

Центральноукраїнський національний технічний університет
Факультет будівництва, транспорту та енергетики
Кафедра “Електротехнічні системи та енергетичний менеджмент”

“Допущено до захисту ”
Зав. кафедрою ЕТС та ЕМ
к.т.н., професор
_____Петро ПЛЄШКОВ
“ ____ ” _____2023р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

ЗА ДРУГИМ (МАГІСТЕРСЬКИМ) РІВНЕМ
ВИЩОЇ ОСВІТИ

на тему:

“АНАЛІЗ ЗАСОБІВ ТА МЕТОДІВ ФОРМУВАННЯ АЛГОРИТМУ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ НАСОСНИХ УСТАНОВОК”

Виконав здобувач вищої освіти
II курсу магістратури, групи ЕЕ-22М
ОПП «Електротехнічні системи
електроспоживання»
спеціальності 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»
_____Олег МАРЧЕНКО

« ____ » _____2023 р.

Керівник роботи професор, к.т.н.
_____Петро ПЛЄШКОВ

« ____ » _____2023 р.

Рецензент _____

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет будівництва, транспорту та енергетики

Кафедра електротехнічних систем та енергетичного менеджменту

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Галузь знань 14 «Електрична інженерія»

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Освітньо-професійна програма «Електротехнічні системи електроспоживання»

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри ЕТС та ЕМ

к.т.н., професор

_____ Петро ПЛІШКОВ

«_____» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗА ДРУГИМ (МАГІСТЕРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ

Марченка Олега Олексійовича

(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема роботи (проекту) **Аналіз засобів та методів формування алгоритму керування електроприводів насосних установок.**

Analysis of means and methods for forming a control algorithm for electric drives of pumping units.

2. Керівник роботи (проекту) Плішков Петро Григорович, к.т.н., професор

(прізвище, ім'я, по-батькові, науковий ступінь, вчене звання)

3. Строк подання студентом роботи до захисту 25.12.2023 р.

4. Мета та завдання випускної кваліфікаційної роботи (проекту) _____

Вступ; Типові структури систем водопостачання та системи управління насосних установок; Проблеми пуску і рушання електроприводів насосних установок; Розробка алгоритму керування електроприводів насосних установок; Розробка математичної моделі процесу рушання; Алгоритм управління пуском додаткових насосів в насосних станціях; Визначення законів керування електричними приводами насосних агрегатів з точним значенням продуктивності; Економічна ефективність використання систем керованого рушання; Охорона праці; Висновки.

5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
<i>Охорона праці</i>	<i>к.т.н, доц. Савеленко І.В.</i>		

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів випускної кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	<i>Вступ</i>	9.10.23	
2	<i>Типові структури систем водопостачання та системи управління насосних установок</i>	15.10.23	
3	<i>Проблеми пуску і рушання електроприводів насосних установок</i>	22.10.23	
4	<i>Розробка алгоритму керування електроприводів насосних установок</i>	4.11.23	
5	<i>Розробка математичної моделі процесу рушання</i>	12.11.23	
6	<i>Алгоритм управління пуском додаткових насосів в насосних станціях</i>	18.11.23	
7	<i>Визначення законів керування електричними приводами насосних агрегатів з точним значенням продуктивності</i>	24.11.23	
8	<i>Економічна ефективність використання систем керованого рушання</i>	02.12.23	
9	<i>Охорона праці</i>	10.12.23	
10	<i>Оформлення пояснювальної записки ВКР</i>	22.12.23	
11	<i>Оформлення презентаційної частини ВКР</i>	25.12.23	

Дата видачі завдання
Підпис керівника _____

«___» _____ 2023 р.
Петро ПЛЄШКОВ

Завдання прийнято до виконання
Підпис здобувача _____

«___» _____ 2023 р.
Олег МАРЧЕНКО

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота: 123 с.; 47 рис.; 3 табл.; 13 джерел.

Марченко О.О. Аналіз засобів та методів формування алгоритму керування електроприводів насосних установок. – Рукопис.

Магістерська робота за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», ОПП «Електротехнічні системи електроспоживання». – Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, 2023 рік.

Об'єктом досліджень є насосні установки ОКВП «Дніпро-Кіровоград».

Предмет досліджень – керування електроприводами насосних установок.

Мета дослідження полягає у розробці алгоритмів керування електроприводами насосів та оцінці ефективності методів та технічних засобів для підвищення енергоефективності та зниження зносу електромеханічного та технологічного обладнання.

У кваліфікаційній роботі описано методи управління насосними установками та регулювання їхніх режимів роботи. Також розроблено об'єктну модель, яку детально розглянуто в третьому розділі.

В роботі досліджувалось застосування перетворювача частоти та систему його візуалізації. Алгоритм керування насосним агрегатом представлено у вигляді блок-схеми, основуючись на аналізі джерел інформації. Оригінальність дослідження включає розроблену модель, аналіз та статистику, виконані в середовищі Matlab, а також використання сучасної системи Simulink, що інтегрована з Matlab.

Висновки роботи показують, що розроблена автоматизована система керування може бути успішно впроваджена на насосних станціях різного призначення та потужності.

Ключові слова: насосні установки, режими роботи, втрати енергії, системи керування, перетворювач частоти, економічна ефективність.

ABSTRACT

Qualification work: 123 p.; Fig. 47; 3 tables; 13 sources.

Marchenko O.O. Analysis of means and methods of forming the control algorithm of electric drives of pumping units. - Manuscript.

Master's thesis on specialty 141 "Electric power engineering, electrical engineering and electromechanics", OPP "Electrotechnical systems of electricity consumption". – Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, 2023.

The object of research is the pumping installations of OKVP "Dnipro-Kirovohrad".

The subject of research is control of electric drives of pumping units.

The purpose of the study is to develop algorithms for controlling electric drives of pumps and to evaluate the effectiveness of methods and technical means to increase energy efficiency and reduce the wear and tear of electromechanical and technological equipment.

The qualification work describes the methods of managing pumping units and regulating their operating modes. An object model was also developed, which is discussed in detail in the third chapter.

The paper investigated the use of a frequency converter and its visualization system. The pump unit control algorithm is presented in the form of a block diagram, based on the analysis of information sources. The originality of the research includes the developed model, analysis and statistics performed in the Matlab environment, as well as the use of a modern Simulink system integrated with Matlab.

The conclusions of the work show that the developed automated control system can be successfully implemented at pumping stations of various purposes and capacities.

Key words: pump installations, operating modes, energy losses, control systems, frequency converter, economic efficiency.

ЗМІСТ

	ВСТУП.....	7
1	ТИПОВІ СТРУКТУРИ СИСТЕМ ВОДОПОСТАЧАННЯ ТА СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НАСОСНИХ УСТАНОВОК..	9
1.1.	Типова структура системи водопостачання.	9
1.2.	Характеристика насосів та насосних установок.....	12
2	ПРОБЛЕМИ ПУСКУ І РУШАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ НАСОСНИХ УСТАНОВОК.....	17
2.1.	Способи формування пускових характеристик електроприводу.	17
2.2	Системи електроприводів для реалізації пускових режимів.....	30
3.	РОЗРОБКА АЛГОРИТМУ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ НАСОСНИХ УСТАНОВОК	41
3.1.	Розробка структури і алгоритму системи керованого рушання.....	41
3.2.	Особливості конструкції силового модуля.....	51
3.3.	Вибір елементної бази силового та інформаційного каналу.....	53
3.4.	Розробка принципової електричної схеми силового каналу.....	61
4	РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ПРОЦЕСУ РУШАННЯ....	65
4.1.	Дослідження процесу пуску з використанням системи керованого рушання на базі ПЧ.....	65
4.2.	Складання моделі системи керованого рушання.....	75
4.3.	Результати моделювання.	76
5	АЛГОРИТМ УПРАВЛІННЯ ПУСКОМ ДОДАТКОВИХ НАСОСІВ В НАСОСНИХ СТАНЦІЯХ.....	79
5.1.	Способи пуску додаткових насосів в насосних станціях підвищення тиску.....	79
5.2.	Характеристики пуску насосів.	81
6	ВИЗНАЧЕННЯ ЗАКОНІВ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИМИ ПРИВОДАМИ НАСОСНИХ АГРЕГАТІВ ПРИ ТОЧНОМУ ЗНАЧЕННІ ПРОДУКТИВНОСТІ.....	93

7	ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ СИСТЕМ КЕРОВАНОГО РУШАННЯ.....	102
7.1.	Оцінка впливу впровадження систем керованого рушання на збільшення терміну служби ізоляції електричних машин.....	102
7.2.	Економія електроенергії шляхом зміни пускового режиму двигуна...	107
7.3.	Економічний ефект, отриманий шляхом підвищення терміну служби двигуна.....	108
7.4.	Економічний ефект впровадження системи керованого рушання.....	110
8	ОХОРОНА ПРАЦІ.....	112
8.1.	Профілактичні заходи для забезпечення електробезпеки під час технічного обслуговування електроустановок.....	112
8.2.	Перелік інструкцій з технічного обслуговування, обладнання і директивних матеріалів.....	112
8.3.	Перелік схем і пристроїв електроустаткування.	113
8.4.	Права, обов'язки і відповідальність персоналу.....	113
8.5.	Оптимізація робочих процесів.....	117
8.6.	Безпека в надзвичайних ситуаціях.....	118
	ВИСНОВКИ.....	120
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	122

СПИСОК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

АД - асинхронний двигун

АСУ - автоматизована система управління

АСУТП - автоматизована система управління технологічним процесом

АЕП - автоматизований електропривод

НА - насосний агрегат

НС - насосна станція

ЧРЕ – частотнорегульований електропривод

ККД – коефіцієнт корисної дії

САУ – система автоматичного управління

АІН - автономний інвертор напруги

АІС - автономний інвертор струму

ПЧ – перетворювач частоти

ШІМ - широтно-імпульсна модуляція

УЗВ - ультразвуковий витратомір

АВК - асинхронно вентильний каскад

АВР - автоматичне включення резерву

АПВ - автоматичне повторне включення

ППП – пристрій плавного пуску

ВСТУП

Електропривод є основою для виробництва енергії, його технічний рівень визначає ефективність роботи технологічного обладнання. Розвиток електропривода спрямований на підвищення економічності та надійності через удосконалення двигунів, пристроїв, перетворювачів та засобів управління.

Насосні станції неодмінно входять до складу технологічного обладнання в промисловості та житлово-комунальному господарстві, споживаючи близько 20% загального обсягу електроенергії.

Основна мета насосних станцій - забезпечення безперебійного та стійкого доступу споживачів до води з визначеними гідравлічними параметрами і мінімальними витратами. Відтак, питання, пов'язане з економією електроенергії при управлінні насосами, набуває особливої актуальності.

Існують конкретні напрями для зниження споживання енергії асинхронними електроприводами насосних установок. Перший напрям спрямований на зменшення втрат в електроприводі під час виконання заданих технологічних операцій за певними тахограмами та з конкретним режимом навантаження. Електроприводи, що працюють у пускотормозних або тривалих режимах з поступово змінюючимся навантаженням, можуть значно зменшити втрати електроенергії в сталих і перехідних режимах. У випадку кінематично пов'язаних електроприводів рівномірний розподіл навантажень між двигунами дозволяє також мінімізувати втрати.

Другий напрям пов'язаний із зміною технологічного процесу на основі переходу до більш вдосконалених методів регулювання електроприводу та параметрів цього технологічного процесу, при цьому енергоспоживання електроприводу зменшується.

Розповсюдження регульованих електроприводів призвело до того, що сучасний електропривод виконує не лише роль енергетичної основи, яка

постачає необхідну механічну енергію для виробничих механізмів, але і функцію засобу управління технологічними процесами.

Серйозні труднощі з пуском технологічних механізмів за допомогою електроприводу становлять значний виробничий виклик в багатьох галузях промисловості. Розумний аналіз пуску механізмів з урахуванням процесу рушання є цілком обґрунтованим. При рушанні електроприводів насосів підвищення моменту опору може бути настільки значним, що потрібно використовувати спеціальні засоби та методи формування пускових характеристик.

Отже, актуальним є підвищення енергоефективності та удосконалення пускових характеристик електромеханічного обладнання насосних станцій за допомогою розробки методів і технічних засобів керування електроприводами насосних установок.

1 ТИПОВІ СТРУКТУРИ СИСТЕМ ВОДОПОСТАЧАННЯ ТА СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НАСОСНИХ УСТАНОВОК

1.1. Типова структура системи водопостачання.

Насосна станція (НС) являє собою комплекс гідротехнічних споруд та устаткування, яке забезпечує відбір води із джерел та перекачує її за допомогою насосних агрегатів до напірного басейну або місця призначення. Це визначення дозволяє створити структурну схему типової НС, яка зображена на рис. 1.1.

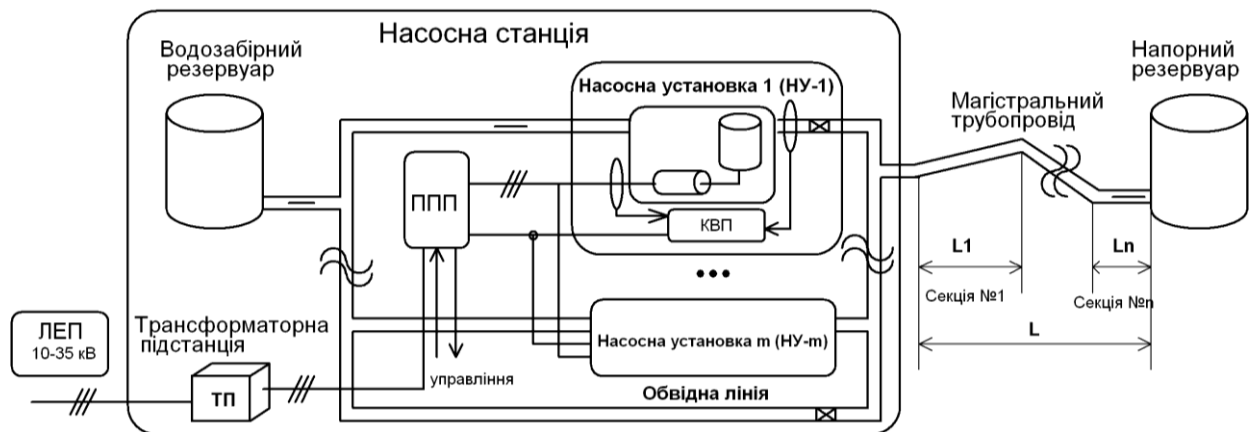


Рисунок 1.1- Типова структурна схема насосної.

Схема включає такі компоненти:

- Водозабірний резервуар, куди вода подається після відповідної обробки у водоочисній підсистемі (у випадку НС I підйому), безпосередньо з артсвердловини (у випадку НС II підйому), або з трубопроводу попередньої ділянки системи водопостачання (у випадку НС III, IV та інших підйомів).
- m - Група насосних установок (НУ), що включає комплекс пристроїв, які забезпечують подачу води з джерела в напірний трубопровід за допомогою насосного агрегату. Крім самого насосного

агрегату, НУ включає всмоктуючий і напірний трубопроводи з арматурою і контрольно-вимірювальними приладами (КВП), а також пристрій управління (ПУ) насосним агрегатом.

- Насосний агрегат (НА), який об'єднує привід, редуктор і насос в єдиний вузол.
- Обвідна лінія, яка включається у разі аварійної зупинки НУ.
- Магістральний трубопровід довжиною L , складений з n сегментів, служить для передачі води в напірний резервуар системи далекого транспорту води. З цього резервуару вода перекачується до НС наступного підйому або подається безпосередньо в мережу.
- Трансформаторна підстанція (ТН), яка забезпечує електропостачання основного і допоміжного електроустаткування НС.

Для такої типової структури насосної станції може бути розглянута автоматизована система управління технологічним процесом (АСУТП) водопостачання. АСУТП водопостачання представляє собою комплекс засобів технічного, інформаційного, математичного і програмного забезпечення, який призначений для розробки і впровадження управляючих впливів на систему водопостачання. Це відбувається відповідно до критерію мінімізації витрат на воду, що надходить до споживачів, і забезпечення необхідного обсягу води при збереженні її відповідної якості.

Автоматизована система управління технологічним процесом (АСУТП) водопостачання складається з ієрархічної структури, що включає наступні основні компоненти:

- АСУТП для підняття води, що включає управління групами артезіанських свердловин та насосною станцією першого підняття;
- АСУТП для очищення води, яке відповідає за управління водоочисними спорудами;
- АСУТП для подачі та розподілу води, що забезпечує управління насосними станціями, які надають воду в мережу;

- АСУТП для далекого транспорту води, яке включає управління насосними станціями магістральних трубопроводів.

Структурна схема ієрархічної структури автоматизованої системи управління системи водопостачання показана на рисунку 1.2.

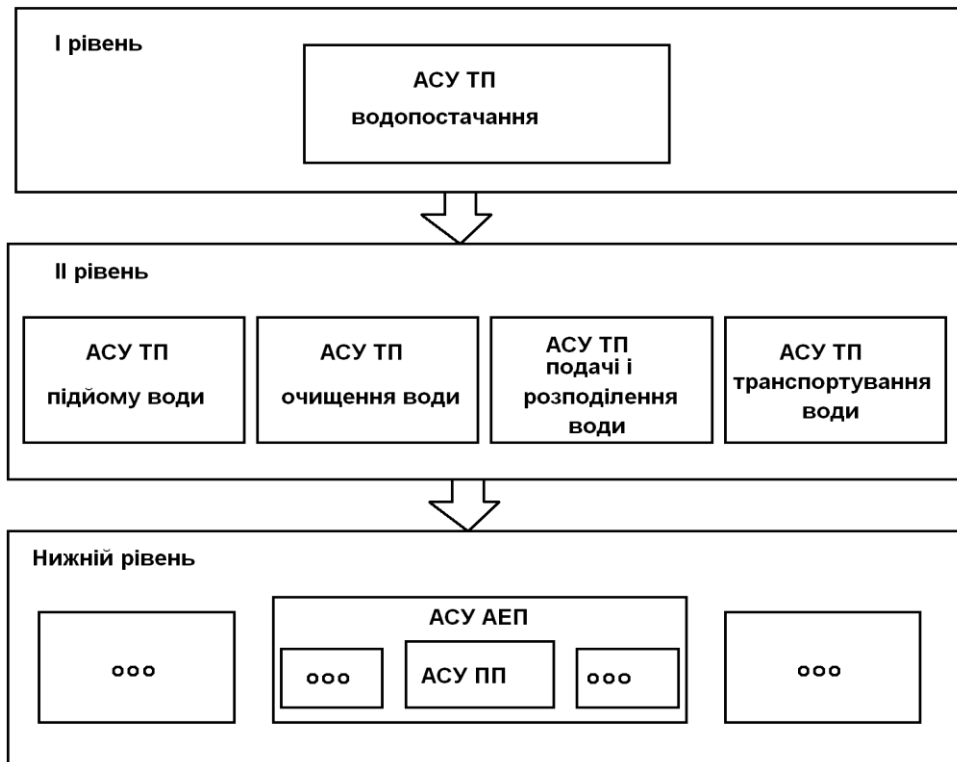


Рисунок 1.2 – Ієрархічна структура автоматизованої системи управління системи водопостачання.

Автоматизована система управління електроприводом (АСУ АЕП) є частиною нижнього рівня ієрархічної структури АСУ в системі водопостачання. Одна з основних функцій АСУ АЕП включає управління пуском, зупинкою та регулюванням швидкості обертання двигунів насосних агрегатів.

1.2. Характеристика насосів та насосних установок.

Розглянемо докладніше загальні аспекти насосних установок, які є ключовим елементом насосної станції.

Насос - це гідравлічна машина, призначена для напірного переміщення рідини, передаючи їй енергію. У поєднанні з електроприводом та передаточним механізмом (муфтою, редуктором, шківом і т.д.), насос утворює насосний агрегат. Сукупність обладнання, що забезпечує оптимальну роботу насосів і включає один або кілька насосних агрегатів, трубопроводів, запірної та регулюючої арматури, контрольно-вимірювальної апаратури, а також апаратури управління та захисту, формує насосну установку. Споруда, яка складається з одного чи кількох насосних установок, системи енергопостачання, допоміжних механізмів та систем, будівель та приміщень, необхідних для ефективної експлуатації об'єкта в цілому, отримала назву насосної станції.

Основними параметрами, які характеризують режим роботи насосної установки, є тиск (напір) та об'єм подачі.

Тиск визначається як різниця питомих енергій рідини в напірному та всасуючому патрубках насоса. Ця різниця необхідна для підняття рідини на задану висоту і для подолання опору тертя в трубопроводі.

Подача - це об'єм рідини, який насосна установка перекачує протягом одиниці часу.

Режим роботи насосної установки визначається як порядок функціонування її обладнання відповідно до змінних умов роботи системи в цілому.

Залежно від призначення та типу рідини, яку перекачує насосна установка, вона може бути водопровідною, каналізаційною, меліоративною, теплофікаційною та іншими.

Насосні водопровідні станції, залежно від ролі, яку вони відіграють у загальній системі водопостачання, класифікуються як станції I та II підйому,

а також як підвищувальні станції. Станції I підйому відбирають воду з джерела водопостачання і направляють її на очисні споруди. Станції II підйому подають воду з резервуарів чистої води по водоводах, магістралях в розподільчу мережу трубопроводів, звідки вона постачається споживачам або накопичується в резервуарах.

У випадках, коли тиск недостатній для підняття води на потрібну висоту, будують підвищувальні насосні станції (станції підкачки). Насосні установки цих станцій підвищують тиск у мережі, перекачуючи воду з одного ділянки водопроводу або мережі і направляючи її в інший водопровід або ділянку мережі. При цьому забір води може здійснюватися через проміжні резервуари або без них.

Залежно від призначення, водопровідні насосні станції (ВНС) поділяються на станції технічної та питної води. Устрій цих станцій, зазвичай, однаковий, але режим їх роботи відрізняється: ВНС технічної води залежать від виробничого циклу підприємства, тоді як ВНС питної води - від водоспоживання населення.

Насосні станції комплектуються одним або декількома насосними агрегатами, і кількість цих агрегатів може варіюватися від одного-двох до 20. У випадку включення кількох агрегатів в насосну установку, напірні та всасуючі лінії насосів з'єднуються між собою відповідно напірними та всасуючими колекторами. Напірні водоводи приєднуються до напірних колекторів, а всасуючі водоводи - до всасуючих колекторів.

Основне обладнання насосних установок включає насоси, приводи насосів (електродвигуни, двигуни внутрішнього згорання, перетворювачі та інші), а також трубопроводи з регулюючою та запірною арматурою.

Лопатеві насоси, зокрема відцентрові та осьові, є найбільш поширеними на сучасних насосних станціях.

Головні робочі параметри насосів визначаються їх характеристиками. Характеристиками насоса є залежність основних параметрів (напору H , потужності N , коефіцієнта корисної дії (ККД) η і припустимої

вакууметричної висоти всмоктування $H_{\text{вак.доп}}$ або кавітаційного запасу $\Delta h_{\text{дон}}$) від об'єму подачі насосу Q при конкретній частоті обертання n робочого колеса з діаметром D .

Для ілюстрації можна навести робочі характеристики відцентрового насосу Д1250-65 з колесами трьох різних діаметрів: 460, 430 та 400 мм при фіксованій частоті обертання 1450 [2].

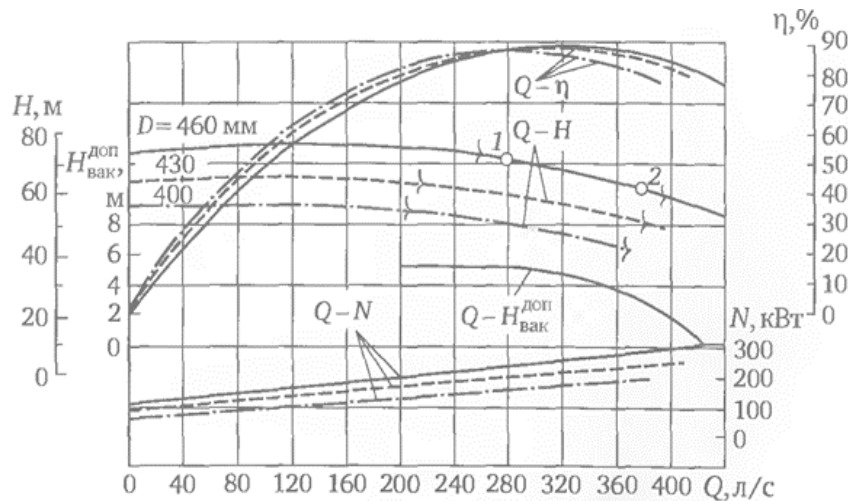


Рисунок 1.3. Робочі характеристики відцентрового насосу типу Д1250-65.

Робочі параметри відцентрових та осьових насосів можуть зазнавати значних змін. Збільшення об'єму подачі призводить до зменшення напору, в той час як зменшення подачі може призвести до збільшення напору. Межі робочої зони на напірній характеристиці насоса $Q - H$ відзначаються вертикальними лініями або іншим способом. Характеристики $Q - H$ відцентрових насосів у межах рекомендованих подач визначаються рівнянням ділянки квадратичної параболи:

$$H_H = H_\phi - S_\phi \cdot Q^2 \quad (1.1)$$

де H_ϕ — фіктивний напір при нульовій подачі, м; S_ϕ — фіктивний гідравлічний опір насоса; Q — подача насоса.

