. 208 с.
18. Зеленов А.Б. Электропривод. Ч.1. Алчевск: ДонГТУ, 2005. 394 с.
19. Зеленов А.Б. Электропривод. Ч.2. Алчевск: ДонГТУ, 2005. 513 с.
20. Механізація та автоматизація у тваринництві і птахівництві / Марченко О.С. та ін. Київ: Урожай, 1995. 416 с.
21. Правила устройства электроустановок. Харьков: Изд-во «Индустрия», 2007. 416 с.
22. Плахтина О.Г., Мазепа С.С., Куцик А.С. Частотно-керований асинхронний та синхронний електроприводи. Львів: Вид-во НУ «Львівська політехніка», 2002. 228с.