При необхідності фіктивні параметри визначаються каталожними або дослідними характеристиками насоса. Для цього треба визначити координати

двох точок робочої ділянки напірної характеристики насосу, наприклад точок 1 та 2 (рис.1.1). Даним точкам відповідають величини напорів H_1 та H_2 та величини подач Q_1 та Q_2 , тоді:

$$S_{\phi} = \frac{H_1 - H_2}{Q_2^2 - Q_1^2} \quad (1.2)$$

$$H_{\phi} = H_1 + S_{\phi} \cdot Q_1^2 \quad (1.3)$$

$$\text{або } H_{\phi} = H_2 + S_{\phi} \cdot Q_2^2 \quad (1.4)$$

Значення фіктивного напору відповідає конструктивним параметрам насосу. Відношення напору фіктивного до номінального $H_{\phi} / H_{\text{ном}}$ таким же чином, як і коефіцієнт швидкохідності, дає оцінку крутизни напірної характеристики насосу. Так як при правильному виборі насосів $H_{\text{ном}} = H_6$ (де H_6 – напір, що відповідає максимальній подачі Q_6), то $H_{\phi} / H_{\text{ном}} = H_{\phi} / H_6 = H_{\phi}^*$. В такому випадку відносний фіктивний напір насосу H_{ϕ}^* також показує крутизну характеристики $Q - H$. Для більшості відцентрових насосів для чистої води розповсюджене значення $H_{\phi}^* = 1,25$.

Крутизна характеристик $Q - H$ відіграє значну роль у формуванні характеристик $Q - N$. У відцентрових насосах, які проявляють положу характеристику, збільшення подачі Q призводить до постійного зростання споживаної потужності, оскільки напір в цьому випадку зменшується меншою мірою, ніж збільшується подача.

Характеристика $Q - N$ може мати точки перегину, що означає її можливість бути як увігнутою, так і випуклою на різних діапазонах. Щодо характеристики $Q - \eta$ відцентрових насосів, при зменшенні діаметру робочого колеса вона зміщується вліво. Цей ефект також спостерігається при зменшенні обертової частоти робочих коліс насосів.

У системах приводу насосів часто використовуються асинхронні короткозамкнуті та синхронні двигуни змінного струму, а іноді застосовуються асинхронні електродвигуни з фазним ротором.

Двигуни з потужністю до 320 кВт зазвичай розробляються для роботи при напрузі 380-660 В, тоді як для систем потужністю вище використовують напругу 6-10 кВ. У випадках, коли потрібно забезпечити рухому насосну установку, можуть використовуватися двигуни внутрішнього згорання для приводу насосів.

2 ПРОБЛЕМИ ПУСКУ І РУШАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ НАСОСНИХ УСТАНОВОК

2.1. Способи формування пускових характеристик електроприводу.

2.1.1 Причини виникнення вібрацій в процесі пуску.

Проблема запуску електроприводів технологічних механізмів у важких умовах є серйозним завданням у багатьох сферах промисловості, зокрема в галузях гірничорудного та нафтохімічного виробництва. До категорій електроприводів з важкими умовами запуску відносяться приводи дробильно-розмельних механізмів, насосів для транспортування нафтопродуктів, пульпонасосів, скребкових конвеєрів, мішалок та інших пристроїв.

Прямий пуск асинхронних двигунів супроводжується значними ударними моментами і струмами в обмотках статора і ротора, які перевищують номінальні значення. Це призводить до збільшення втрат енергії в двигуні та споживання реактивної потужності під час прямого пуску. Умови прямого пуску також викликають інтенсивні теплові та вібраційні перевантаження, які призводять до зниження експлуатаційної надійності та відмов елементів електричної машини та електроприводу взагалі.

Під час запуску двигуна [20], виникають коливання у приводі через кілька факторів:

1. Виникнення моменту, який характеризується експоненціальним фронтом та вельми малою постійною часу.
2. Ударні знакозмінні моменти, що мають синусоїдальну форму з частотою, що дорівнює частоті мережі.
3. Імпульсний момент, форма якого визначається рівнянням.

$$M_A = k_1 M_{k1} (A_1 e^{-\frac{t}{T_1}} - A_2 e^{-\frac{t}{T_2}}), \quad (2.1)$$

де M_{k1} –початкова величина імпульсного моменту;

T_1, T_2 – постійні часу;

k_1, A_1, A_2 - константи.

Імпульсні складові моменту при пуску показані на рис.2.2.

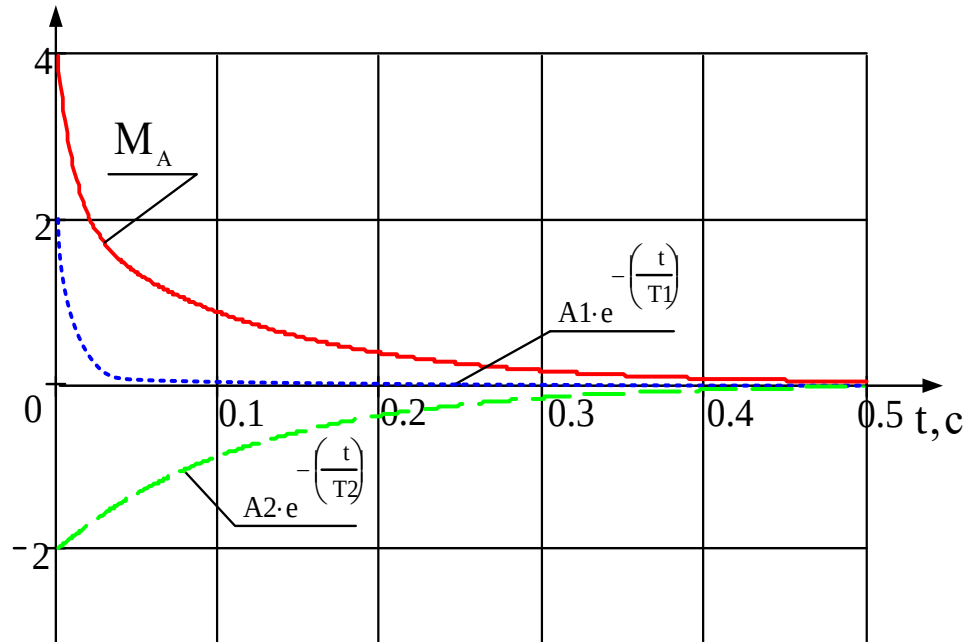


Рисунок 2.1 - Імпульсні складові моменту при пуску двигуна.

Однак навіть при виключенні впливу цих факторів можливе виникнення коливань у приводі. У випадку, коли двигун працює на стійкій частині механічної характеристики, внутрішнє демпфування коливань, коефіцієнт якого рівний ξ_+ у системі визначається в основному дією демпфування зазорів, таких як зубчасті передачі та з'єднання шпон і шліцьових елементів. Ці елементи реально існують і мають величину демпфування, яка пропорційна відносній швидкості інерційних мас системи ω .

При роботі на нестійкій частині характеристики момент, що відповідає механічній характеристиці, сприяє виникненню коливань, введенню негативного демпфування з коефіцієнтом:

$$\xi_- = dM_d / d\omega$$

Під час початкового розгону системи значення моменту $dM_d/d\omega$ збільшується, і в певний момент часу виконується умова $(J/J_p)^2 \xi_- + \xi_+ < 0$, при якій система стає нестійкою. Незначні коливання статичного або рухового моменту приводять до виникнення коливань з наростаючою амплітудою, частота яких дорівнює власній частоті коливань системи. Максимальний коливальний момент може досягти значення $(2 \div 2,5)M_{\text{ном}}$ і стати потенційно небезпечним для приводу.

Отже, під час важкого пуску статор асинхронного двигуна виступає як джерело силових збурень для конструкції машини. Оскільки механічна система є пружною, багатозв'язаною і закріпленою в одній або декількох точках, як самі збурення, так і реакція на них виражається у вигляді коливального руху. Важливим є визначення амплітуди і частоти компонентів силового збурення, яке вносить статор асинхронного двигуна в механічну систему робочої машини під час запуску.

В пускових режимах до статора прикладається зусилля F :

$$F = F_{\text{имп}}(t) + \sum_i F_i \sin \omega_i t, \quad (2.2)$$

де $F_{\text{имп}}(t)$ – імпульсна складова, що може бути апроксимована вираженням:

$$F_{\text{имп}}(t) = A_1 e^{-\frac{t}{T_1}} - A_2 e^{-\frac{t}{T_2}}. \quad (2.3)$$

Імпульсна складова $F_{\text{имп}}(t)$, розкладена за інтегральним перетворенням Фур'є, представляє собою нескінченну суму нескінченно малих гармонійних складових за амплітудою. Ці складові можуть викликати резонансні коливання в конструкції.

До вхідних виразів у суму можуть бути віднесені наступні періодичні складові:

– складова, що пропорційна нерівномірності зазору та зсуву центру тяжіння ротора.

$$F_1(t) = F_{дб} \sin \omega t + F_3 \sin(\omega t - \varphi_1), \quad (2.4)$$

де F_1 – амплітуда даної складової;

$F_{дб}$ – амплітуда, визначена значенням зсуву центру тяжіння (дисбалансом);

F_3 – амплітуда, визначена значенням нерівномірності зазору – ексцентриситетом;

φ_1 – кут зсуву по фазі.

– Складові із частотою, амплітуда якої визначається ступенем електричної несиметрії під час пуску електричної машини

$$F_2(t) = F_k \sin(628st - \varphi_2). \quad (2.5)$$

– складові із частотою $\omega \approx 628c^{-1}$, амплітуда якої пропорційна значенню одноосної сили магнітного тяжіння:

$$F_3(t) = F_{o.c.} \sin(628st - \varphi_3). \quad (2.6)$$

– зубчаті складові, що відповідають прямому і зворотному полям, що обертаються

$$F_{4,1}(t) = k_{4,1} F_{н.с.} \sin \left[\frac{2\pi Z_2}{p} (1-s) - \varphi_{4,1} \right] \quad (2.7)$$

$$i \quad F_{4,2}(t) = k_{4,2} F_{н.с.} \sin \left\{ 2\pi \left[2 + \frac{Z_2}{p} (1-s) \right] - \varphi_{4,2} \right\}, \quad (2.8)$$

де $F_{н.с.}$ – амплітуда вібрації, яка відповідає ступеню несиметрії потоку в машині;

$k_{4,1}$ і $k_{4,2}$ – амплітудні коефіцієнти зубчастої гармоніки для прямого і зворотного полів;

Z_2, p, s – відповідне значення зубців ротора, пара полюсів і ковзання.

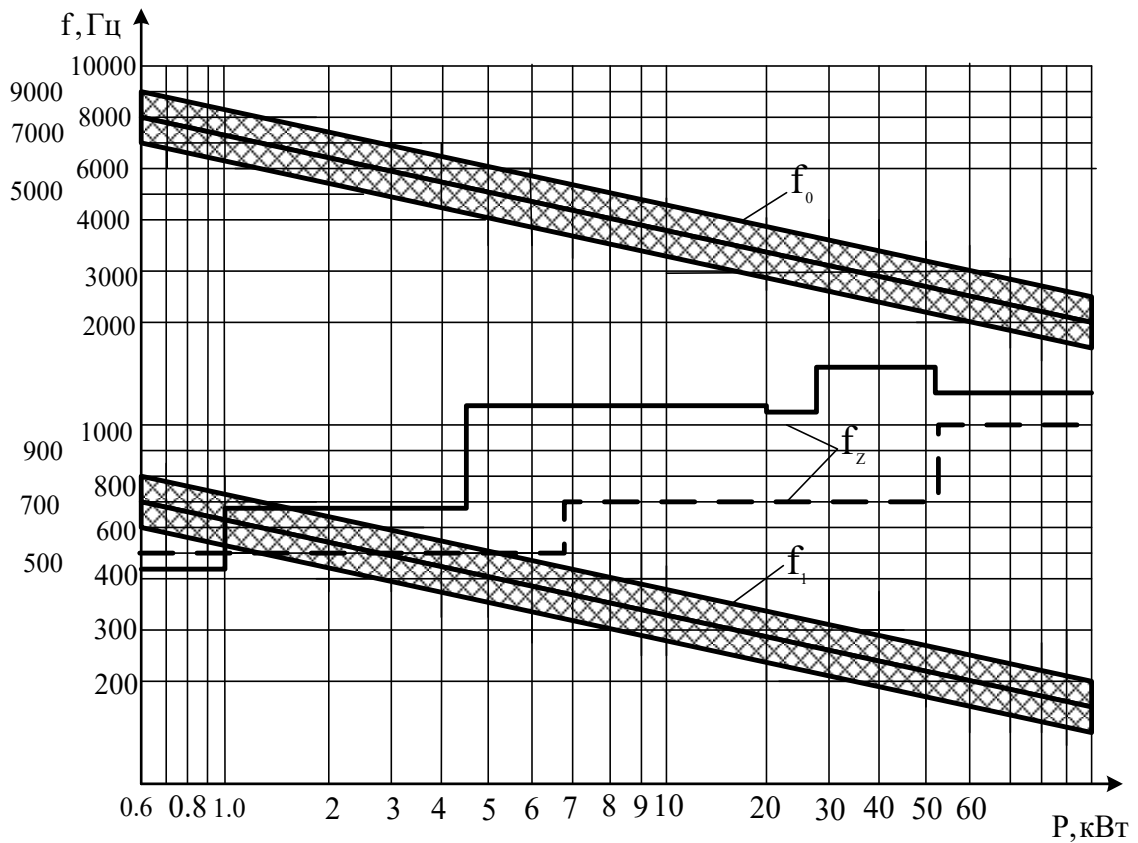


Рисунок 2.2 - Частотні характеристики конструкції статора АД:

f_z - частота зубчатих вібрацій:

— - для двигунів на 1500 об/хв; - - - - для двигунів на 3000 об/хв;

f_0 - частота нульового порядку; f_1 - частота першого порядку.

При оцінці впливу вказаних складових на систему слід враховувати:

– частоту власних коливань статора АД нульового і першого порядку. На рис.2.2 представлені залежності частот власних коливань нульового і першого порядку.

– частоту власних коливань електромеханічної системи «статор-ротор»

$$f_{p.c.} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{2pM_k}{J}}; \quad (2.9)$$

– частоти власних коливань складної системи «двигун – механічна конструкція».

2.1.2. Рушання як фаза пуску електромеханічної системи.

Розгляд пуску механізмів з урахуванням процесу рушання є доцільним. Формування моменту опору під час рушання є специфічним і недостатньо вивченим явищем в теорії електроприводу. Під рушанням розуміється перехід електромеханічної системи з непорушного стану в рух, супроводжується змінами сил і моментів опору, які підкорюються певним законам. Ці закони обумовлені дією сил тертя в підшипниках, ущільненнях, в рухомій частині механізму і в передачах, а також в області взаємодії робочого органу з технологічною середовищем. Характер зміни моменту опору при рушанні є загальним для широкого спектру механізмів: при початковому обертанні валу він досягає пікового значення, що не залежить від кута повороту.

Велика частина загальнопромислових [12] і сільськогосподарських [13] механізмів має початковий статичний момент опору технологічного агрегату (момент рушання), який перевищує статичний момент опору після рушання агрегату.

Реальні залежності моменту опору робочих машин від швидкості $M_c = f(\omega)$ (суцільна лінія на рис.2.3) можуть бути описані приблизно при використанні емпіричної формули Бланка (пунктир на рис.2.3):

$$M_c = M_0 + k \left(\frac{\omega}{\omega_{ном}} \right)^p, \quad (2.10)$$

де k , p - коефіцієнти, які враховують режими роботи механізму;

$\omega_{ном}$ - номінальна швидкість, при якій $M_c = M_n$;

M_0 - момент холостого ходу машини, який враховує постійну складову моменту опору та не залежить від швидкості.

Різниця реальних і аналітичних характеристик відповідає моменту рушання M_T , що видно на рис.2.3

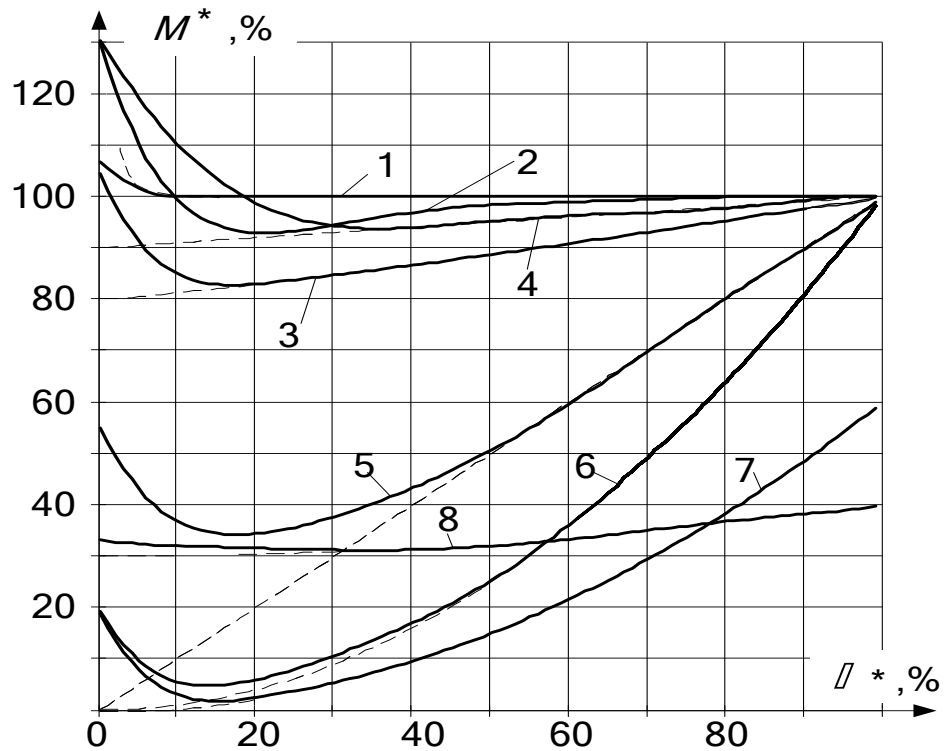


Рисунок 2.3 - Реальні механічні характеристики промислових механізмів: 1– підіймальні крани; 2–підіймальні і транспортні механізми; 3– нереверсивні прокатні стани; 4–дробарки; 5–каландри; 6– турбомеханізми, які запускаються із закритою засувкою; 7– турбомеханізми, запуск яких здійснюється із закритою засувкою; 8 – поршневі компресора і турбокомпресора.

Розглянемо спрощену схему електроприводу, в якій поєднанується приводний двигун і робоча машина, або виконавчий механізм, яка приведена на рис.2.4.

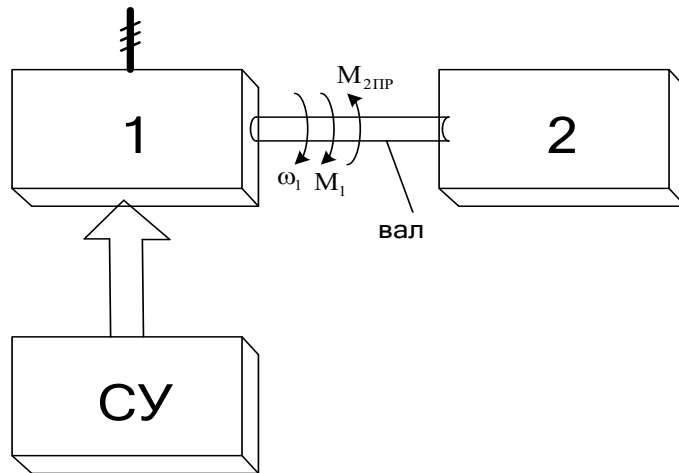


Рисунок 2.4 - Система електричний привод-механізм

Блок 1 описує елементи електричної та електромеханічної складові силового каналу, які визначаються моментом обертання M_1 , який зумовлює рух і кутовою швидкістю валу ω_1 для двигуна - механізму. Технологічний механізм разом із механічною передачею представлені блоком 2 і характеризуються приведеним до валу двигуна моментом опору $M_{2\text{ГР}}$.

Зміна кутової швидкості виникає через надлишковий момент $M_{\text{надл}}$, який є різницею між моментом обертання двигуна і моментом опору механізму $M_{2\text{ГР}}$. Якщо момент обертання двигуна перевищує момент опору (позитивний $M_{\text{надл}}$), то кутова швидкість агрегату зростає, тобто відбувається розгін двигуна до встановлення рівноваги між моментами двигуна і механізму при більшій кутовій швидкості. В разі, якщо момент обертання двигуна стає менше моменту опору ($M_{\text{надл}}$ негативний), то кутова швидкість агрегату зменшується, тобто відбувається відновлення.

Сили та моменти, які діють на механічну складову електроприводу, можна розглядати як дві категорії: сили та моменти механічних втрат ΔM_{Σ} і сили та моменти, що представляють корисні навантаження для виконавчого механізму $M_{\text{пол}\Sigma}$.

$$M_c = \Delta M_{\Sigma} + M_{\text{пол}\Sigma} \quad (2.11)$$

Момент опору при рушанні $M_{\text{с.тр}}$ формується, як і статичекий момент опору, з моменту рушання механічних втрат $\Delta M_{\text{тр}}$ і моменту рушання, що представляє корисні (технологічні) навантаження виконавчого механізму $M_{\text{тр.тех}}$:

$$M_{\text{с.тр}} = \Delta M_{\text{тр}} + M_{\text{тр.тех}} \quad (2.12)$$

Момент рушання механічних втрат $\Delta M_{\text{тр}}$ виникає внаслідок впливу сил тертя у спокої, що виникають в підшипниках, ущільненнях, ходовій частині механізму і передачах. Виділяють два основних типи тертя: внутрішнє (в'язкість) і зовнішнє, яке виникає в області зіткнення тіл, утруднюючи їх взаєморозташування. Обидва типи тертя активно впливають на формування сил і моментів опору руху. У реальних механізмах в одній і тій же кінематичній парі можуть одночасно (або по черзі) виникати ювенальне (сухе), граничне і рідинне тертя.

Розглядаючи процес розгону системи "двигун - механізм" з точки зору впливу сил тертя, можна виділити декілька етапів, на яких переважає той чи інший вид тертя.

На першому етапі, коли електропривід технологічного механізму є нерухомим, тертя спокою між взаємно нерухомими тілами виникає через явище застою. Цей вид тертя відбувається в різних парах, які контактують між собою, таких як вкладиш підшипника і цапфа, ущільнювач і вал, ролики (вали, барабани) і горизонтальні (вертикальні) опори, а також між валами в зубчастих циліндрових і конічних передачах, черв'ячних передачах і т.д. Відомо, що тертя спокою завжди більше, ніж динамічне тертя (кочення або ковзання). У простому випадку для тіла на горизонтальній поверхні сила тертя спокою пропорційна силі, якою тіло натискає на поверхню.

Окрім тертя спокою між кінематичними парами, що труться, існує опір руху, який виникає внаслідок наявності консистентного мастила в

підшипниках. Особливістю мастил є їх застигання при зниженій температурі, що виявляється втратою рухливості через збільшення в'язкості та виділенням кристалів високоплавких речовин. Розрізняють структурне застигання, коли рухливість зменшується через кристалізацію, і в'язкість застигання, коли рухливість мастила зменшується через збільшення його в'язкості. Під час зупинки агрегату мастило стікає в нижню частину підшипника і застигає, зчіплюючись з рухливими і нерухомими вузлами і кінематичними парами, що викликає своєрідне в'язкісне тертя спокою.

Тертя спокою в зоні робочого органу може виникати внаслідок аварійної зупинки механізму або тривалого простою. Найбільш ілюстративними є всі види аварійних зупинок, коли продукт подрібнення або транспортування залишається в зоні робочого органу, такі як ґрунтові насоси, скребкові конвеєри, дробарки, млини і подібне. Ситуацію ускладнює тривалий простій, оскільки частини, які знаходяться у контакті з робочим органом, можуть ущільнюватися, схоплюватися і утворювати цементну кірку, що ускладнює рух.

Усі вказані компоненти моменту рушання на першому етапі пуску, коли привід нерухомий, визначають початкове значення моменту опору при початку руху, яке змінюється протягом другого етапу розгону електроприводу.

Другий етап починається з переходу від нерухомого стану до руху і триває до того часу, поки аномальні складові моменту опору зникають, що обумовлено зміною в'язкості консистентного мастила в підшипниках і зміною стану середовища, яке взаємодіє з робочим органом механізму.

На цьому етапі подолано сили тертя спокою в кінематичних парах та сили тертя спокою, обумовлені застиглим мастилом. З розворотом валу, із руйнуванням кристалічного каркаса і "розм'якшенням" застиглого мастила, такий рід сил опору механізму практично зменшується до нуля.

Отже, момент механічних втрат під час рушення $\Delta M_{\text{тр}}$ може бути визначений як функція кута повороту валу φ . З урахуванням кількості підшипникових вузлів k , момент $\Delta M_{\text{тр}}$ може бути виражений наступним чином:

$$\Delta M_{\text{тр}}(\varphi) = \sum_{i=1}^{i=k} M_{\text{Пі}}(\varphi) + M_{\mu} + M_Q \quad (2.13)$$

де $\sum_{i=1}^{i=k} M_{\text{Пі}}(\varphi)$ - момент рушення в підшипникових вузлах, який залежить від кута повороту валу;

M_{μ} - момент тертя спокою, який залежить від статичного навантаження на підшипник і сили тертя в ньому;

M_Q - моменту рушення, зумовлений наявністю вологи, пилу та бруду в ходовій частині протягом експлуатації механізму на відкритому повітрі.

Корисна (технологічна) складова моменту рушення $M_{\text{тр.тех}}$ з виразу (2.12) залежить від конструкції конкретного механізму та особливостей конкретного технологічного процесу. Незважаючи на свою унікальність, ця складова володіє властивістю, притаманною для цілої категорії механізмів: критичні значення $M_{\text{тр.тех}}$, що становлять загрозу для обладнання під час запуску, найчастіше виникають у зв'язку з нештатними і аварійними ситуаціями. Наприклад, запуск насоса при замуленому робочому колесі або при збільшеній в'язкості перекачуваної рідини, запуски млинів і дробарок під завалом та інші подібні. Аномальний технологічний момент зникає, як правило, не миттєво, а по мірі розвороту валу. Отже, розумно розглядати момент рушення $M_{\text{тр.тех}}$ як функцію кута повороту валу:

$$M_{\text{тр.тех}} = f(\varphi) \quad (2.14)$$

Загалом, залежність моменту рушення також визначається як функція кута повороту валу:

$$M_{\text{тр}}(\varphi) = \Delta M_{\text{тр}}(\varphi) + M_{\text{тр.тех}}(\varphi) \quad (2.15)$$

Якщо перші два етапи розглядати як функцію кута повороту валу, то третій етап відзначається тим, що корисна складова моменту $M_{\text{пол}\Sigma}$ може бути описана стандартними механічними характеристиками. Проведений аналіз показує, що процес розгону при пуску доцільно розглядати у відповідності до етапів формування сил і моментів опору руху:

- перехід з нерухомого стану в стан руху;
- етап перших N обертів валу, що супроводжується рядом специфічних явищ;
- розгін до номінальної частоти обертання.

Під час рушання механізму та подальшого його запуску момент на валу двигуна може бути описаний відповідною залежністю:

$$M_c = \alpha + \beta(\omega) + \gamma(\varphi) \quad (2.16)$$

де α – коефіцієнт, який враховує постійну складову моменту;

$\beta(\omega)$ – функціональна залежність складової моменту від швидкості обертання (тобто $\beta(\omega) = \beta_0(\omega/\omega_n)^2$ - залежність, яка характеризує момент привода);

$\gamma(\varphi)$ – функціональна залежність складової моменту, яка залежить від кута повороту валу технологічного механізму, або $\gamma(\varphi) = \gamma_0 \cdot \sin \varphi$ $\varphi = \int_0^t \omega(t) dt$.

Розглянемо механічні характеристики турбомеханізму під час пуску в двох сценаріях: відсутність продукту транспортування та наявність гідросуміші в зоні робочого колеса. У першому випадку момент рушання визначається наявністю тертя спокою в підшипниках. У другому випадку момент рушання $M_{\text{тр}2}$ зростає через контакт з технологічною сировиною. Окрім постійної складової і моменту рушання в підшипниках $M_{\text{тр}1}$, додається технологічна складова, яка збільшує момент рушання $M_{\text{тр}}$ до значення, при цьому $M_{\text{тр}2} \gg M_{\text{тр}1}$ (рис. 2.5).

Значення суми моментів $M_0 + M_{TP}$ може істотно перевищувати пусковий момент двигуна. Вплив M_{TP} на залежність $M_c(\omega)$ відбувається на початку руху, коли кут повороту валу не перевищує 2π .

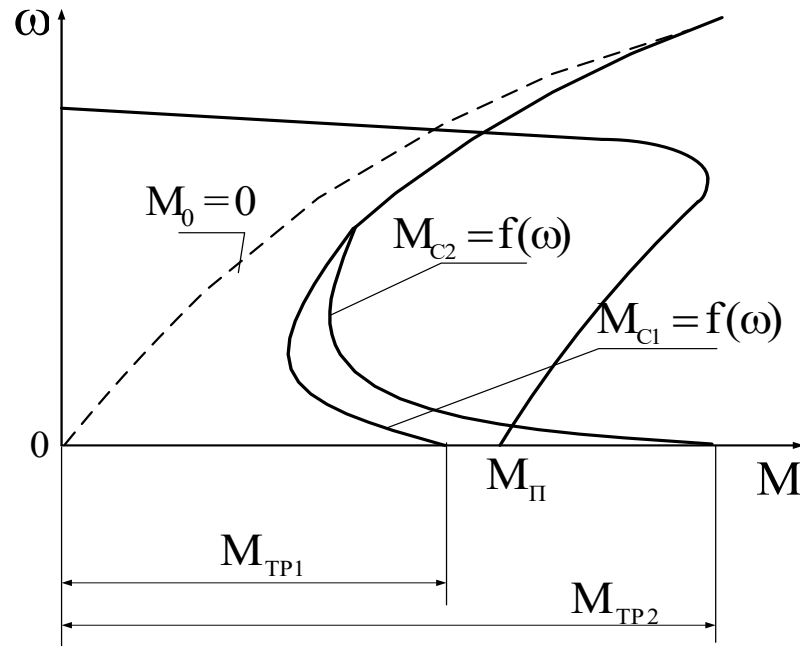


Рисунок 2.5 - Механічні характеристики турбомеханізму з урахуванням моменту тертя

В реальних умовах залежність носить складніший характер:

$$M_c(\omega) = M_0 = k \left(\frac{\omega}{\omega_{ном}} \right)^p + M_T(\varphi), \quad (2.17)$$

де $M_T(\varphi)$ - залежність моменту рушання від кута повороту валу φ , він у свою чергу залежить від часу t , коли агрегат знаходиться в нерухомому стані, від властивостей мастила ν , температури зовнішнього середовища $t^\circ\text{C}$ та ін.: $M_T(\varphi) = F(t, \nu, t^\circ\text{C})$.

Рушання - це процес, під час якого внутрішня структура робочого тіла руйнується під впливом значної зовнішньої сили, що призводить до переходу

від в'язкості практично незруйнованої структури до в'язкості граничного руйнування.

Передпускова підготовка електроприводу технологічних механізмів - це усвідомлений вплив на технологічне середовище з метою зниження сил, що перевищують молекулярну взаємодію і внутрішнє тертя. Головною метою передпускової підготовки є зменшення підвищеного моменту опору, який виникає в області контакту робочого тіла з робочим органом (руйнування каркасної структури технологічної сировини).

Передпускова підготовка дозволяє для будь-якої структурованої середи (структурованої рідини, не міцної міцноподібної структури, міцної структури, яка допускає зрушення на малих ділянках, надміцної структури, яка не допускає течії взагалі) з будь-яким характером надмолекулярних зв'язків (пружно-крихких, пластично-в'язких, в'язко-пружних і т. д.) зменшення напруги зрушення при рушанні.

До заходів, які забезпечують передпускову підготовку, слід включити:

- Зменшення липкості шляхом використання вібраційного впливу перед запуском і під час руху.

- Додавання речовин, що сповільнюють формування структур у технологічному середовищі.

- Модифікація тиску або температури технологічного середовища.

- Використання періодичного коливального або однонаправленого руху робочого органу на низькій швидкості для усунення впливу динамічної складової моменту опору.

2.2. Системи електроприводів для реалізації пускових режимів.

В контексті проблеми пуску основними аспектами є:

1. Подолання статичних сил під час рушання технологічного механізму, що породжують пусковий момент, перевищуючи природну схему включення.

2. Штучне збільшення тривалості пуску для уникнення термічних і механічних перенапружень, що можуть виникнути при форсованому пуску, як у виробничому механізмі, так і в двигуні.

3. Створення фіксованих переміщень ротора для використання активної складової моменту статичного і полегшення процесу запуску.

4. Формування фіксованих переміщень під час рушання.

Стартові або пускові системи в основному відомі як системи, які забезпечують легкий запуск електроприводних систем. Це досягається через контроль моменту при рушанні системи. Зменшення якості системи приводу і підвищення аварійності зазвичай відбувається внаслідок збільшення числа пусків електричних машин. Часті неудачні спроби запуску можуть призводити до теплових і динамічних перевантажень в обмотках електродвигунів, що призводить до їх високої аварійності. При вирішенні цих питань слід враховувати механічні взаємозв'язки між двигуном та виробничим механізмом, а також центрування агрегатів, які можуть викликати порушення та значне збільшення рівня вібрацій, знижуючи тим самим якість конвертації енергії в електричній машині.

Спектр причин, які вимагають використання стартових систем для нерегульованих приводів, обумовлений особливостями експлуатаційних характеристик електромереж та використовуваних двигунів, які приводять технологічні механізми. Основні причини включають:

- При запуску потужних двигунів пускові струми призводять до зниження напруги на шинах підстанцій, що є неприпустимим для інших споживачів умовами експлуатації.

- Динамічні складові моменту при пуску, зумовлені формуванням обертаючогося магнітного поля, викликають динамічні зусилля, які впливають на всі механічні зв'язки, порушуючи центрування агрегату і призводячи до збільшення вібрацій під час роботи.

- Пускові струми, що множинні рази перевищують номінальні, породжують електромагнітні сили в обмотках, що спричиняють старіння і механічне руйнування ізоляційних матеріалів.

- Затяжні пуски двигунів, обумовлені підвищеним моментом опору при рушанні, вимагають декількох повторних пусків, що призводить до негативного впливу струмів, моментів і зусиль на кінематичні ланки, ізоляційні матеріали і електротехнічну сталь.

Впровадження керованого пуску електропривода вирішує дві ключові задачі: ефективність енергоспоживання та збереження працездатності електромеханічного обладнання. Важливо відзначити, що ці два аспекти взаємопов'язані, і відділення їх неправильно. Збереження працездатності електрообладнання в першу чергу є засобом економії енергетичних ресурсів. Підвищення ефективності сприяє збереженню матеріальних ресурсів, таких як ізоляція, мідь та конструкційні матеріали, які використовуються при ремонті електричних машин.

Для реалізації систем керованого пуску рекомендується використовувати наявні технічні засоби, зокрема, широко застосовувані тиристорні пристрої (ТРН), перетворювачі частоти (ПЧ), а також тиристорні пристрої з квазічастотним методом управління (рис.2.6).

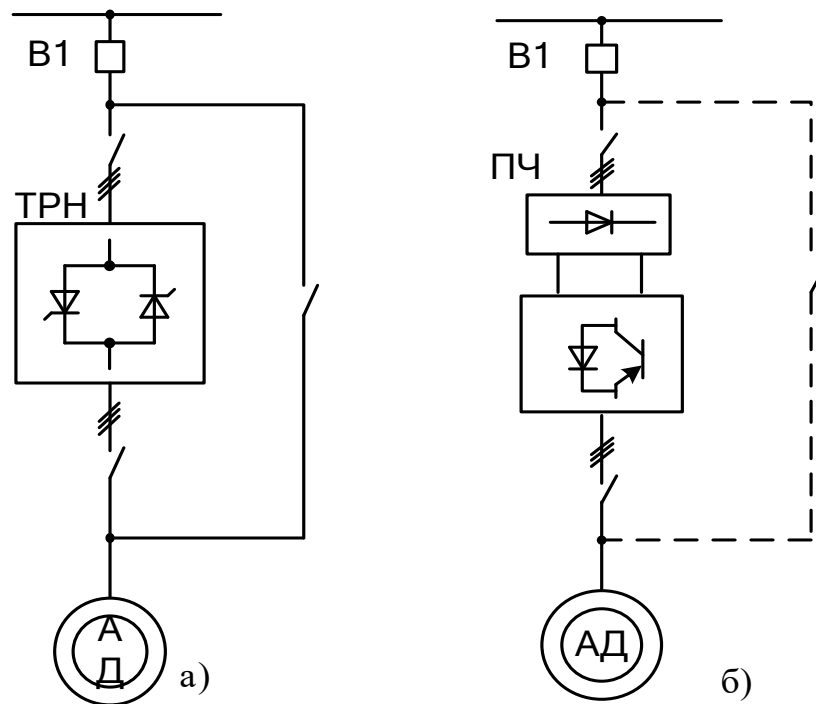


Рисунок 2.6 - Системи керованого рушення а – на основі ТРН, б- на основі ПЧ

Система тиристорних пристроїв (ТРН) для асинхронного двигуна з можливістю квазічастотного управління (КЧУ) поєднує переваги параметричного і частотного регулювання. Вихідна частота перетворювача змінюється відповідно до модулюючих сигналів, а також можливе параметричне управління асинхронним двигуном за допомогою широтно-імпульсного регулювання напруги статора, здійснюване за допомогою повністю керованих ключових елементів, при незмінній структурі силового кола.

Використання вентильних перетворювачів управління дозволяє регулювати роботу двигуна шляхом зміни тривалості провідного і непровідного станів напівпровідникових елементів силового кола. У схемах перетворювачів для параметричного управління статорними та роторними колами асинхронного двигуна використовуються різні напівпровідникові елементи, які є повністю або частково керованими пристроями.

У системі з ТРН-АД при квазічастотному управлінні асинхронний двигун живиться від ТРН, а завдання струму формуються за допомогою трифазного керованого перетворювача. Амплітуда і частота струму статора двигуна формуються на основі сигналів управління I_s . Відкриття тиристора передбачає узгодженість напруги мережі з відповідною модулюючою функцією.

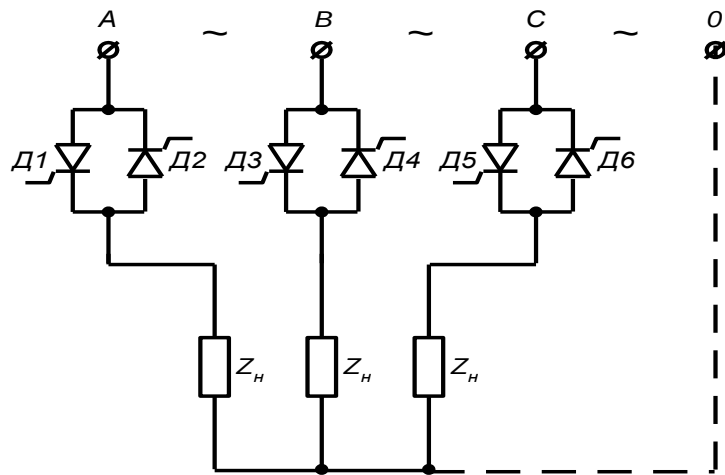


Рисунок 2.7 - Схема ТРН з живленням від трифазної мережі

Застосування систем ТРН-АД з можливістю квазічастотного управління є цілеспрямованим при формуванні визначених характеристик запуску в умовах важкого старту асинхронних двигунів. Проте для реалізації цих можливостей необхідно автоматичне регулювання кута α при зміні частоти ω_M та моменту опору M_c за допомогою системи автоматичного управління (САУ).

Незважаючи на перспективність систем ТРН-АД із квазічастотним управлінням, їх широке впровадження вимагає усунення або, принаймні, обмеження наявних негативних особливостей таких перетворювачів:

- значних пульсацій моменту $M(t)$;
- нерівномірності кутової швидкості $\omega(t)$;
- негативного впливу на електричну мережу та, відповідно, на сусідніх споживачів;

- підвищеного рівня вібрацій, спричинених змінними моментами;
- підвищеного рівня нагріву від вищих гармонік;
- обмежених можливостей формування необхідних характеристик без негативних ефектів.

Системи ТРН-АД широко використовуються в промисловості для реалізації керованих режимів запуску та гальмування з обмеженням рівня струмів і моментів, що обумовлено технологічними вимогами. З впровадженням систем плавного пуску можливе зниження втрат енергії при запуску, вирішуючи в той же час завдання з енергозбереження.

При використанні системи ТПН-АД для регулювання швидкості короткозамкнутих асинхронних двигунів виникає погіршення енергетичних показників і збільшення втрат, виникає проблема, оскільки всі ці втрати концентруються в самому двигуні. Для забезпечення нормального теплового режиму регульованого двигуна необхідно підвищувати його встановлену потужність і збільшувати капітальні витрати. Це робить важкою рекомендацію використовувати цей метод управління для регулювання швидкості двигуна в умовах тривалого режиму роботи та постійного статичного навантаження, яке не залежить від швидкості, не згадуючи вже про можливості енергозбереження при регулюванні швидкості.

Перетворювачі частоти, призначені для частотно-регульованих асинхронних електроприводів, розподіляються за типом зв'язку з електромережею на безпосередні перетворювачі частоти і двохланкові перетворювачі частоти з проміжною ланкою постійного або змінного струму [12].

У сучасних частотно-регульованих асинхронних електроприводах широко використовуються двохланкові перетворювачі частоти з проміжною ланкою постійного струму. Основні складові таких перетворювачів включають в себе випрямляч, фільтр проміжної ланки постійного струму та автономний інвертор, які передають лише активну потужність та споживають реактивну.

Залежно від типу інвертора, який використовує комутацію напівпровідникових силових ключів, двохланкові перетворювачі частоти поділяються на дві категорії: з автономним інвертором напруги (АІН) і з автономним інвертором струму (АІТ).

При використанні конкретних алгоритмів комутації силових ключів і з урахуванням характеристик джерела живлення інвертора двохланкові перетворювачі частоти з АІН забезпечують встановлену форму вихідної напруги, тоді як перетворювачі з АІТ гарантують встановлену форму вихідного струму, незалежно від параметрів навантаження. Крім того, існує можливість роздільного регулювання амплітуди і частоти основної гармоніки вихідної напруги або струму інвертора.

Автономний інвертор струму (АІТ) часто використовується у вигляді мостового інвертора тиристора з відсікаючими діодами, і його схема представлена на рисунку 2.8. Сучасні АІТ побудовані на базі повністю керованих напівпровідникових пристроїв - тиристорів GTO або біполярних транзисторів, що замикаються, з ізольованим затвором IGBT. Трифазна мостова схема АІТ зображена на рисунку 2.8(б).

Основні характеристики цієї схеми включають наявність ємнісного вхідного фільтру C_d і включених паралельно-зустрічних керованих ключів $V_2...V_6$ та діодів зворотного струму $D_2...D_6$. Додаткові алгоритми широтно-імпульсного модулювання (ШІМ) в АІТ, крім основного регулювання, спрямовані на покращення гармонійного складу вихідної напруги, що забезпечує високий рівень синусоїдальності струму асинхронного двигуна.

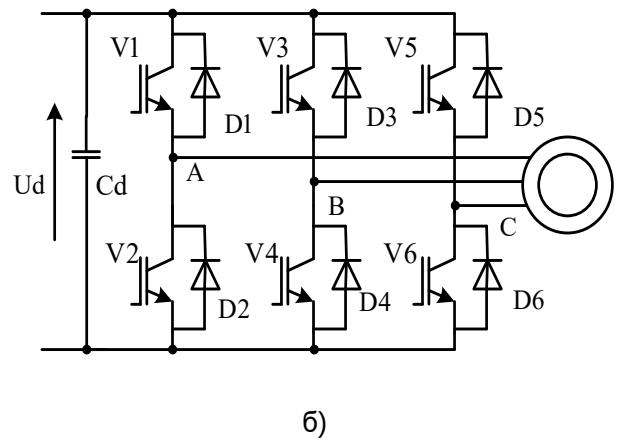
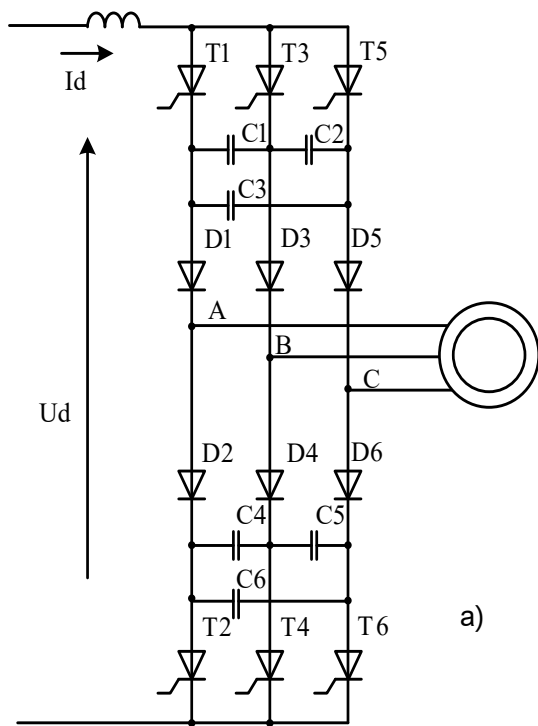


Рисунок 2.8 - Автономні інвертори:

а) струму і б) напруги

Популярним у регульованих асинхронних електроприводах є вид двохланочних перетворювачів частоти, а саме перетворювачі з автономним інвертором напруги. Склад такого перетворювача включає випрямляч, фільтр у ланці постійного струму і автономний інвертор, який виготовлений на повністю керованих напівпровідникових ключах. Автономний інвертор працює в режимі широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) вихідної напруги.

Півпровідникові перетворювачі частоти стали стандартними компонентами промислового устаткування в галузі електроприводу. Вони широко застосовуються у сучасних асинхронних електроприводах, для яких встановлені високі вимоги, такі як:

- Безперервне налаштування швидкості двигуна в широкому діапазоні відповідно до вимог технологічного процесу.
- Висока точність управління швидкістю або позиціонуванням двигуна.

- Оптимізація навантаження електроприводу, ривків та прискорень під час роботи.
- Висока продуктивність з великою кількістю включень в годину.
- Поступове налаштування технологічних параметрів за допомогою електроприводу та інші.

Однією з недоліків системи керованого рушання на базі перетворювача частоти з квазічастотним управлінням є обмеженість можливостей збільшення моменту лише при приголосному чергуванні фаз напруги мережі та управляючої напруги, в той час як у зустрічному напрямі чергування фаз призводить до зменшення моменту [11]. Використання таких систем зазвичай обґрунтоване для електроприводів, які не потребують регулювання швидкості, але вимагають поліпшення пускових режимів. Використання перетворювачів частоти має перевагу, оскільки можливе збільшення моменту як при приголосному, так і при зустрічному чергуванні фаз напруги мережі та управляючої напруги. Для електроприводів технологічних механізмів, які вимагають регулювання швидкості і покращення пускових режимів, застосування системи керованого рушання на основі перетворювача частоти є доцільним. Частотно-регульовані електроприводи механізмів з моментом опору, що перевищує пусковий момент, можуть бути додатково оснащені програмованим пристроєм, який дозволяє формувати підвищений пусковий момент та використовувати алгоритми передстартової підготовки. На рис. 2.9 представлені графіки залежностей швидкості обертання від моменту при приголосному (а) та зустрічному (б) чергуванні фаз, (в) – залежності швидкості обертання від моменту при частотному регулюванні.

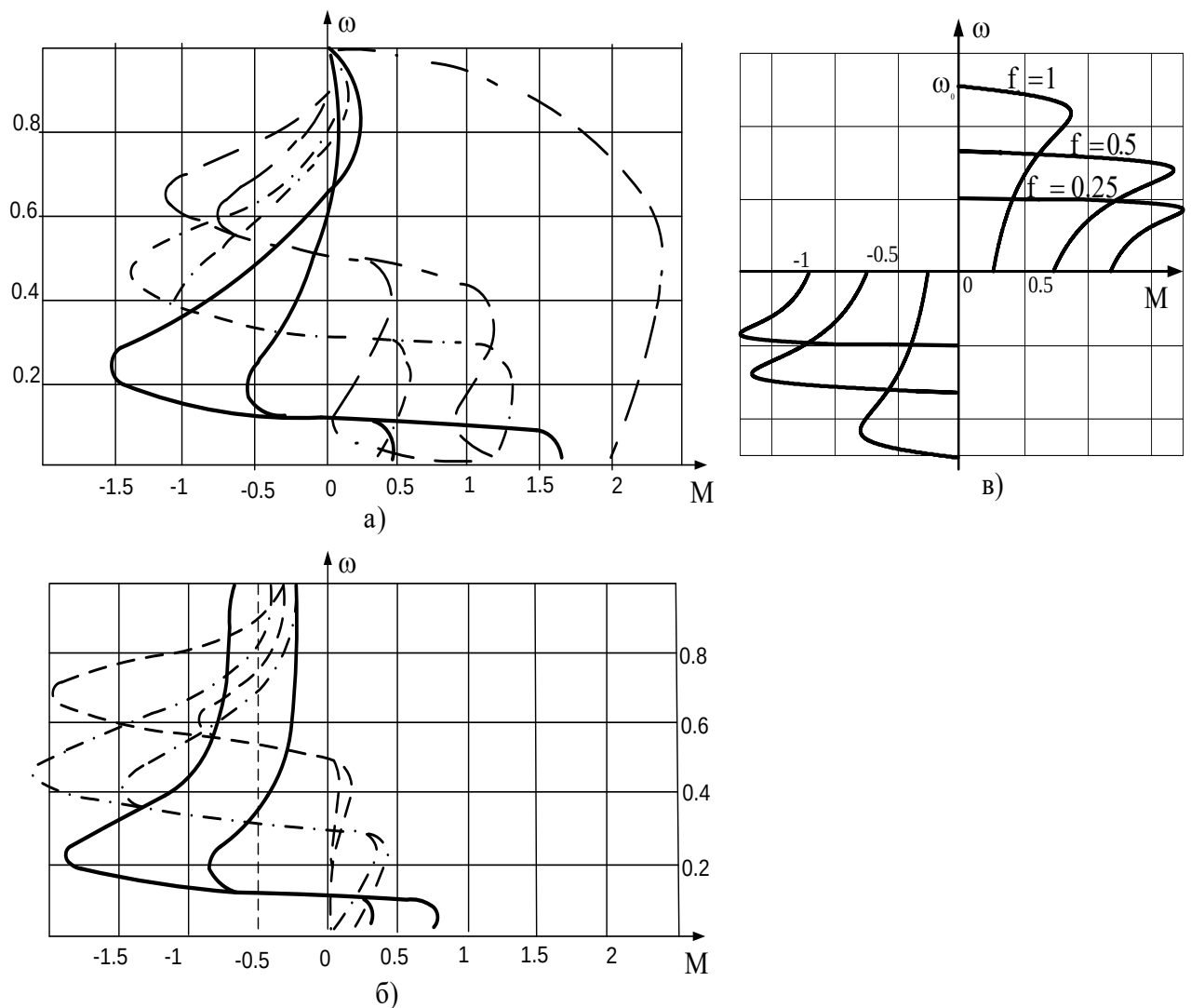


Рисунок 2.9 - Графіки залежності $\omega(M)$:

а) під час взаємодії фаз у квазічастотному управлінні; б) при протилежному чергуванні фаз у квазічастотному управлінні; в) при частотному регулюванні.

Постановка завдання для дослідження системи керованого рушання

Серйозні проблеми, пов'язані з важкими запусками технологічних механізмів, призводять до інтенсивного зносу обладнання. Огляд таких механізмів підкреслює актуальність розробки та дослідження систем, спрямованих на полегшення запуску.

Використання регульованих електроприводів здатні задовольнити вимоги сучасних технологічних установок та сприяти оптимізації витрат

електроенергії. Для технологічних механізмів, які не потребують регулювання швидкості, але вимагають покращених пускових характеристик, застосування систем квазічастотного управління на основі ТРН-АД є найбільш простим та економічним методом формування підвищеного пускового моменту. Для технологічних механізмів, які потребують регулювання швидкості та поліпшених пускових характеристик, ефективнішим є використання систем керованого рушання на базі перетворювача частоти. Частотнорегульовані електроприводи механізмів з опором моменту, що перевищує пусковий момент, можуть бути додатково обладнані програмованим пристроєм для формування підвищеного пускового моменту та алгоритмами передстартової підготовки.

3 РОЗРОБКА АЛГОРИТМУ КЕРУВАННЯ ПУСКУ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ НАСОСНИХ УСТАНОВОК

3.1. Розробка структури і алгоритму системи керованого рушання.

Організація підготовки до старту завдяки принципам управління частотою дозволяє не лише збільшити початковий момент асинхронного двигуна, але й гарантує необхідний рівень інтенсивності його зростання. Наприклад, поступове збільшення стартового моменту протягом періоду рушання може бути досягнуте за допомогою зміни відношення амплітуди і частоти подачі напруги: $k_U = (k_f)^{1/\beta}$, де $k_f = f_1 / f_{1ном}$ - коефіцієнт, що враховує зменшення частоти f_1 основної гармоніки напруги в порівнянні з номінальною частотою мережі $f_{1ном}$; $k_U = U_1 / U_{1ном}$ - напруга на статорі U_1 , виражена у відсотках до номінальної $U_{1ном}$. Параметр β визначає величину моменту асинхронного двигуна і може змінюватися в межах $\beta = 1 \div k$ за законом $\beta_n = \beta + 0,1 \cdot n$, де n - номер спроби рушання, k - кількість спроб рушання. Таким чином, стартовий момент збільшується на величину ΔM_{Π} : $M_{\Pi i} = M_{\Pi i-1} + \Delta M_{\Pi}$. Приклади використання цього методу передпускової підготовки наведені на рис. 3.1.

Процес керованого запуску асинхронного двигуна розпочинається з визначення можливості його пуску, що визначається перевіркою умови $M_{\Pi i} > M_{Pi}$, де $M_{\Pi i}$ - значення початкового моменту двигуна, M_{Pi} - відповідне значення моменту опору механізму на i -й спробі запуску $i = 0, 1, \dots$.

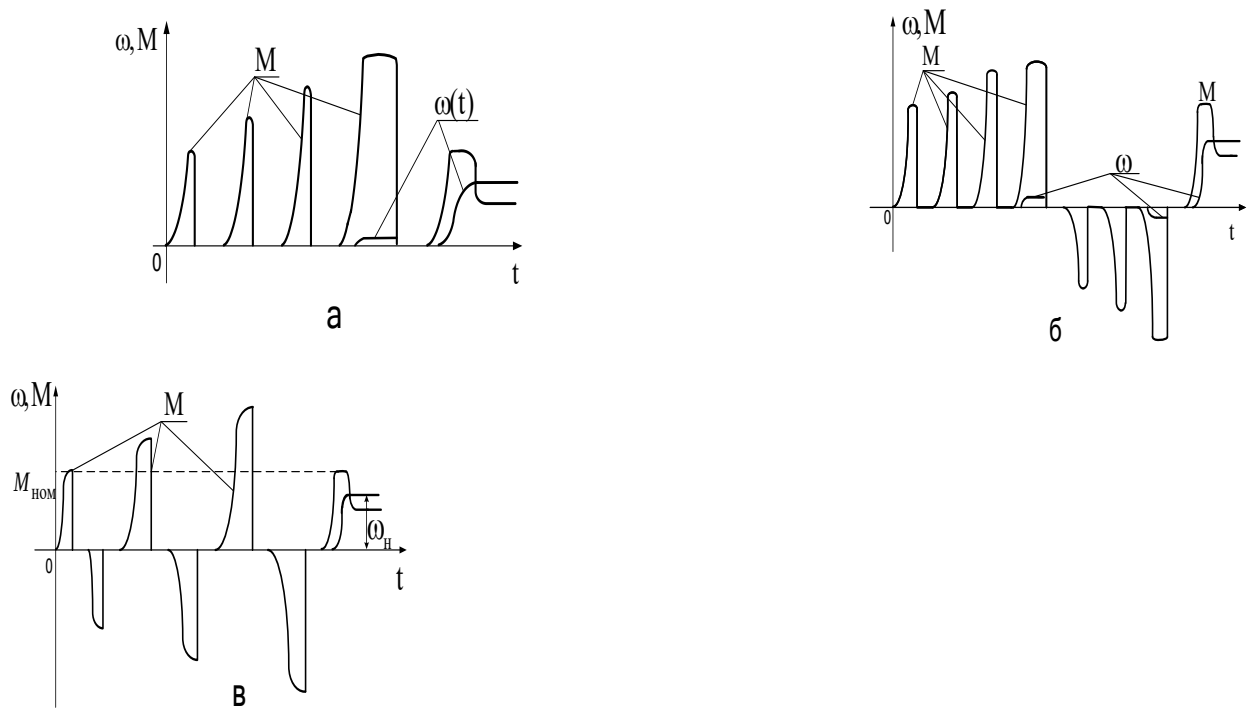


Рисунок 3.1 - Способи ПП для ПЧ-АД при однонаправленому (а), коливальному (б, в) рухах ротора.

Для досягнення цієї мети протягом періоду $t = t_T$ (рис. 3.2) частотний перетворювач поступово збільшує початковий момент АД до значення $M_{Pi} = M_{Pi0}$ одного зі стандартних законів частотного управління. Наприклад, за умови пропорційного збільшення частоти і напруги живлення до номінального значення $M_{Pi,ном}$, початковий момент зростає до величини , що відповідає каталожним параметрам двигуна $M_{Pi0} = M_{Pi,ном} : .$

Протягом періоду $t = t_B$ програмний пристрій визначає наявність обертання ротора асинхронного двигуна за допомогою датчика кута повороту валу або датчика швидкості. У випадку відсутності таких датчиків програма визначає рух, використовуючи відомі методи на основі миттєвих значень струму і напруги в фазах статора.

Якщо протягом часу $t = t_B$ програмний пристрій встановлює, що ковзання асинхронного двигуна $s < 1$, це свідчить про те, що пусковий момент двигуна перевищує значення моменту опору механізму $M_{Pi} > M_{Pi}$,

що, в свою чергу, означає продовження процесу пуску. Протягом періоду $t = t_p$ двигун прискорюється до заданої номінальної швидкості $\omega = \omega_n$ (або $s = s_n$) і завершується процес пуску.

У випадку, якщо за час $t = t_B$ програмний пристрій виявляє, що ковзання асинхронного двигуна $s = 1$, або частота обертання ротора $\omega = 0$, це свідчить про те, що пусковий момент двигуна не перевищує значення моменту опору технологічного механізму $M_{Pi} \leq M_{Pi}$, що, в свою чергу, означає, що запуск асинхронного двигуна неможливий.

При неможливості пуску, після періоду паузи $t = t_{\Pi}$, розпочинається перший цикл передстартової підготовки з порядковим номером, який змінюється відповідно закону $n = 0, 1, \dots$.

Алгоритм (рис.3.3) регулювання моменту двигуна в межах n -го циклу передстартової підготовки складається з прямих N_i зворотних N' (з урахуванням напрямку обертання) імпульсів моменту активного двигуна і включає в себе наступну послідовність дій.

Визначається порядковий номер i -ої спроби рушання за формулою $i = i + 1$ і фіксується поточна кількість спроб рушання в межах поточного циклу передстартової підготовки за формулою $N = i$.

Протягом часу $t = t_T$ момент асинхронного двигуна збільшується на значення ΔM . Після цього, протягом часу $t = t_B$, перевіряється умова рушання $M_{Pi} > M_{Pi}$. Якщо умова не виконується, відбувається подальше збільшення моменту відповідно до рівняння $M_{Pi} = M_{Pi0} + i \cdot \Delta M$.

Якщо умова $M_{Pi} > M_{Pi}$ виконується і починається процес рушання, програмний пристрій встановлює швидкість обертання валу $\omega_{\Pi\Pi} \leq 0,1\omega_n$, а також параметри руху, які залежать від номера поточного циклу: кут повороту валу ϕ_{Pn} , час руху t_{Pn} . Після досягнення встановлених значень

$t = t_{pn}, (\varphi = \varphi_{pn})$ для поточних параметрів руху, здійснюється реверс двигуна і алгоритм збільшення моменту повторюється в зворотному напрямі.

При зміні напрямку моменту активного двигуна визначається порядковий номер j -ої спроби рушання в зворотному напрямі за формулою $j = j + 1$ і фіксується поточна кількість спроб за формулою $N' = j$.

Протягом часу $t = t_T$ момент асинхронного двигуна в зворотному напрямі збільшується на значення ΔM . Після цього, протягом часу, перевіряється умова рушання $M'_{pj} > M'_{pj}$. Ітераційне збільшення "зворотного" пускового моменту M'_{pj} за формулою $M'_{pj} = M'_{p0} + j \cdot \Delta M$ триває до настання рушання.

Кількість ітераційних зростань моменту N і N' заздалегідь невідома, тому що залежить від значення ΔM і властивостей технологічної середовища.

Після досягнення моменту асинхронного двигуна значення $M'_{pj} > M'_{pj}$ початку обертання валу, програмний пристрій встановлює швидкість ω'_{III} ($\omega'_{III} = |\omega_{III}|$), параметри зворотного руху φ'_{pn}, t'_{pn} , і перевіряє умову відповідності поточних параметрів руху заданим $t' = t'_{pn}, (\varphi' = \varphi'_{pn})$. Таким чином, завершується n -й цикл передстартової підготовки електроприводу.

Параметри t_T, t_P обирають таким чином, щоб пульсації моменту АД не співпадали з власними частотами коливань електромеханічної системи та забезпечували максимально ефективне руйнування структури технологічної середовища.

Імпульсний та знакозмінний характер моменту дає можливість поступово руйнувати структуру, що створюється технологічною сировиною. Тому, з кожним слідуючим циклом ПП, число імпульсів N і N' зменшується, а параметри руху зростають на значення $\Delta\varphi$ або Δt , які обчислюються за формулами для кожного окремого циклу: $\varphi_{pn} = \varphi'_{pn} = \varphi_{p0} + n \cdot \Delta\varphi$, $t_{pn} = t'_{pn} = t_{p0} + n \cdot \Delta t$, де φ_{p0}, t_{p0} – величина кута

повороту валу та час прямого і зворотного обертання у першому циклі передстартової підготовки.

Після кожного циклу передстартової підготовки відбувається перевірка умови $N = N' = 1$. Якщо ця умова не виконується, відбувається перехід до наступного циклу передстартової підготовки, порядковий номер якого визначається за виразом $n = n + 1$. У випадку, коли умова досягнута, передстартова підготовка завершується, і система переходить до режиму стандартного частотного пуску.

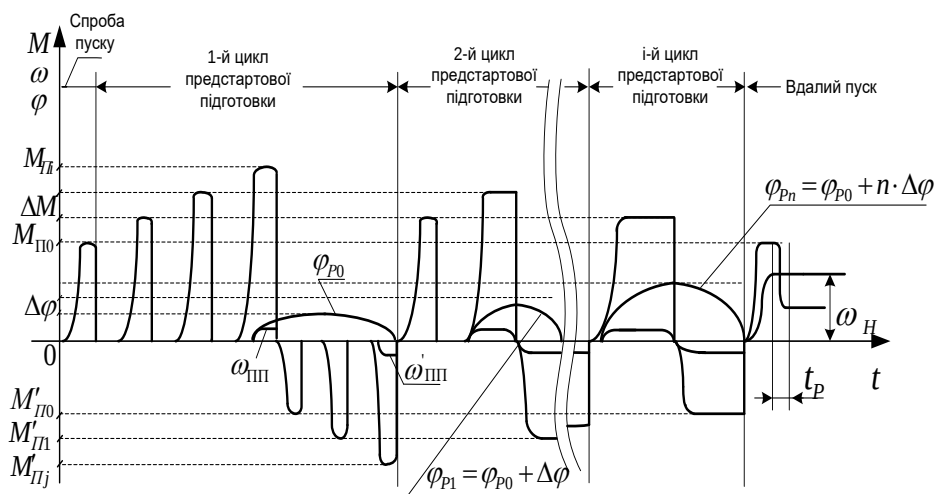
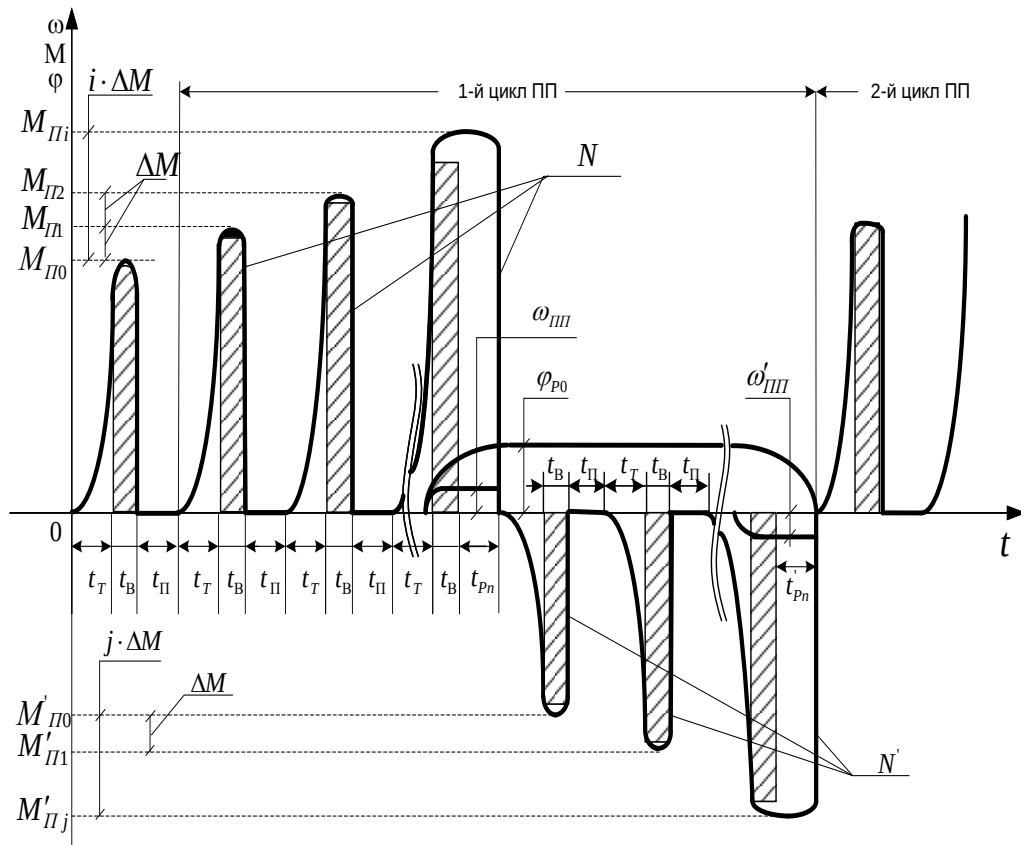


Рисунок 3.2 - Діаграма частотного пуску асинхронного двигуна.

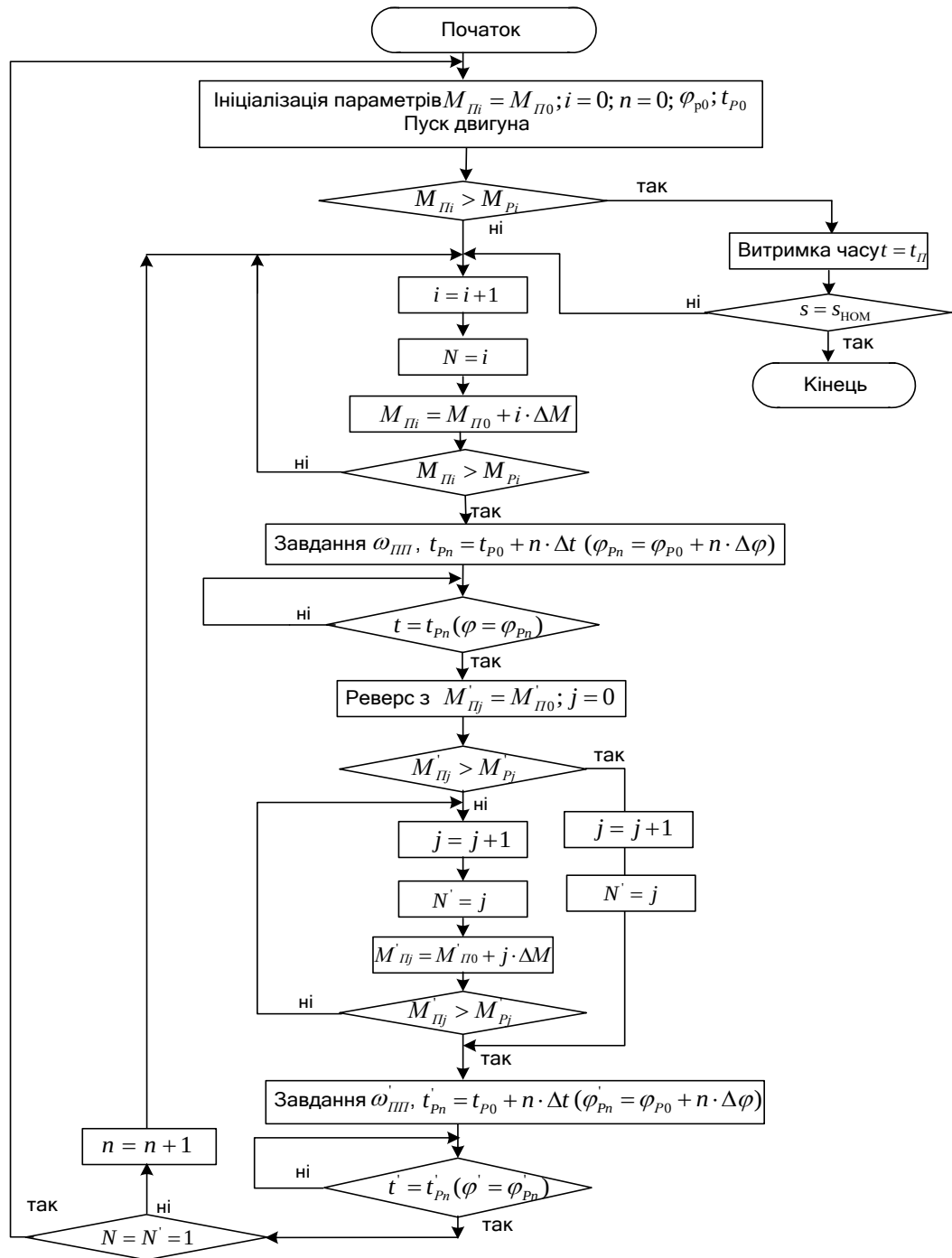


Рис 3.3 Алгоритм частотного пуску асинхронного двигуна з передстартовими коливаннями ротора

Пристрій, що втілює метод керованого рушення асинхронного двигуна (рис. 3.4), включає стандартний перетворювач частоти. Під час запуску цей пристрій забезпечує постійну перевантажувальну здатність асинхронного двигуна шляхом регулювання напруги в залежності від частоти та навантаження.

Пристрій працює в двох режимах: режимі запуску і режимі передстартової підготовки (ПП). У режимі запуску пристрій прискорює обертання двигуна до швидкості $\omega = \omega_n$, використовуючи стандартний закон частотного управління. Наприклад, це може бути закон, який забезпечує рівність коефіцієнтів $k_f = k_U$, де $k_f = f_1 / f_{1ном}$ - коефіцієнт, що враховує зниження частоти f_1 основної гармоніки напруги статора асинхронного двигуна в порівнянні з номінальною частотою мережі $f_{1ном}$; $k_U = U_1 / U_{1ном}$ - фазна напруга статора U_1 , виражена в долях відносно номінальної фазної напруги мережі $U_{1ном}$. Коли ефективне значення і частота напруги досягають свого номінального значення, тобто $k_U = k_f = 1$ пристрій перевіряє наявність руху і, у разі необхідності, автоматично переходить до режиму передстартової підготовки.

У режимі передстартової підготовки (ПП), пристрій забезпечує поступове підвищення пускового моменту двигуна шляхом збільшення відносного значення напруги живлення k_U при фіксованому відносному значенні частоти ($k_f = \text{const}$) $\approx 0,1 f_{1ном}$. Це відбувається відповідно до закону $k_U = (k_f)^{1/\beta}$, де β - коефіцієнт, що змінюється в залежності від напрямку обертання і номера спроби рушення.

У випадку прямого обертання β визначення величини здійснюється за допомогою виразу $\beta_i = \beta_0 + \gamma \cdot i$, де γ - коефіцієнт, що визначає ступінь зростання моменту ΔM . Коефіцієнти γ , β_0 , і β'_0 вибираються враховуючи властивості реології середовища. У випадку, якщо $M'_{p0} < M'_{п0}$, коефіцієнт β'_0

обирається менше одиниці $\beta'_0 < 1$, що дозволяє поступово збільшувати пусковий момент асинхронного двигуна.

Блок-схема пристрою, представлена на рис.3.4, включає в себе асинхронний двигун 2, який з'єднаний з мережею живлення через силовий модуль 1 перетворювача частоти. Цей модуль включає некерований випрямляч змінної напруги 1-1, блок ємкісного фільтру 1-2 та автономне інвертування напруги 1-3. Кут повороту валу двигуна контролюється датчиком кута повороту валу двигуна 3. Блок датчиків 4 складається з датчиків струму 4-1 та напруги 4-2, які вимірюють струм і напругу на обмотках статора двигуна. Система управління 5, яка входить до складу перетворювача частоти, включає генератор 5-1 сигналів широтно-імпульсної модуляції (ШІМ). Ці сигнали подаються до транзисторів інвертування напруги 1-3 через формувач імпульсів 5-2. Блоки з першого по п'ятий є стандартними.

Програмний пристрій 6 є комплексною мікропроцесорною системою управління. Вона складається з програмної частини, де реалізований алгоритм запуску двигуна, і апаратної частини, яка включає аналого-цифровий перетворювач 6-1, блок визначення ковзання 6-2, блок вибору режиму 6-3, блок задання законів рушання 6-4 та перемикач сигналів управління 6-5.

Процес роботи пристрою ініціюється тим, що блок 5-1 приймає зовнішній сигнал завдання U_{zi} і генерує імпульси управління для перетворювача в режимі запуску. Блок визначення ковзання 6-2 отримує сигнали від датчиків 3 і 4 за допомогою аналого-цифрового перетворювача 6-1. З виходу блоку 6-2 сигнал подається на блок вибору режиму роботи 6-3, який обирає один з можливих режимів роботи, впливаючи на блок 6-5. Блок задання законів рушання 6-4 приймає імпульс управління від блоку 6-3 та генерує відповідні ШІМ-сигнали. Ці сигнали потрапляють на формувач імпульсів 5-2 через перемикач сигналів управління 6-5. Функція блоку 6-5

включає в себе комутацію імпульсів управління, які надходять від силових транзисторів інвертування напруги, з типової системи управління 5-1 або блоку завдання законів рухання 6-3.

Крім переключення сигналів управління, які подаються до силового модуля, блок 6-5 генерує сигнали захисту та аварійного відключення у випадку виникнення аварійних ситуацій.

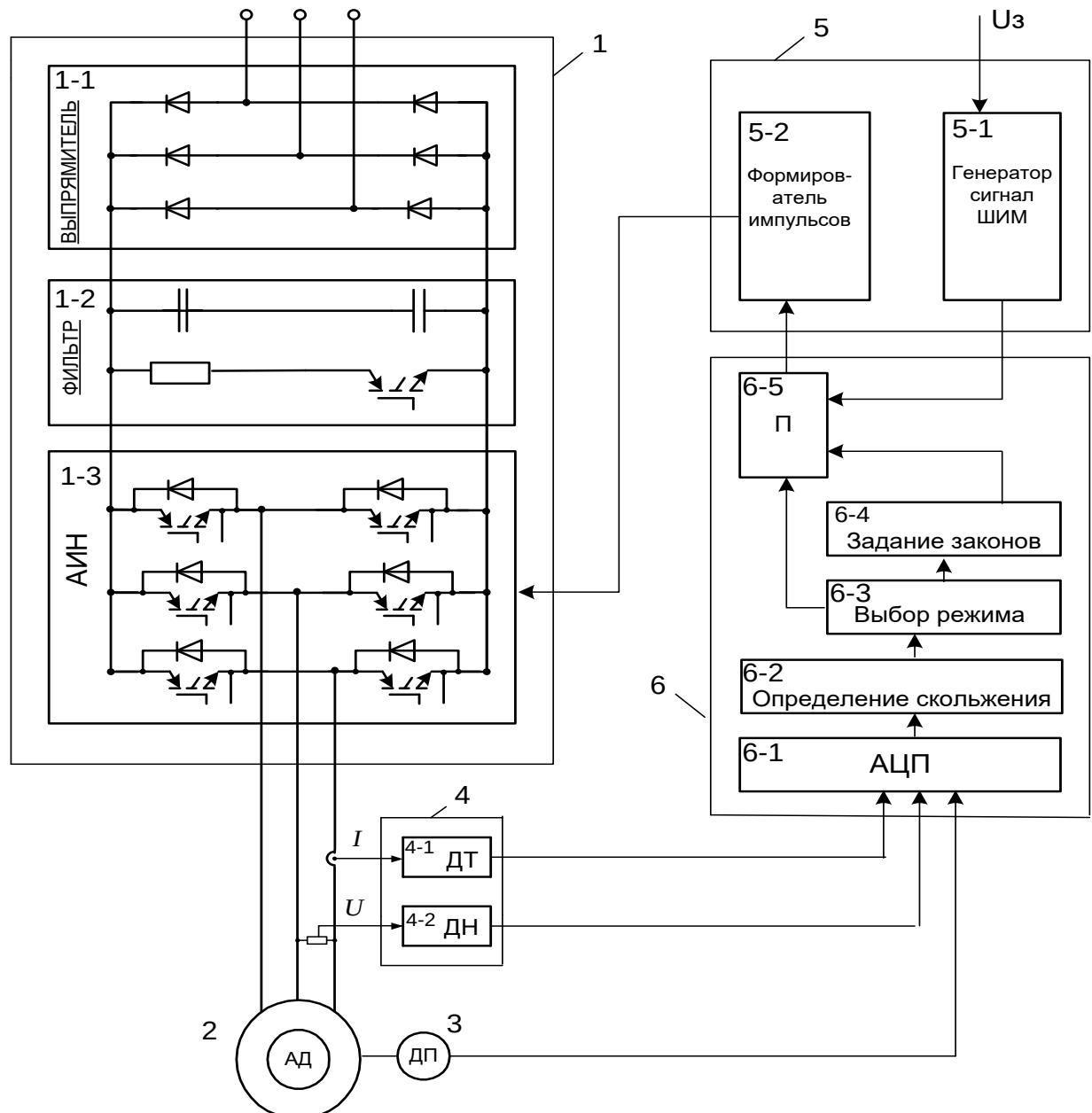


Рисунок 3.4 - Блок-схема пристрою для впровадження способу частотного пуску асинхронного двигуна.

3.2. Особливості конструкції силового модуля.

Розробка компонентів силового модуля була націлена на досягнення максимальної ефективності у перетворенні параметрів електроенергії. Застосування випрямляча з примусовим формуванням вхідних струмів, які співпадають по фазі з живлячою напругою, реалізовано за допомогою високочастотної імпульсної модуляції через чергування етапів накопичення електромагнітної енергії в магнітному полі дроселів та її віддачі у вихідні накопичувальні конденсатори, а відповідно — у навантаження. Такий підхід до створення системи управління забезпечує:

- низьку середню частоту комутацій перемикаючих елементів, оскільки в будь-який момент часу працюють лише два з них;

- це призводить до полегшеного режиму роботи перемикаючих елементів, оскільки їхній максимальний струм не перевищує 0,866 амплітудного значення фазного струму.

- використання лінійної напруги для формування фазних струмів сприяє зниженню спотворень на початкових некерованих ділянках кривих формованих струмів.

Для зменшення впливу періодичних пробоїв у ланцюзі навантаження на характер енергоспоживання, в ланцюгу зворотного зв'язку по вихідній напрузі використовується інтегруюча частина з регульованою постійною часу. Це забезпечує безперервність енергоспоживання при переривчастому (до 1 мс) характері струму навантаження. В джерелі живлення передбачена можливість включення і відключення окремих модулів в працюючій установці за допомогою ланцюгів плавного пуску і автоматичного зниження струму при виключенні (безструмове виключення). Особливість використовуваного алгоритму формування вхідного струму полягає в тому, що чим вище значення формованого струму, тим нижча частота комутації відповідних перемикаючих елементів.

При найвищих рівнях струмів частота комутацій знижується принаймні у три рази порівняно з низькими значеннями, що дозволяє подальше

полегшення роботи перемикаючих елементів. У випрямлячі передбачено автоматичний захист від обриву фази та внутрішнього перегріву, з відновленням нормальної роботи після усунення причин виключення захисту. Основним вузлом силового модуля, що забезпечує відповідність силового модуля технологічному навантаженню, є вихідний інвертор. У використаному інверторі вирішено технічну проблему між високою якістю електроенергії та мінімальним накопиченням енергії у вихідних колах за рахунок застосування силової частини за трифазною схемою на основі мостових інверторів з дроселями обмеження струму в колі постійного струму. Це технічне рішення забезпечує миттєве обмеження струму при перевантаженнях. При вимкненні інвертора енергія, накопичена в дроселях, повертається в джерело живлення, минувши первинне коло трансформатора, що дозволяє швидко відключити навантаження.

Інвертор реалізує наступні функції:

- Стабілізація вихідної напруги проводиться за двоконтурною схемою з зворотнім зв'язком за сумарним струмом фаз інвертора (I_n) і за вихідною напругою ($U_{вих}$).
- Максимальний струмовий захист обмежує струми через перемикаючі елементи інвертора на допустимому рівні.
- Динамічне обмеження вихідного струму навантаження на рівні, який існував до моменту виникнення короткого замикання, запобігає можливим коливальним перехідним процесам при аварійному припиненні пробою у вихідних колах.
- Режим автоматичного повторного пуску дозволяє припинити струм на виході інвертора на певний час, достатній для розриву дугового розряду, якщо тривалість короткого замикання перевищує встановлене значення.

Основову силового модуля складають перемикаючі елементи, які визначають його коефіцієнт корисної дії і надійність. У цьому модулі використовуються транзисторні модулі IGBT типу CM900DU-24NF нового

покоління зі структурою CSTBT (Carrier Stored Trench Bipolar Transistor). Вони виготовлені за сучасною технологією і характеризуються низькими втратами потужності. Для підвищення надійності і ефективності ці перемикаючі елементи оснащені LC-колами для формування безпечних траєкторій перемикавання. Це значно знижує пікові значення потужності в кристалах силових транзисторів і, відповідно, динамічні втрати. Два обертові інвертори передають надлишкову енергію в навантаження, що накопичується в реактивних елементах цих ланцюгів, призводячи до збільшення ККД приблизно на 5% при спільній потужності пристрою 2 кВт.

Для забезпечення комфортних умов роботи тепловіддаючих елементів і підвищення надійності застосована внутрішня система примусового горизонтального повітряного охолодження.

Силовий модуль спроектований так, щоб уникнути взаємовпливу теплового режиму окремих компонентів під час роботи в межах модуля та при їх об'єднанні в установку. Кожен вузол представляє собою окремий блок з конструктивно закінченими частинами, розташованими на окремих шасі. Це дозволяє швидко здійснювати збірку та налаштування вузлів на різних робочих місцях, а також ефективно проводити демонтаж, пошук несправностей і ремонт випущених з ладу вузлів при їх вилученні з експлуатації.

Можливість швидкого демонтажу і заміни електронних вузлів, які вийшли з ладу, як під час періодів між технологічними процесами, так і під час самого технологічного процесу без відключення установки, сприяє підвищенню загальної надійності установки.

3.3. Вибір елементної бази силового та інформаційного каналу.

3.3.1. Транзистори.

У схемі використовуються IGBT-транзистори CM900DU-24NF. В таблиці 3.1 наведені його максимально припустимі параметри.

Таблиця 3.1 Максимально припустимі параметри IRG4PH40UD

Позн.	Параметр	Максимум	Од. вим.
V_{CES}	напруга пробою системи «колектор-емітер»	1200	В
V_{GES}	напруга системи «база-емітер»	± 20	В
I_C @ $T_C = 96^\circ\text{C}$	Тривалий струм колектора з температурою корпусу 25°C	900	А
I_{CM}	Імпульсний струм колектора	1800	А
I_E	Струм емітера	900	А
P_C @ $T_C = 25^\circ\text{C}$	Максимальна розсіювальна потужність при температурі 25°C	2550	Вт
T_J	Робоча температура кристала	від -40 до +150	$^\circ\text{C}$

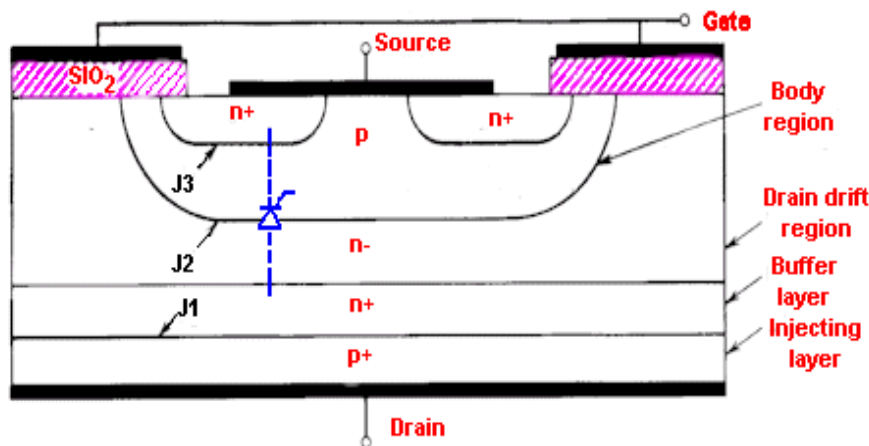


Рисунок 3.5 - Структура IGBT

На рисунку 3.5 показана структура IGBT, в якій виявляється наявність паразитного тиристора, що може впливати на роботу IGBT в увімкненому стані. Зокрема, введення буферного n^+ -шару (n^+ buffer layer) між p^+ -шаром стоку і дрейфовим n^- -шаром, з визначеною концентрацією домішок і товщиною, може значно покращити характеристики роботи IGBT за двома параметрами: зменшення падіння напруги при увімкненні і скорочення часу

відключення. З іншого боку, присутність цього шару істотно знижує здатність IGBT замикати при зворотному включенні. Умовно-графічне позначення n-канального IGBT подано на рисунку 3.6.

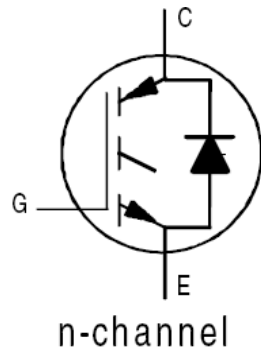


Рисунок 3.6 - Умовно-графічне зображення n-канального IGBT

Характер перехідного процесу під час перемикання є ключовою характеристикою будь-якого напівпровідникового комутаційного пристрою. Розуміння цього характеру дозволяє ефективно використовувати прилад у різних пристроях. Оскільки в більшості випадків навантаження має індуктивний характер, транзистор піддається перенапругам при включенні і виключенні. Таким чином, IGBT вивчається за допомогою тестової схеми з індуктивним навантаженням, як зображено на рисунку 3.7.

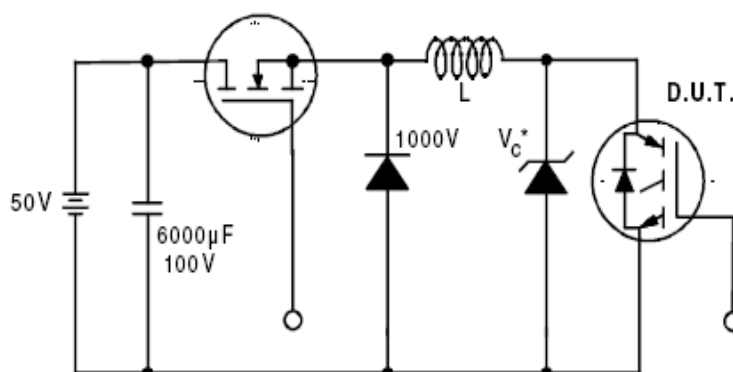


Рисунок 3.7 - Тестова схема підключення IGBT-транзистора
з індуктивним навантаженням

Щоб забезпечити постійний струм навантаження під час процесу перемикання, індуктивність навантаження взята досить високою. Також

важливо наявність зворотного діода (clamp diode), який підтримує струм у котушці індуктивності, коли прилад (device under test - DUT), що перевіряється, включений.

3.3.2. Драйвер

В якості формувача імпульсів IGBT-транзисторів застосовується драйвер IR2233.

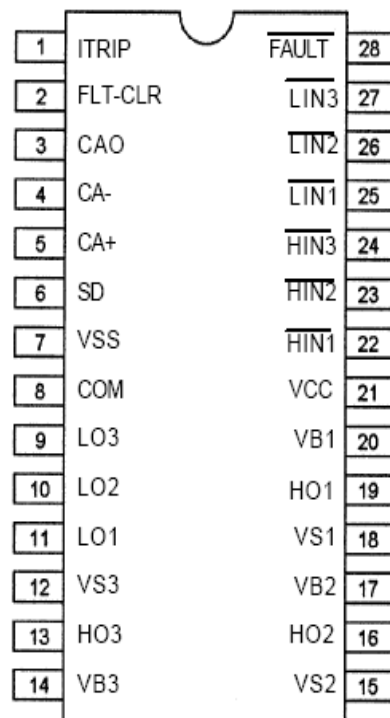


Рисунок 3.8 - Позначення виводів для корпусу DIP

Характеристики IR2233 включають:

- Плаваючий канал для початкового завантаження.
- Робота при напрузі +600V або +1200V.
- Нечутливість до негативної перехідної напруги du/dt .
- Діапазон напруги на затворі від 10V/12V до 20V, а під час перехідного процесу до 25V.
- Блокування для всіх каналів при пониженій напрузі.
- Три незалежні напівмостові драйвери.
- Узгоджений розподіл затримки для всіх каналів.
- Сумісна логіка з напругою 2.5V.

На рисунку 3.9 наведена функціональна схема IR2233.

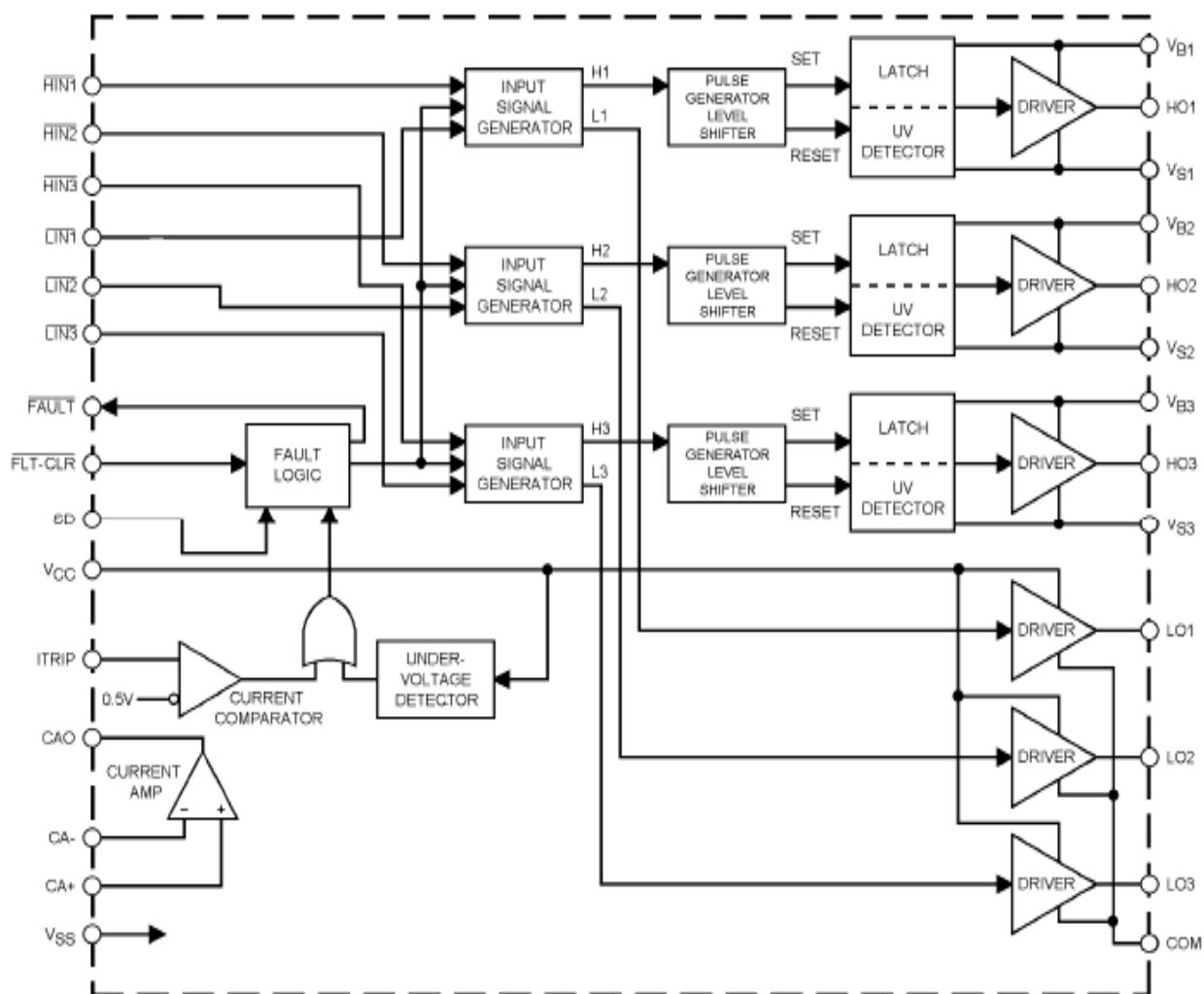


Рисунок 3.9 Функціональна схема драйвера IR2233.

IR2233 - це високовольтний драйвер, який формує імпульси для верхнього і нижнього плеча. Вхідні сигнали сумісні з CMOS або LSTTL, включаючи 2.5V логіку. Для забезпечення аналогового зворотного зв'язку потоку моста використовується незалежний операційний підсилювач через зовнішній шунтуючий резистор. Цей резистор розташований між ланцюгом гальмування і інвертором, дозволяючи інвертору вимірювати робочий струм двигуна та струм гальмування. Сигнал помилки FAULT вказує на зниження напруги і призводить до відключення всіх шести каналів. Сигнал скидання помилки подається на виведення FLT-CLR.

У таблиці 3.2 наводиться опис виводів мікросхеми драйвера.

Таблиця 3.2 Опис виводів драйвера IR2233

Вивід	Опис виводів
HIN1,2,3	Логічні входи для виводів на затвори транзисторів верхнього плеча (HO1,2,3)
LIN1,2,3	Логічні входи для виводів на затвори транзисторів нижнього плеча (HO1,2,3)
FAULT	Указує на блокування від перенапруження або зниженої напруги, негативна логіка.
VCC	Логічна і низькорівнева фиксированое напруга.
ITRIP	Вхід для відключення перенапруження
FLT-CLR	Логічне введення для скидання помилки, негативна логіка
CAO	Виведення підсилювача струму
SD	Логічний вхід для відключення
CA+	Позитивний вхід підсилювача струму
CA-	Негативний вхід підсилювача струму
COM	Низькорівневий зворотний сигнал
VSS	Логічна земля
HO1,2,3	Виходи на затвори транзисторів верхнього плеча
VB1,2,3	Високорівнева напруга
VS1,2,3	Зворотний сигнал високорівневої напруги
LO1,2,3	Виходи на затвори транзисторів нижнього плеча

На рисунку 3.10 представлена типова схема включення драйвера.

Typical Connection

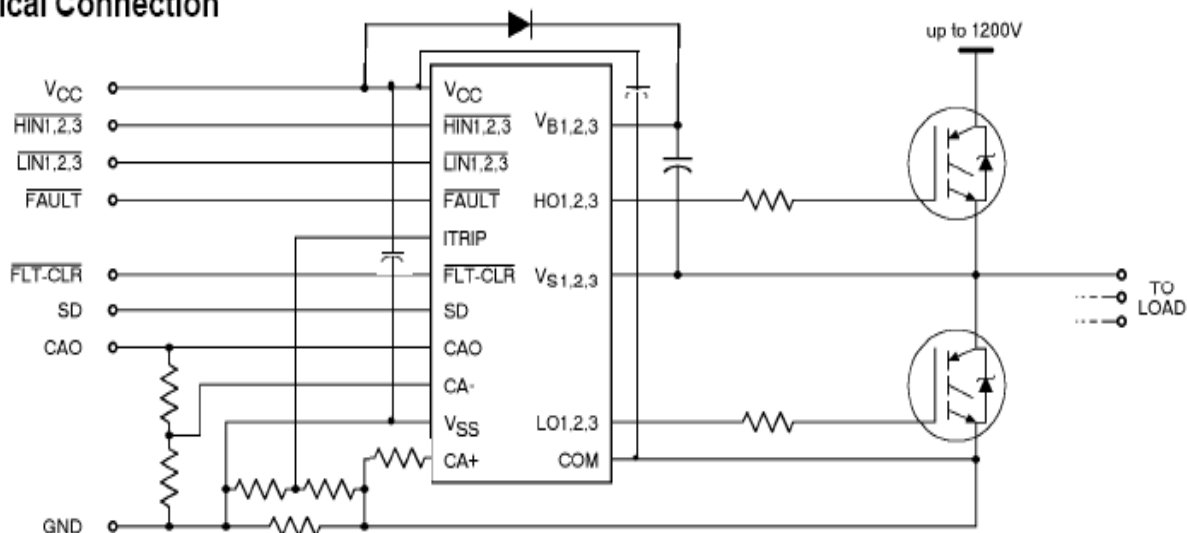


Рисунок 3.10 - Типова схема підключення драйвера.

Для забезпечення ізоляції використовуються оптопари HCPL2630. Це оптоелектронний пристрій з двома каналами, об'єднаними світлодіодом AlGaAs, що використовує технологію 850 нм. Цей світлодіод оптично пов'язаний з високоінтегрованим фотодатчиком, обладнаним стробованим виводом. Відкритий колектор на виводі розв'язує питання монтажу. Технічні характеристики гарантовані у температурному діапазоні від -40°C до $+85^{\circ}\text{C}$. При максимальному входному сигналі 5 мА забезпечується мінімальний вихідний струм на рівні 13 мА. Внутрішній екран з шумопоглиблення дозволяє витримувати перешкоди на рівні 10 кВ/мкс.

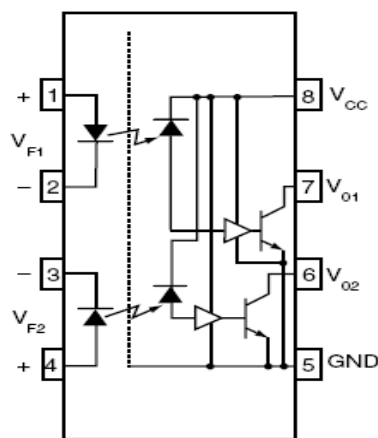


Рисунок 3.11 - Схематичне представлення оптрона HCPL2630.

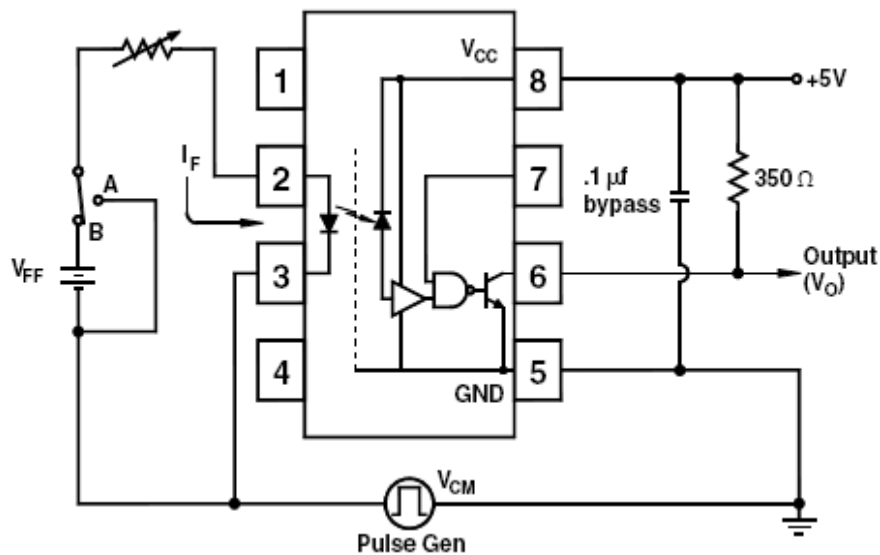


Рисунок 3.12 - Тестова схема при виникненні стійких перехідних процесів.

Управління гальмівним транзистором здійснюється за допомогою драйвера M57962, що є інтегрованою гібридною схемою, спроектованою для керування n-канальним модулем IGBT. Цей пристрій виступає в ролі підсилювача ізоляції, забезпечуючи необхідний електричний бар'єр між введенням та виводом оптрона. Вбудований датчик desaturation забезпечує захист схеми від короткого замикання. Сигнал помилки активується, якщо спрацює захист від короткого замикання схеми.

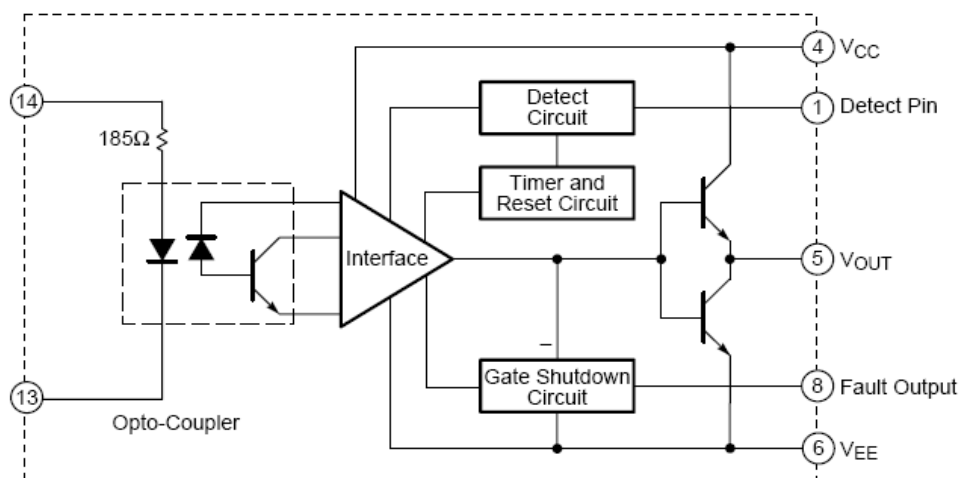


Рисунок 3.13 - Блок схема драйвера M57962.

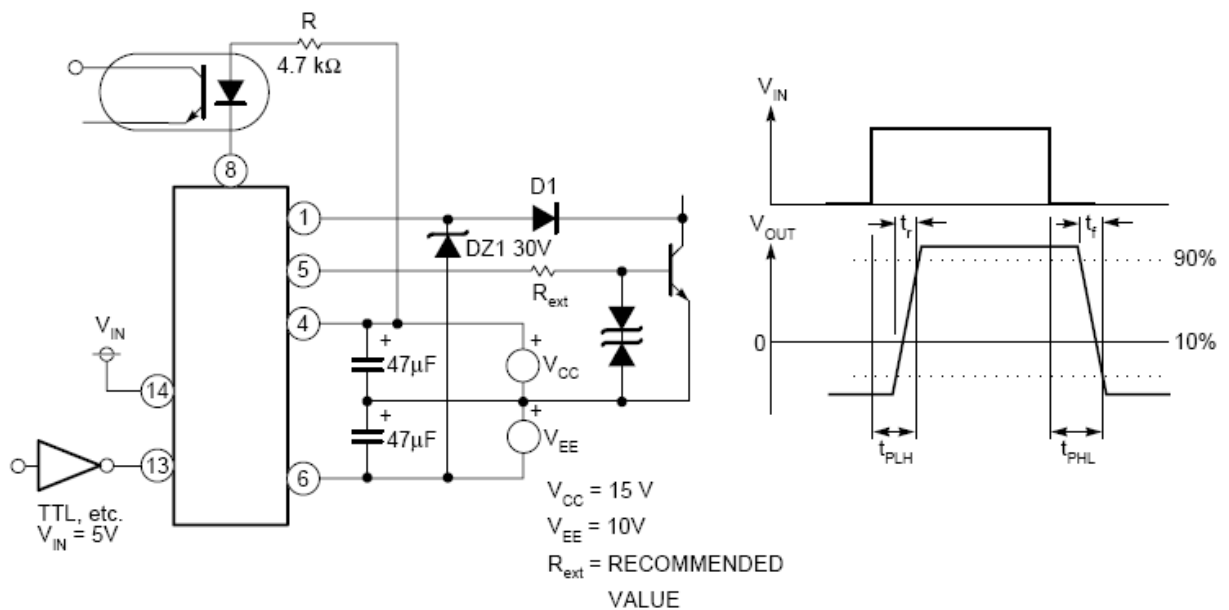


Рисунок 3.14 - Тестова схема включення драйвера M57962.

3.4. Розробка принципової електричної схеми силового каналу.

Принципова схема модуля показана на рис.3.15.

Сигнали управління з роз'єму XS1 плати системи управління подаються на гальванічну розв'язку, яка реалізована за допомогою здвоєних оптопар HCPL2630 (DD1-DD4).

Ці оптопари, обладнані високою швидкістю, генерують стандартний TTL рівень сигналів на виході. Після оптоізоляції сигнали подаються на драйвер IR2233 від компанії International Rectifier, призначений для управління трифазним мостовим інвертором.

Вхідні сигнали драйвера підтягнуті резисторами R1-R8 до напруги +5В. Сам драйвер виготовлений за технологією плаваючих джерел живлення. Верхні транзистори стійок живляться від плаваючих джерел, які виконані на діодах VD16-VD18 і конденсаторах C16-C21. Вихідний інвертор складається з транзисторів верхніх плечей VT1-VT3 і нижніх плечей VT4-VT6.

Плаваюче джерело працює так, що поки нижній транзистор відкритий (наприклад, VT4), зарядний струм через відповідний діод (VD16) заряджає конденсатори (C16, C17). Ці конденсатори заряджаються до напруги джерела живлення (+15В), і після відключення нижнього транзистора верхній ключ може бути відкритий, використовуючи накопичену енергію конденсаторів.

Захист від перевантаження по струму виконаний вбудованим в драйвер компаратором. Сигнали для управління гальмівним ключем отримуються з датчика струму (шунта) R17, R18. Для управління гальмівним ключем застосований драйвер M579621 від компанії MITSUBISHI ELECTRIC, який має вбудовану гальванічну розв'язку і струмовий захист.

Інвертор складається з транзисторів із зворотніми діодами VT1-VT6. Імпульси, що керують ними, подаються на затвори транзисторів через токоограничувальні опори R21, R22, R23, R24, R25, R26. Включені високочастотні діоди служать для розряду затвора, скорочуючи час виключення транзисторів для обмеження їх нагріву.

Конденсатори C16-C21, відомі як "boot-strap" ємності, разом з діодами VD16, VD17, VD18 створюють "плаваюче" джерело живлення. Його принцип роботи наступний: поки транзистор нижнього плеча відкритий, вихідна лінія даної фази устанавлюється в "0", а напруга живлення драйвера (15 В) через відповідний діод заряджає паралельно підключені конденсатори - один керамічний, інший електролітичний.

Коли транзистор нижнього плеча даної фази закривається, заряджена напруга на обкладинках конденсатора подається на затвор верхнього плеча, відкриваючи транзистор верхнього плеча в разі наявності імпульсу управління.

Роботу "плаваючого" джерела забезпечує драйвер DA1 (лінії VB1, HD1, VS1, VB2, HD2, VS2, VB3, HD3, VS3). Цей драйвер перетворює логічні сигнали від Мікроконтролера у сигнали, необхідні для управління транзистором, і також відповідає за захист, відключаючи транзистори в аварійних ситуаціях. Драйвер контролює сумарний струм у фазах (резистори R25, R26, R29) і рівень живильної напруги.

При аварії драйвер вимикає силові транзистори і висилає сигнал FAULT на процесор. Після заданого інтервалу Мікроконтролер видає команду "Скидання" по лінії FLT-CLR.

Конденсатори C11-C13 служать фільтрами по живленню драйвера. Транзисторна збірка R21 "піднімає" рівень напруги на лініях управління драйвера до логічної одиниці.

Реле SB1 використовується для управління зарядним ланцюгом електролітичних конденсаторів C1, C2, C6, C8, шунтуванням струмообмежуючих резисторів R3-R6. Реле K2 дозволяє управляти зовнішніми пускачами TV1, мостами VD1-VD4, VD12-VD15, стабілізаторами VT,7 VT8.

4 РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ПРОЦЕСУ РУШАННЯ

4.1. Дослідження процесу пуску з використанням системи керованого рушання на базі ПЧ.

Для аналізу режимів роботи асинхронного електроприводу можна використовувати математичний опис цього приводу в нерухомій системі координат :

$$\left\{ \begin{array}{l} u_{S\alpha} = R \cdot i_{S\alpha} + x'_S \cdot \frac{di_{S\alpha}}{dt} - \frac{k_R}{T_R} \cdot \Psi_{R\alpha} - k_R \cdot p \cdot \omega \cdot \Psi_{R\beta}, \\ u_{S\beta} = R \cdot i_{S\beta} + x'_S \cdot \frac{di_{S\beta}}{dt} - \frac{k_R}{T_R} \cdot \Psi_{R\beta} + k_R \cdot p \cdot \omega \cdot \Psi_{R\alpha}, \\ 0 = -k_R \cdot R_R \cdot i_{S\alpha} + \frac{1}{T_R} \cdot \Psi_{R\alpha} + \frac{d\Psi_{R\alpha}}{dt} + p \cdot \omega \cdot \Psi_{R\beta}, \\ 0 = -k_R \cdot R_R \cdot i_{S\beta} + \frac{1}{T_R} \cdot \Psi_{R\beta} + \frac{d\Psi_{R\beta}}{dt} - p \cdot \omega \cdot \Psi_{R\alpha}, \\ M = \frac{3}{2} \cdot p \cdot k_R \cdot (\Psi_{R\alpha} \cdot i_{S\beta} - \Psi_{R\beta} \cdot i_{S\alpha}), \\ J \cdot \frac{d\omega}{dt} = M - M_H, \end{array} \right. \quad (4.1)$$

де $i_{S\alpha}, i_{S\beta}$ – проекції вектора струму статора, що відображається, на відповідні координатні осі α і β ;

$u_{S\alpha}, u_{S\beta}$ – проекції вектора напруги статора, на відповідні координатні осі α і β ;

$\Psi_{R\alpha}, \Psi_{R\beta}$ – проекції вектора потокозчеплення ротора, на відповідні координатні осі α і β ;

M – значення електромагнітного моменту електродвигуна;

M_H – значення моменту навантаження;

ω – значення кутової частоти обертання валу двигуна;

p – кількість пар полюсів;

$\mathbb{I}$ – значення моменту інерції;

$$R = R_S + \left(\frac{L_m}{L_R} \right)^2 \cdot R_R, \quad x'_S = L_S - \frac{L_m^2}{L_R}, \quad k_R = \frac{L_m}{L_R}, \quad T_R = \frac{L_R}{R_R},$$

де R_S – значення активного опору обмотки статора;

R_R – значення приведенного активного опору обмотки ротора;

L_S – значення повної індуктивності статора;

L_R – значення приведеної повної індуктивності ротора;

L_m – значення взаємної індуктивності.

Математична модель, разом із передавальними функціями інших компонентів структурної схеми системи керованого рушіння, є складною для математичних розрахунків. Однак використання додатка Simulink у пакеті MATLAB дозволяє легко моделювати системи, незважаючи на кількість рівнянь і їхню ступінь складності.

Simulink - це бібліотека візуальних об'єктів (лінійних, нелінійних, дискретних компонентів тощо), які дозволяють вивчати системи, описані рівняннями будь-якого рівня складності. Блок Transfer Fcn визначає передавальну функцію у вигляді відношення поліномів:

$$H'(s) = \frac{y(s)}{u(s)} = \frac{num(s)}{den(s)} = \frac{num(1)s^{nn-1} + num(2)s^{nn-2} + \dots + num(nn)}{den(1)s^{nd-1} + den(2)s^{nd-2} + \dots + den(nd)},$$

де nn і nd – ступень чисельника та знаменника передавальної функції,
num – вектор чи матриця коефіцієнтів чисельника,
den – вектор коефіцієнтів знаменника.

Параметри:

1. Numerator - це вектор або матриця коефіцієнтів чисельника полінома.
2. Denominator - це вектор коефіцієнтів знаменника полінома.

3. Absolute tolerance - це абсолютна точність.

Ступінь чисельника повинен бути не вище, ніж ступінь знаменника. Вхідний сигнал блоку повинен бути скалярним. У випадку, коли коефіцієнти чисельника задані вектором, вихідний сигнал блоку також буде скалярним, так само, як і вхідний сигнал.

Блок Integrator виконує інтеграцію вхідного сигналу.

Параметри:

- External reset - зовнішнє скидання. Тип зовнішнього сигналу, що управляє блоком інтегратора і забезпечує скидання його до початкового стану. Варіанти вибору:

1. none – відсутнє (скидання не виконується).
2. rising - наростаючий сигнал (передній фронт сигналу).
3. falling - спадаючий сигнал (задній фронт сигналу).
4. either – або наростаючий, або спадаючий сигнал.
5. level – сигнал рівня (скидання виконується, якщо сигнал на вході, що управляє, стає не рівним нулю).

Якщо обраний будь-який тип сигналу управління, за винятком "none", на зображенні блоку відображатиметься додатковий вхід, який управляє цим сигналом. Поряд із додатковим входом буде вказано умовне позначення сигналу управління.

Додатково:

- Initial condition source - це джерело початкового значення вихідного сигналу. Варіанти вибору:

1. internal – внутрішнє.
2. external – зовнішнє. У цьому випадку на зображенні блоку з'явиться додатковий вхід, позначений x_0 , на який необхідно ввести сигнал, що задає початкове значення вихідного сигналу інтегратора.

- Initial condition – початкова умова. Це встановлює початкове значення вихідного сигналу інтегратора.

- Limit output (прапорець) – використовує обмеження вихідного сигналу.
- Upper saturation limit – верхній рівень обмеження вихідного сигналу, який може бути заданий числом або символьною послідовністю "inf".
- Lower saturation limit – нижній рівень обмеження вихідного сигналу, який може бути заданий числом або символьною послідовністю "inf".
- Show saturation port — відображення порту, що виводить сигнал, що свідчить про вихід інтегратора на обмеження. Вихідний сигнал цього порту може мати наступні значення:
 1. Нуль, якщо інтегратор не знаходиться на обмеженні.
 2. +1, якщо вихідний сигнал інтегратора досяг верхньої обмежуючої межі.
 3. -1, якщо вихідний сигнал інтегратора досяг нижньої обмежуючої межі.
- Show state port (прапорець) – відображення/приховування порту стану блоку. Цей порт використовується, якщо вихідний сигнал інтегратора має бути введений як сигнал зворотного зв'язку для того ж інтегратора. Вихідний сигнал з цього порту може також використовуватися для організації взаємодії з керованою підсистемою.
- Absolute tolerance – це абсолютна погрішність.

Підсилювачі Gain і Matrix Gain виконують множення вхідного сигналу на постійний коефіцієнт.

Параметри:

1. Gain – це коефіцієнт посилення.
2. Multiplication – спосіб виконання операції множення. Може приймати значення із списку:
 - Element-wise $K*u$ – поелементне множення.

- Matrix $K*u$ – матричне множення, де коефіцієнт посилення є лівобічним операндом.
- Matrix $u*K$ – матричне множення, де коефіцієнт посилення є правостороннім операндом.

3. Saturate on integer overflow (прапорець) – це функція пригнічення переповнення для цілочисельних значень. Якщо цей прапорець встановлено, обмеження цілочисельних сигналів виконується коректно.

Блоки підсилювачів Gain і Matrix Gain представляють собою один і той же блок, але з різними початковими налаштуваннями параметра Multiplication.

Параметр блоку Gain може приймати як позитивні, так і негативні числа, які можуть бути більше або менше 1. Коефіцієнт посилення можна задавати у вигляді скаляра, матриці або вектора, а також у вигляді обчислюваного виразу.

Якщо параметр Multiplication встановлено як Element-wise $K*u$, то блок виконує операцію множення на заданий коефіцієнт для скалярного сигналу або кожного елемента векторного сигналу. В іншому випадку блок виконує операцію матричного множення сигналу на коефіцієнт, заданий матрицею.

За замовчуванням коефіцієнт посилення є дійсним числом типу double.

Для операції поелементного посилення вхідний сигнал може бути скалярним, векторним або матричним будь-якого типу, за винятком логічного (boolean). Елементи вектора повинні мати однаковий тип сигналу. Вихідний сигнал блоку матиме той самий тип, що і вхідний сигнал.

Параметр блоку Gain може бути скаляром, вектором або матрицею будь-якого типу, за винятком логічного (boolean).

При розрахунку вихідного сигналу блоку Gain застосовуються такі правила:

- Якщо вхідний сигнал є дійсним типом, а коефіцієнт посилення комплексний, то вихідний сигнал стає комплексним.

- У випадку, коли тип вхідного сигналу відрізняється від типу коефіцієнта посилення, Simulink намагається здійснити приведення типу коефіцієнта посилення до типу вхідного сигналу. Якщо таке приведення неможливе, розрахунок призупиняється з виведенням повідомлення про помилку. Така ситуація може виникнути, наприклад, коли вхідний сигнал є беззнаковим цілим (uint8), а параметр Gain заданий негативним числом.

Блок обчислення суми (Sum) виконує операцію обчислення суми поточних значень сигналів.

Параметри:

1. Icon shape – форма блоку, яка обирається із списку: round – округлість, rectangular – прямокутник.
2. List of sign – перелік знаків, де можна використовувати наступні символи: + (плюс), - (мінус), і | (роздільник знаків).
3. Saturate on integer overflow (прапорець) – це опція пригнічення переповнення для цілочисельних значень. Якщо ця опція ввімкнена, обмеження цілочисельних сигналів виконується коректно.

Кількість входів та операція (додавання або віднімання) визначаються списком знаків у параметрі "List of sign", де мітки входів позначаються відповідними знаками. У цьому параметрі можна також вказати число входів блоку, і всі вони будуть підсумовані.

Якщо кількість входів перевищує 3, зручніше використовувати блок Sum у прямокутній формі. Цей блок може використовуватися для підсумовування скалярних, векторних або матричних сигналів, зазначаючи, що типи підсумовуваних сигналів повинні співпадати. Наприклад, не можна подавати на блок сигнали цілого і дійсного типів.

У випадку, коли кількість входів блоку більше одного, він виконує поелементні операції над векторними і матричними сигналами. При цьому кількість елементів у матриці або векторі повинна бути однаковою.

Якщо у параметрі "List of sign" вказати цифру 1 (один вхід), то блок можна використовувати для визначення суми елементів вектора.

Блок множення Product виконує обчислення добутку поточних значень сигналів.

Параметри:

1. Number of inputs – кількість входів. Може бути вказана як число або список знаків, де дозволяються символи * (помножити) і / (розділити).
2. Multiplication – спосіб виконання операції. Може мати значення із списку:
 - Element-wise – поелементний.
 - Matrix – матричний.
3. Saturate on integer overflow (прапорець) – опція пригнічення переповнення для цілочисельних значень. Якщо ця опція увімкнена, обмеження цілочисельних сигналів виконується коректно.

Якщо параметр Number of inputs заданий списком, включаючи, крім знаків множення, також знаки ділення, то мітки входів будуть позначені символами відповідних операцій.

Блок може бути використаний для виконання операцій множення або ділення як скалярних, так і векторних або матричних сигналів. Важливо, щоб типи вхідних сигналів блоку були однаковими. У випадку, коли кількість входів вказана як 1 (один вхід), блок може використовуватися для обчислення добутку елементів вектора.

Блок Sine Wave виробляє синусоїдальний сигнал із заданою частотою, амплітудою, фазою і зсувом. Для формування вихідного сигналу блок може використовувати два алгоритми, які визначаються параметром Sine Type (тип синусоїди):

- Time-based – залежить від поточного часу.
- Sample-based – залежить від величини кроку модельного часу.

Для створення структурної схеми асинхронного електроприводу можна представити рівняння (4.1) в операторній формі:

$$\begin{cases}
u_{S\alpha} = R \cdot (1 + T'_S \cdot s) \cdot i_{S\alpha} - \frac{k_R}{T_R} \cdot \Psi_{R\alpha} - k_R \cdot p \cdot \omega \cdot \Psi_{R\beta}, \\
u_{S\beta} = R \cdot (1 + T'_S \cdot s) \cdot i_{S\beta} - \frac{k_R}{T_R} \cdot \Psi_{R\beta} + k_R \cdot p \cdot \omega \cdot \Psi_{R\alpha}, \\
0 = -k_R \cdot R_R \cdot i_{S\alpha} + \frac{1}{T_R} \cdot (1 + T_R \cdot s) \cdot \Psi_{R\alpha} + p \cdot \omega \cdot \Psi_{R\beta}, \\
0 = -k_R \cdot R_R \cdot i_{S\beta} + \frac{1}{T_R} \cdot (1 + T_R \cdot s) \cdot \Psi_{R\beta} - p \cdot \omega \cdot \Psi_{R\alpha}, \\
M = \frac{3}{2} \cdot p \cdot k_R \cdot (\Psi_{R\alpha} \cdot i_{S\beta} - \Psi_{R\beta} \cdot i_{S\alpha}), \\
J \cdot s \cdot \omega = M - M_H,
\end{cases} \quad (4.2)$$

де s – оператор Лапласа;

$$T'_S = \frac{x'_S}{R}.$$

Використовуючи інтегральні блоки (Integrator), блоки безінерційного підсилення (Gain), блоки з передавальними функціями (Transfer Fcn), а також вузли для сумування (Sum) і множення (Product), ми формуємо структурну модель асинхронного електроприводу (див. рис. 4.1). Сегмент схеми, виділений пунктирною лінією, представляє електромагнітну частину асинхронного електроприводу (описану першими п'ятьма рівняннями системи (4.2)). Решта сегменту визначає електромеханічну частину асинхронного електроприводу (шосте рівняння системи (4.2)).

Модель має два входи для управління (напруга подачі живлення U) і один вхід для збурення (момент навантаження M_H). До входів управління підключені джерела синусоїдальних сигналів з постійною амплітудою і частотою - Sine Wave, а до входу збурення - джерело постійного сигналу - Step. Якщо необхідно вивчити конкретні значення двигуна (струми, магнітний потік, кутова швидкість обертання, момент), можна підключити віртуальний осцилоскоп (Scope) до відповідних точок структурної моделі.

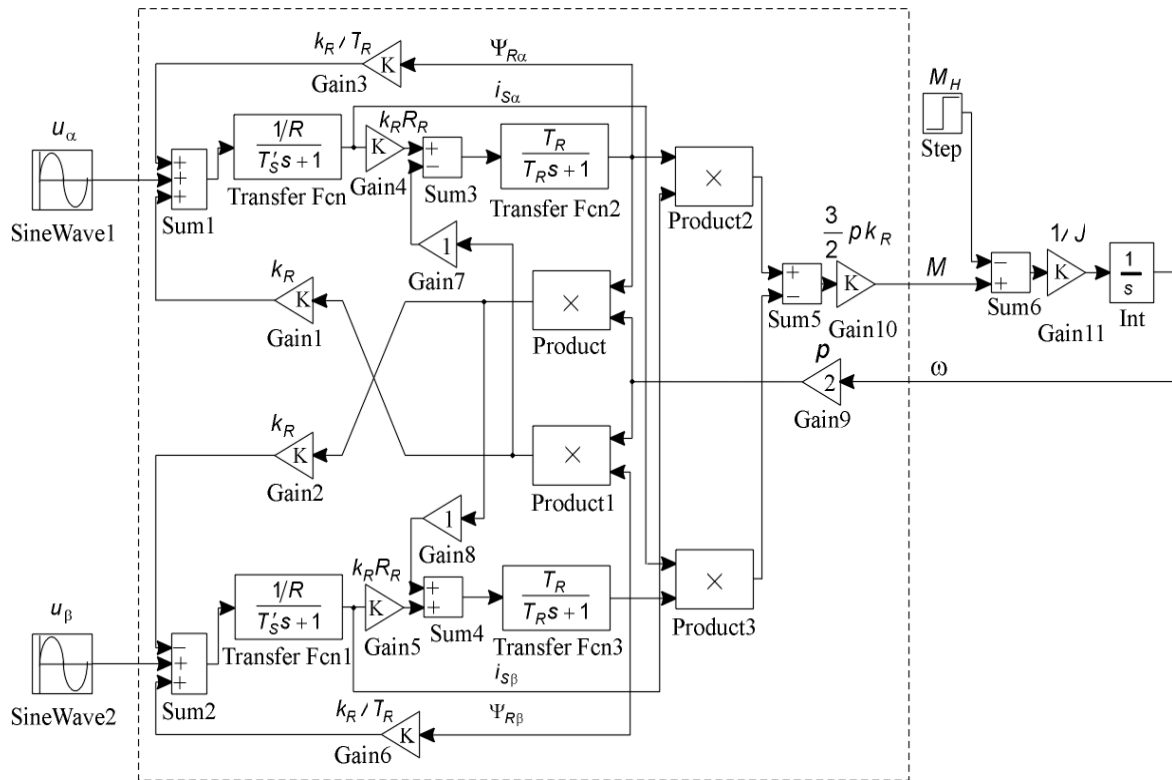


Рисунок 4.1 - Структурна модель АКД, змодельована в додатку Simulink пакету MATLAB.

Структурно-функціональна модель системи керованого руху, розроблена в програмі Simulink пакету MATLAB, представлена на рисунку 4.2. Для створення цієї моделі використовується частина структурної схеми асинхронного електроприводу, зображена на малюнку 4.1 і обведена штриховою лінією. Ця частина схеми доповнюється блоком формування моменту руху і блоком встановлення закону частотного регулювання.

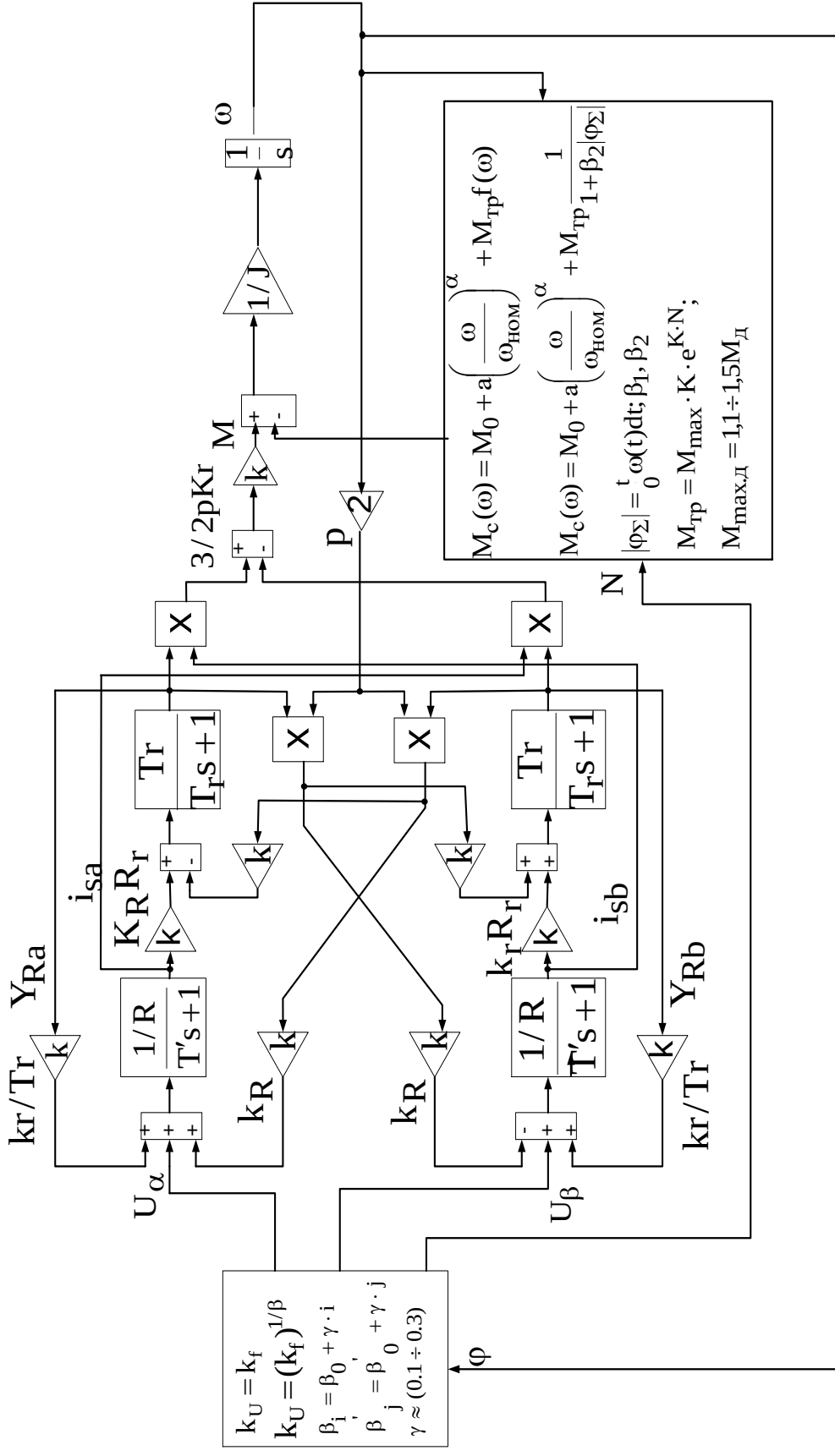


Рисунок 4.2 - Структурно-функціональна модель системи керування, розроблена в додатку Simulink пакету MATLAB

4.2. Складання моделі системи керованого рушання.

Момент опору механізму зазвичай визначається його початковим значенням, яке відповідає нульовій кутовій швидкості при розпочатку обертання з місця. Далі, залежність моменту від кутової швидкості ротора і характер цієї залежності можна представити у загальній формі для більшості обертаючихся механізмів:

$$M_C = M_0 + (M_0 - M_{\text{нач}}) \left(\frac{\omega}{\omega_{\text{ном}}} \right)^\alpha,$$

де M_0 – початковий статичний момент опору двигуна, який обертається (без врахування моменту тертя спокою);

$M_{\text{нач}}$ – номінальний момент опору механізму

α – показник степеня;

$\omega_{\text{ном}}$ – значення номінальної кутової швидкості, при якій момент опору дорівнює номінальному.

Для початку руху механізму необхідно подолати початковий статичний момент тертя в підшипниках (означений як $M_{\text{тр}}$), який перевищує момент тертя, що існує після того, як агрегат рухається з місця. Знання цього початкового моменту опору при чіпанні агрегату є важливим для правильного вибору двигуна.

Початковий момент двигуна повинен бути вище, ніж початковий статичний момент опору агрегату. В іншому випадку двигун не зможе розпочати рух з місця.

У блоку формування моменту рухання момент визначається як функція швидкості та кута повороту валу:

$$M_c(\omega) = M_0 + a \left(\frac{\omega}{\omega_{\text{ном}}} \right)^\alpha + M_{\text{тр}} \frac{1}{1 + \beta |\varphi_\Sigma|}$$

$$\varphi_\Sigma = \int_0^t \omega(t) dt$$

$$M_{\text{тр}} = M_{\text{max}} \cdot K \cdot e^{K \cdot N},$$

де N – число імпульсів моменту двигуна;

K – число спроб рушання.

Керування кількістю циклів передстартової підготовки, числом імпульсів моменту та вибір закону частотного регулювання визначається програмою.

4.3. Результати моделювання.

Отримані результати моделювання відображаються на моніторі за допомогою віртуального осцилографа Score, який конструює графіки досліджуваних сигналів в залежності від часу і дозволяє спостерігати за їхніми змінами під час моделювання.

На рисунку 4.3 показані імпульси напруги управління для перетворювача частоти $U(t)$.

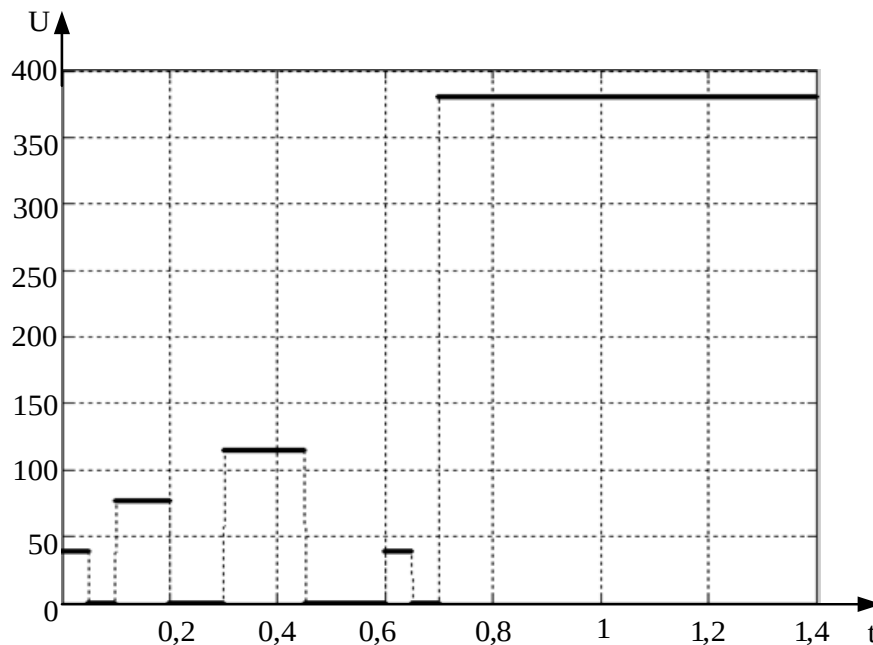


Рисунок 4.3 - Графік залежності $U(t)$.

На рисунку 4.4 представлений графік залежності моменту опору від часу.

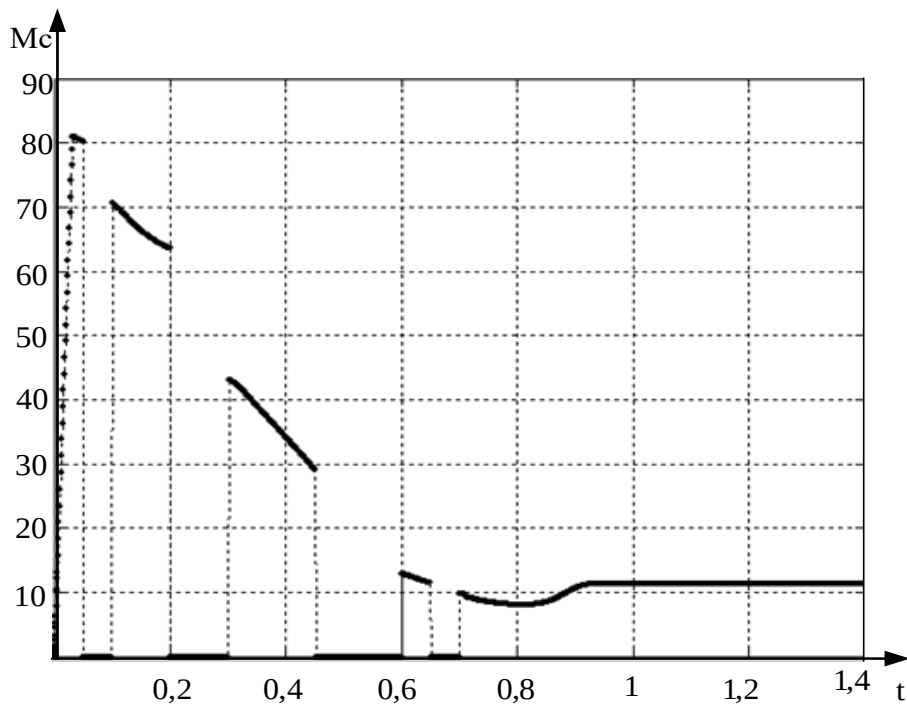


Рисунок 4.4 - Графік залежності $M_c(t)$.

На рисунку 4.5 представлений графік залежності $\omega(t)$.

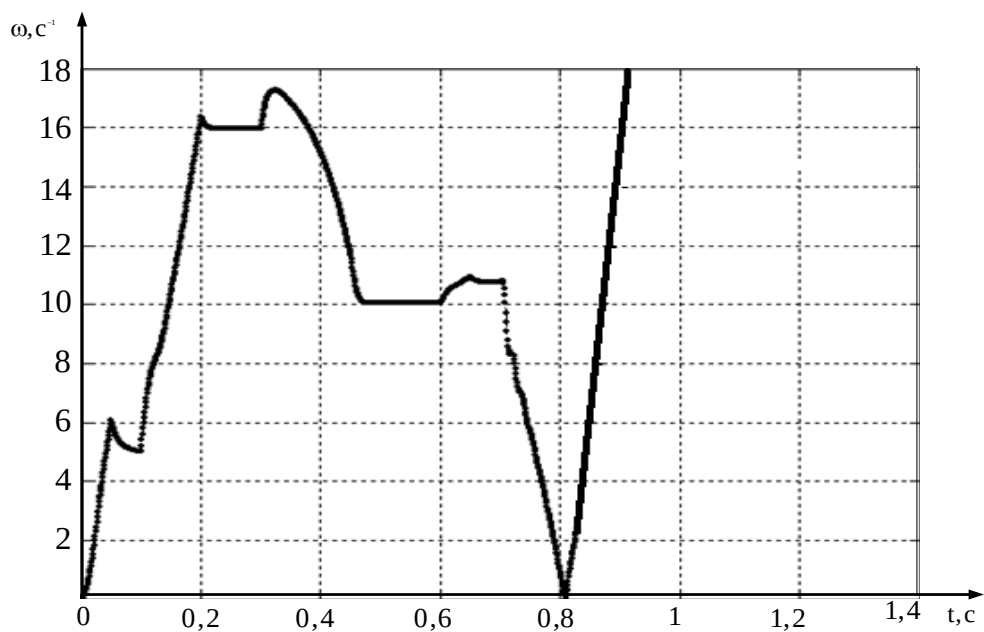


Рисунок 4.5 - Графік залежності $\omega(t)$

З графіка, поданого на рис.4.5, видно, що перші чотири спроби пуску виявилися неуспішними, після чого двигун розганяється до заданої номінальної швидкості.

На рис.4.6 наведено графік залежності моменту двигуна від часу.

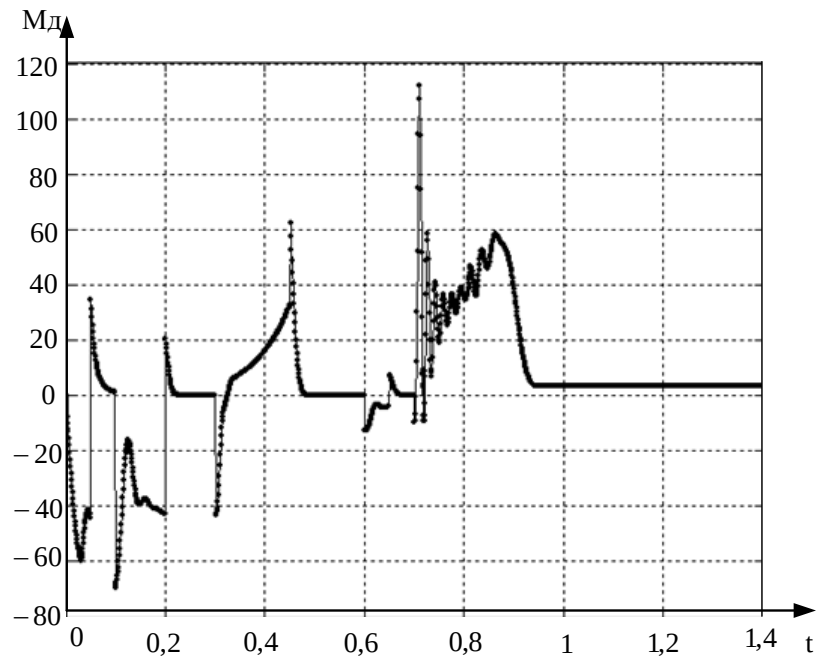


Рисунок 4.6 - Графік залежності $M_d(t)$.

З рисунку 4.6 видно, що момент двигуна має імпульсний і знакозмінний характер, що може призводити до руйнування структури, створеної технологічною сировиною.

У підсумку результати моделювання підтверджують ефективність розробленої системи та алгоритмів передстартової підготовки електроприводів. Отримані залежності дозволяють оцінити енерговитрати та ефективність роботи системи керованого рушання на основі перетворювача частоти.

5 АЛГОРИТМ УПРАВЛІННЯ ПУСКОМ ДОДАТКОВИХ НАСОСІВ В НАСОСНИХ СТАНЦІЯХ

5.1. Способи пуску додаткових насосів в насосних станціях підвищення тиску.

Одним із методів для збільшення тиску у насосних станціях є використання двох основних стратегій управління: каскадного пуску та зупинки додаткових насосів, а також регулювання частоти роботи одного чи кількох насосів. Запуск та зупинка додаткових насосів допомагає підтримувати тиск у напірній магістралі в заданих межах, тоді як частотне регулювання забезпечує підтримку тиску на визначеному рівні.

Важливо відзначити, що вимкнення кожного насоса без використання частотного перетворювача чи пристрою для плавного пуску відбувається шляхом його прямого відключення від живильної мережі або в режимі "самовибігу". Такий спосіб вимкнення, зазвичай, не викликає раптових змін у струмі живильної мережі і помітних гідроударів. Проте при збільшенні статичного напору пряме відключення насосів може призвести до гідроударів, що визначаються співвідношенням статичного і фіктивного напору насосної станції [2].

Запуск додаткових насосів у насосних станціях для підвищення тиску породжує перехідні процеси в електричних мережах живильної напруги, а також у напірних гідравлічних магістралях [12].

Запуск кожного додаткового насоса можна виконати за наступними методами:

1. Прямий пуск:

— Пуск насоса відбувається шляхом безпосереднього підключення електродвигуна насоса до електричної мережі.

- Цей метод має свої переваги, такі як низькі витрати на обладнання та висока надійність.

2. Пуск за схемою «зірка - трикутник»:

- Запуск насоса відбувається за допомогою схеми, яка передбачає початковий пуск в режимі "зірки", а потім переходить до режиму "трикутник".

3. Пуск від пристрою плавного пуску (ППП):

- Запуск насоса відбувається через пристрій, який забезпечує плавний старт, уникаючи раптових навантажень на систему.

4. Пуск від перетворювача частоти (ПЧ):

- Запуск насоса відбувається за допомогою перетворювача частоти, що дозволяє регулювати швидкість роботи насоса.

Основні недоліки системи включають:

1. Струм короткого замикання при підключенні двигуна до мережі:

- При нульовій швидкості обертання та ковзанні $S = 1$ в обмотці статора виникає струм короткого замикання $I_{кз}$. Цей струм перевищує номінальний струм двигуна в 5-7 разів.

2. Гідроудари в напірній магістралі:

- Наявність гідроударів у напірній магістралі викликає проблеми.

Зменшення гідроударів у напірній магістралі може бути досягнуто за допомогою пуску насоса з закритою засувкою, з подальшим поступовим відкриттям. Однак цей метод призводить до збільшення апаратних витрат на засувку, і редуктор повинен мати сервіс-фактор не менше 1,8, що призводить до збільшення вартості системи управління насосною станцією [5].

5.2. Характеристики пуску насосів.

На рис. 5.1 представлена осцилограма активного струму I_a при прямому пуску насоса потужністю 11 кВт з закритою засувкою.

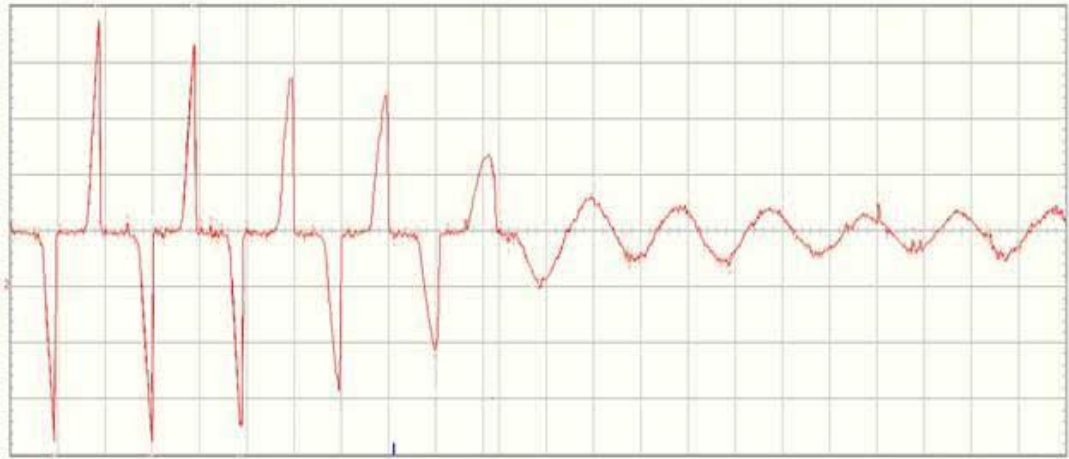


Рисунок 5.1 - Осцилограма струму прямого пуску насоса

На осцилограмі (рис. 5.1) можна спостерігати, що імпульси струму в мережі живлення електродвигуна насоса при прямому пуску, навіть на закриті засувку, досягають значень приблизно 6,7 разів номінального струму електродвигуна ($I_{ном}$). Для насоса потужністю $P = 11$ кВт це становить не менше 147 А, при цьому тривалість імпульсів складає 0,004 секунди.

Осцилограма зміни тиску за насосом при його пуску на закриті засувку представлена на рис. 5.2. Зміна напору протягом короткого періоду часу, яка визначає гідроудар при пуску насоса, характеризується наступними параметрами: підвищення напору на 20 метрів протягом 0,06 секунди.

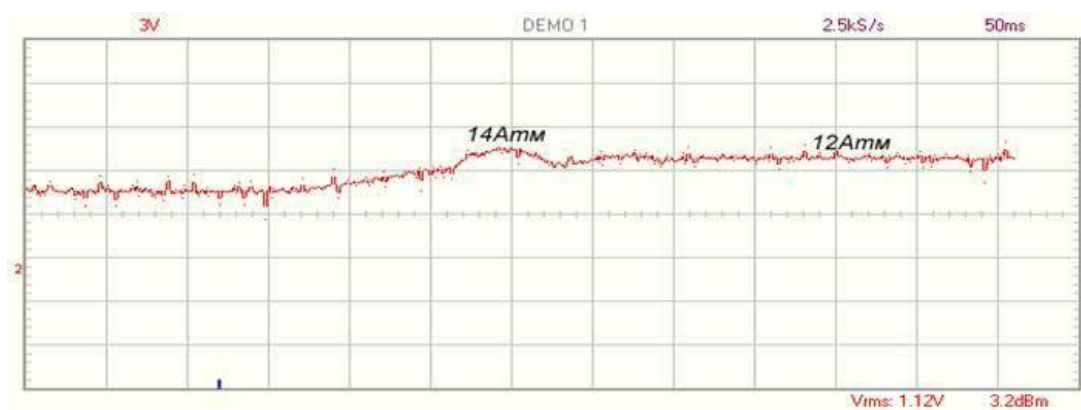


Рисунок 5.2 - Зміна напору за насосом $P = 11$ кВт при пуску на закриту засувку

У деяких випадках прямий пуск додаткового насоса здійснюється при наявності паралельно працюючого насоса із частотним регулюванням. Основні параметри динаміки частотного регулювання насоса включають час рампового пуску, який визначає плавний розгін насоса від нульової до максимальної швидкості обертання, і час рампової зупинки, під час якого насос плавно зупиняється від максимальної швидкості обертання.

Досвід експлуатації насосних станцій показує, що "коротка" рампа, яка характеризується найбільш крутою зміною частоти живлячої напруги насосу при його пуску і зупинці, повинна мати значення не більше 10 Гц/с.

Протягом часу гідроудару $\Delta t \leq 0,06$ с перетворювач частоти може знизити частоту живлячої напруги на не більше 0,6 Гц. З урахуванням фільтрації сигналів датчиків та часу реакції схеми ПД-регулювання, які забезпечують стійкість перехідних процесів, зміна частоти обертання регульованого насоса в напрямку його зменшення може бути виконана лише через 0,8-1,2 секунди після виникнення гідроудару.

Таким чином, присутність насоса, який може бути регульований перетворювачем частоти, не дозволяє ефективно поглибити гідроудари, що виникають при прямому пуску додаткового насоса. Тепер розглянемо пуск насоса за схемою "зірка - трикутник". Однією з переваг цього методу є

можливість безударного запуску насоса за рахунок зменшення пускового моменту при зниженні напруги живлення обмоток статора двигуна.

Однак очевидним недоліком цього методу є збільшення кількості комутаційної апаратури (див. рис. 5.3). Пуск з перемиканням обмоток двигуна може бути використаний лише для насосів із фазною обмоткою, розрахованою на напругу 0,4 кВ.

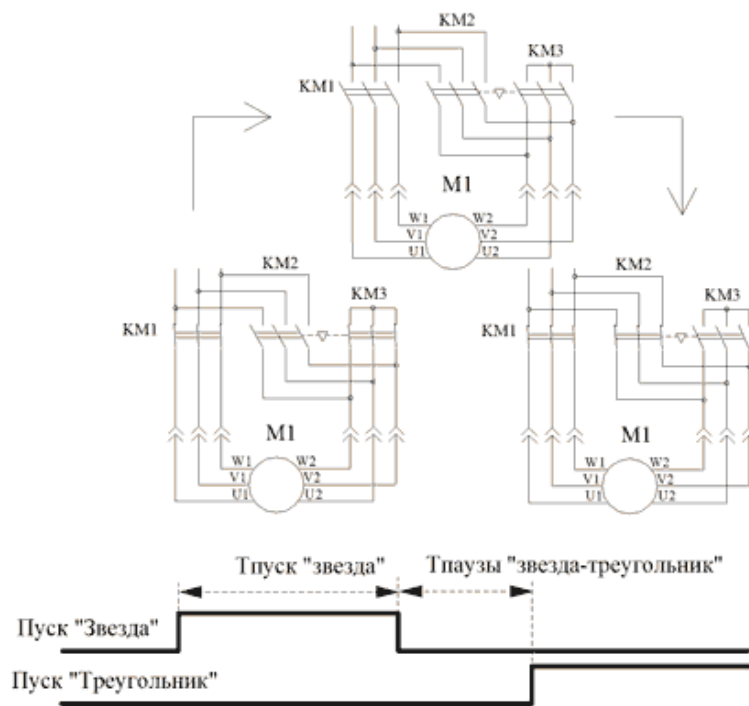


Рисунок 5.3 - Пуск насоса за схемою «зірка-трикутник»

Графіки залежностей обертаючого моменту на валу електродвигуна насоса М та споживаного активного струму статора І₁ від величини ковзання електродвигуна S можна побачити на рис. 5.4.

Під час запуску електродвигуна насоса його обмотки з'єднуються за схемою "зірка" (рис. 5.3), при цьому фазна напруга на статорі зменшується в $\sqrt{3}$ рази. Таким же чином зменшується струм в фазних обмотках двигуна (рис. 5.4).

Важливо враховувати, що електромагнітний момент асинхронного двигуна пропорційний квадрату напруги мережі. Таким чином, зниження

живлячої напруги, що подається на робочу обмотку, призводить до зниження обертаючого моменту в 3 рази, що, в свою чергу, призводить до збільшення величини ковзання.

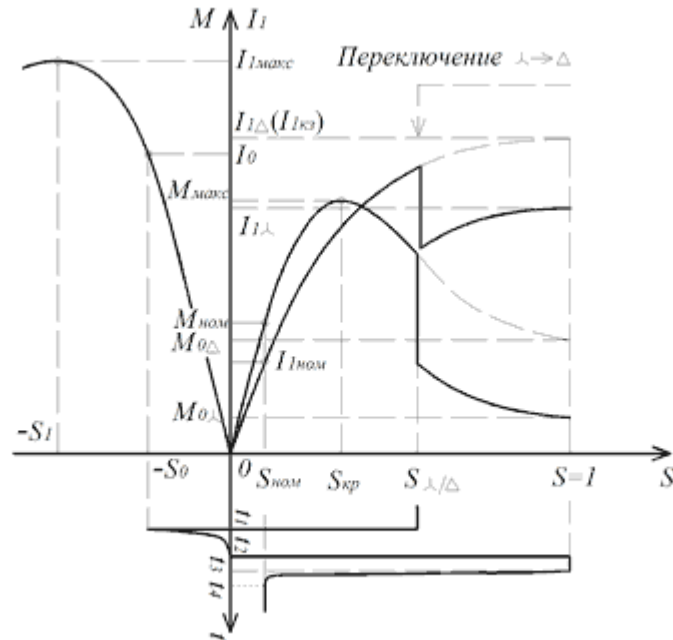


Рисунок 5.4 - Графіки залежностей моменту приводу насоса і струму обмотки статора від значення ковзання при прямому пуску та пуску за схемою «зірка-трикутник»:

$M_{\text{макс}}$ - паксимальне значення обертаючого моменту ($M_{\text{макс}}$), що відповідає ковзанню $S_{\text{кр}} > 0$, $M_{\text{ном}}$ – номінальне значення моменту при номінальному ковзанні $S_{\text{ном}}$; $M_{0\text{зірка}}$, $M_{0\Delta}$ - пускові моменти при включенні обмоток електродвигуна насоса відповідно за схемою «зірка» і «трикутник»; $I_{1\text{зірка}}$, $I_{1\Delta}$ ($I_{1\text{кз}}$) - пусковий струм при включенні обмоток за схемою «зірка» і «трикутник» (струм короткого замикання); I_0 - струм статора при комутації обмоток зі схеми «зірка» в схему «трикутник» при $T_{\text{паузи}} = 0$; $I_{1\text{макс}}$ - максимальне значення струму статора при $S_1 < 0$; $S_{\text{зірка}} / \Delta$ - ковзання електродвигуна в момент вимикання живлячої напруги за схемою «зірка» або «трикутник»; S_0 - мінімально можливе значення ковзання після вимкнення обмоток за схемою «зірка»; $0-t_1$ - час пуску в період роботи за схемою «зірка»; t_1-t_2 - час повної зупинки насоса; t_2-t_3 - час початку пуску насоса за

схемою «трикутник» після його повної зупинки; t_3-t_4 - час прямого пуску за схемою «трикутник».

Важливо відзначити, що ефективність пуску насоса з перемиканням обмоток виявляється тільки у випадку, коли його вдається розігнати при включенні обмоток за схемою «зірка» до значення $S_{зірка} \approx S_{ном}$. Також необхідно вивести насос на стійку ділянку механічної характеристики так, щоб пуск двигуна після перемикання обмоток в схему «трикутник» починався зі значення $S_d < S_{кр}$ для уникнення гідроудару. Однак ця умова може бути виконана лише при ненавантаженому електродвигуні, що суперечить вимозі рівності моментів для навантаженого двигуна.

Отже, пуск насоса з перемиканням обмоток електродвигуна зі схеми «зірка» в схему «трикутник» виявляється неефективним засобом для зниження кидків струму в мережі живлячої напруги і уникнення гідроударів в напірній магістралі.

Розглянемо процес пуску насосів за допомогою пристрою плавного пуску. Цей метод також включає пониження живучої напруги, за яким слідує поступове її збільшення до номінального значення. Однак, на відміну від пуску за схемою «зірка-трикутник», при цьому струм статора електродвигуна обмежується значенням (2..3) $I_{ном}$.

На рис. 5.5а показана структура насосної станції з одним пристроєм частотного регулювання (ПЧ) та пристроєм плавного пуску (ППП) для кожного насоса. На рис. 5.5б представлена структура з одним ПЧ і одним ППП для групи насосів.

Основною перевагою цього методу є забезпечення поступового запуску кожного насоса, що дозволяє уникнути гідроударів і усунути кидки струму в мережі живлячої напруги.

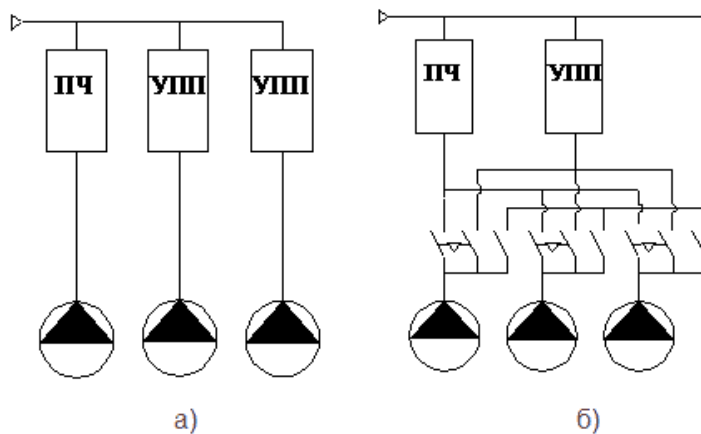


Рисунок 5.5 - Структурна схема пуску додаткових насосів із застосуванням ПЧ і софтстартерів.

Основні недоліки схеми, зображеної на рис. 5.5а, включають:

- 1) Апаратну надмірність, яка підвищує вартість насосної станції.
- 2) Втрату функції частотного регулювання системи управління при відмові насоса, що працює від пристрою частотного регулювання (ПЧ).
- 3) Зниження показників надійності через збільшення кількості пристроїв плавного пуску (ППП).
- 4) Неможливість резервування відмови пристрою плавного пуску.
- 5) Неможливість реалізації схеми автоматичного чергування всіх насосів для забезпечення рівномірності використання їх ресурсу.

Схеми, які представлені на рис. 5.5б, мають такі характеристики:

- 1) Збільшення елементів комутації насосів призводить до зниження надійності системи управління.
- 2) Відсутність захисту пристрою частотного регулювання (ПЧ) від замикання його вихідних ключів на мережу живлячої напруги є критичною умовою відмови перетворювача.

Загальні недоліки обох схем включають:

- 1) Перегрів обмоток електродвигунів при пуску з підвищеним ковзанням через зниження моменту обертання та несинусоїдальність живучої напруги.

2) Обмеження кількості пусків додаткових насосів. Наприклад, пристрої плавного пуску потужністю більше 4 кВт забезпечують не більше 20 пусків додаткових насосів на годину тривалістю пуску 6-8 секунд через перегрів тиристорних ключів.

Таким чином, схема 5.5а дозволяє реалізувати не більше 30 пусків, схема 5.5б - не більше 15 пусків додаткових насосів протягом години. При часі пуску першого додаткового насоса 16-18 секунд, зупинці першого насоса 12-16 секунд кількість пусків і зупинок кожного додаткового насоса може перевищувати 120 циклів на годину при роботі системи підвищення тиску в нестійких зонах характеристик.

Використання пристрою плавного пуску (ППП) для плавної зупинки кожного насоса ще більше зменшить кількість циклів пуску кожного насоса протягом години. Застосування PPP в схемі управління призводить до погіршення точності підтримки тиску в напірній магістралі. Це може викликати втрати через підвищення напору з одного боку та небажане зниження напору в ключових точках з іншого боку.

Пуск кожного додаткового насоса від перетворювача частоти має свої переваги. Можливість плавного пуску кожного насоса дозволяє уникнути кидків струму в мережах живлячої напруги і гідроударів в напірних магістралях. Цей метод пуску дозволяє мінімізувати апаратні витрати в насосних станціях, забезпечити рівномірне використання ресурсів всіх насосів і забезпечити функціональне резервування перетворювача частоти при його відмові через прямий пуск і зупинку насосів за рівнем тиску в напірній магістралі. Структура системи комутації насосів для схеми управління з одним перетворювачем частоти представлена на рис. 5.5.

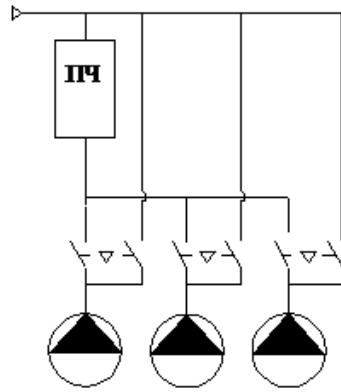


Рисунок 5.6 - Структура системи комутації насосів з одним ПЧ в схемі управління.

Реалізація даного методу стає важливою через необхідність вирішення двох завдань:

- спершу, перемикання насоса, який керується перетворювачем частоти (ПЧ), до мережі подачі напруги,
- подруге, запуск наступного за пріоритетом насоса від ПЧ.

Механічні ($M = f(S)$) і електромеханічні ($I_1 = f(S)$) характеристики електродвигуна насоса при перемиканні від ПЧ до мережі живлячої напруги представлені на рис. 5.7.

Обертання насоса перетворювачем частоти перед підключенням до мережі відбувається з номінальними значеннями частоти обертання $n_{ном}$ та моменту $M_{ном}$ при номінальному значенні ковзання $S_{ном}$. Коли обмотки електродвигуна відключаються від ПЧ, електродвигун переходить у генераторний режим, а його ковзання змінює знак і приймає значення $-1 < -S_k < -S_{кр}$. Величина ковзання $S_k < 0$ в генераторному режимі при відключенні живлячої напруги ПЧ залежить від інерційності електродвигуна і насоса, обумовленою масою і діаметром ротора електродвигуна і робочого колеса насоса. Очевидно, чим потужніший і, відповідно, інерційніший електродвигун і насос, тим ближче точка $-S_k$ наближається до значення -1 , і тим більше інтервал часу повної зупинки насоса t_a, t_δ (рис.5.7).

Зі збільшенням інтервалу часу підключення насоса до мережі живлячої напруги з положення його обертання за значення t_δ може виникнути повна

зупинка насоса. У цьому випадку ковзання досягає значення $S = 1$. Підключення насоса до мережі живлячої напруги при $S = 1$ призводить до переходу моменту обертання на валу насоса від початкового значення M_0 до номінального $M_{ном}$ протягом часу прямого пуску ($t_{пуска} \leq 0,06$ секунд) через значення $M_{макс дв}$ (рис. 5.7). Це спричинює виникнення гідроударів в напірній магістралі.

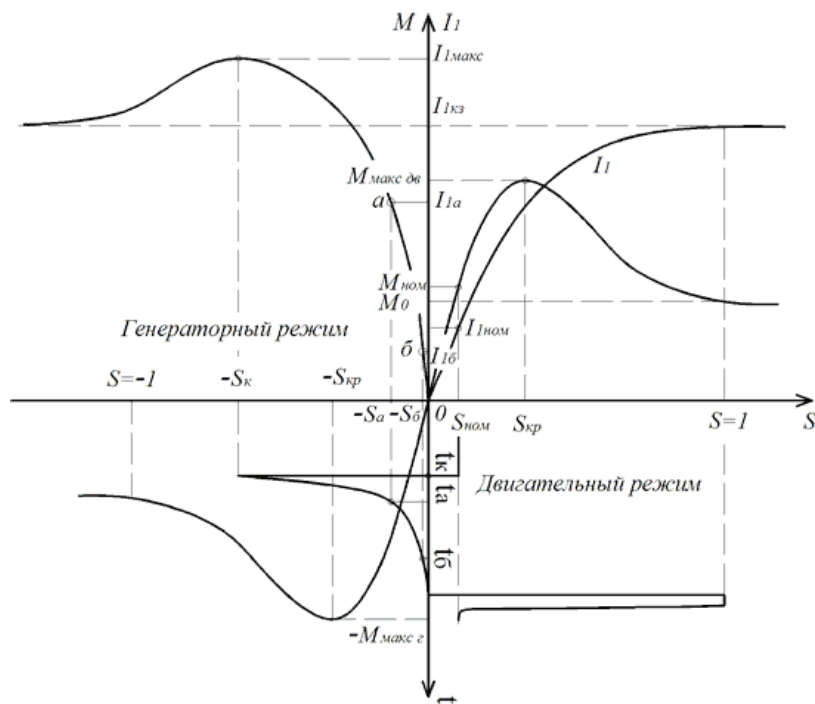


Рисунок 5.7 - Механічна $M = f(S)$ і електро механічна $I1 = f(S)$ характеристики електроприводу насоса:

$M_{макс дв}$ - максимальне значення моменту обертання в режимі двигуна відповідно значенню ковзання $S_{кр} > 0$; $M_{ном}$ - номінальне значення моменту обертання відповідно номінальному ковзанню $S_{ном}$; M_0 - пусковий момент при ковзанні $S = 1$; $M_{макс Г}$ - максимальний момент опору в генераторному режимі відповідно значенню ковзання $-S_{кр} < 0$; $I_{1кз}$ - значення струму короткого замикання при ковзанні $S = 1$; $I_{1макс}$ - максимальна величина струму статора при $S < 0$ в режимі генергатора; $S_к$ - ковзання в момент часу $t_к$ відключення напруги живлення ПЧ; $S_а$, $S_б$ - ковзання в момент часу $t_а$ і $t_б$ підключення насоса до живлячої мережі.

Для розглянутого методу пуску інтервал часу t_b -та значно більший, ніж у випадку методу пуску "зірка - трикутник", тобто $t_b - t_a \gg t_2 - t_1$. Таким чином, для реалізації цього методу пуску не потрібні додаткові апаратні витрати.

На рис. 5.8 зображена осцилограма фазної напруги обмотки статора насоса потужністю 11 кВт під час його відключення від перетворювача частоти та подальшого підключення до мережі живильної напруги. При відключенні двигуна від перетворювача він переходить у генераторний режим завдяки залишковому намагнічуванню обмоток статора та інерційному обертанню ротора. Електромагнітне поле обмоток поступово вимикається з відключенням ротора електродвигуна насоса в режимі "самовибігу".

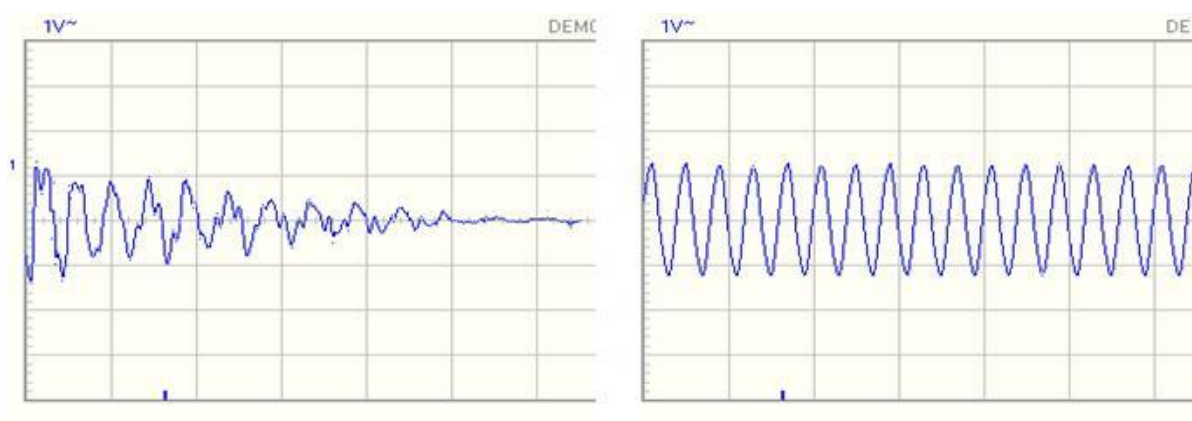
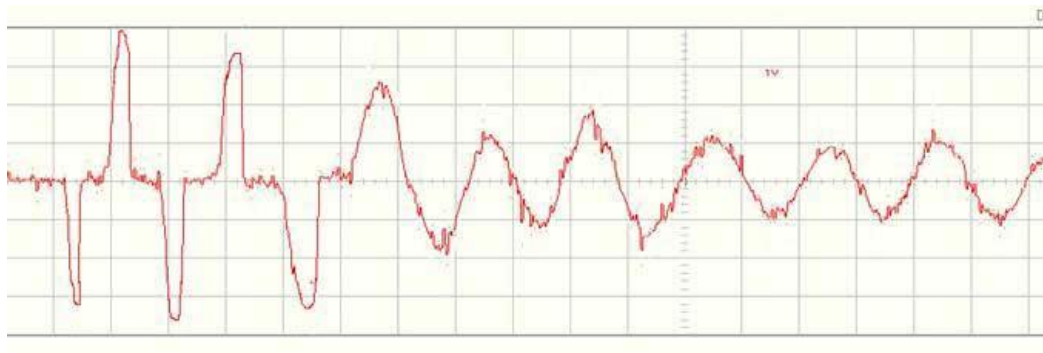
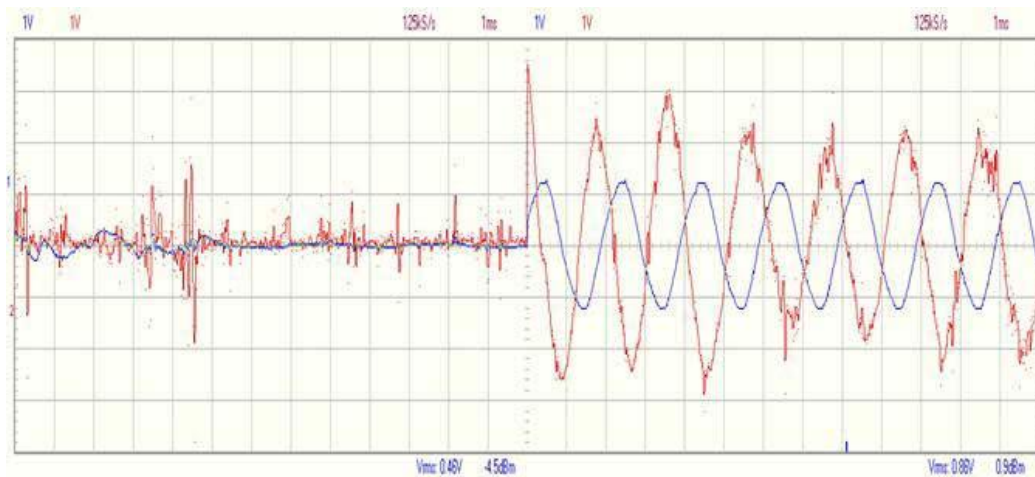


Рисунок 5.8 - Осцилограми напруги обмоток електродвигуна насоса $P = 11$ кВт при відключенні живлячої напруги

На рис. 5.9 наведені осцилограми активного струму насоса потужністю 11 кВт під час його перемикання від перетворювача частоти до мережі живильної напруги для різних значень часу перемикання.



а) $t_{\text{перемикання}} = 0,20$ секунд



б) $t_{\text{перемикання}} = 0,34$ секунди

Рисунок 5.9 – Осцилограми перемикання від ПЧ до мережі живлячої напруги

Аналіз осцилограм свідчить, що при підключенні насоса до мережі живлячої напруги після роботи від ПЧ, кидок активного струму статорних обмоток насоса зменшується зі значення $3I_{\text{ном}}$ до $1,5I_{\text{ном}}$ при зменшенні часу перемикання від 0,2 до 0,34 секунди (відповідає I_{1a} і $I_{1б}$ на діаграмі рис. 5.7, від t_a до t_b). Після перемикання регульованого ПЧ насоса до мережі живлячої напруги, пуск наступного за пріоритетом додаткового насоса проводиться від ПЧ згідно з заданою рампою до частоти обертання, яка визначається процесом регулювання.

Отже, оптимальним методом запуску додаткових насосів в насосних станціях підвищення тиску з одним ПЧ в схемі управління є запуск кожного додаткового насоса від ПЧ після перемикання регульованого насоса зі стану

обертання до мережі живлячої напруги. При цьому необхідно дотримуватися часових інтервалів між відключенням насоса від ПЧ і його подальшим підключенням до мережі живлячої напруги. Регулювання часу перемикання насоса визначається потужністю електродвигуна насоса і повинно бути налаштовано індивідуально під час налагодження системи підвищення тиску.

Плавний пуск додаткових насосів, за умови "безударного" включення регульованого насоса до мережі живлячої напруги, використовуючи кінетичну енергію його обертання, сприяє зниженню гідроударів і кидків струму в електричних мережах. Це забезпечує відсутність різких перепадів тиску в напірних магістралях та надійну роботу електротехнічного обладнання. Покращення якості перехідних процесів в електричних мережах та напірних магістралях досягається при зменшенні апаратних витрат в насосних станціях підвищення тиску.

6 ВИЗНАЧЕННЯ ЗАКОНІВ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИМИ ПРИВОДАМИ НАСОСНИХ АГРЕГАТІВ З ТОЧНИМ ЗНАЧЕННЯМ ПРОДУКТИВНОСТІ

При розв'язанні завдання зі зменшення споживання електроенергії шляхом вибору оптимальної кількості увімкнених насосів на насосній станції залишається відкритим питання точності забезпечення продуктивності групи насосів, які працюють паралельно. Найбільш ефективним з точки зору енергоспоживання є регулювання за допомогою зміни частоти обертання робочого колеса насоса.

Розглянемо функціонування групи насосів, де один із них регулюється за допомогою зміни частоти живлення його двигуна. Згідно з [9], для регульованих насосів, які працюють у паралельній групі і мають відмінні характеристики, необхідно розподіляти навантаження між ними та визначати області їх використання для ефективної роботи.

Використаємо більш загальний випадок, коли насоси різної потужності мають різні характеристики. Регулювання продуктивності для потужнішого насоса відбувається зміною кількості працюючих насосів, тоді як для менш потужного це відбувається за допомогою зміни частоти обертання одного насоса.

Для забезпечення паралельної роботи відомої кількості увімкнених насосів необхідно досягти певного значення сумарної продуктивності. Припустимо, що насосна станція обладнана вентильними насосами з характеристиками, що мають максимум (більш загальний варіант, який легко перетворити на пологі напірно-витратні характеристики). Характеристики для вентильного насоса апроксимуються поліномом другого порядку [9].

Регулювання продуктивності станції в "малому" здійснюється шляхом зміни частоти обертання робочого колеса одного насоса за допомогою зміни частоти напруги живлення його привідного електродвигуна.

У цьому випадку взаємодія насосів визначатиметься системою рівнянь, доповненою рівнянням для насоса з регульованим приводом. Зазначено, що при паралельній роботі в групі насосів різної потужності регулювання продуктивності слід проводити за допомогою насоса меншої потужності. Отже, в якості регульованого обирається насос другого типу.

Спільна робота насосної агрегації при регулюванні продуктивності одного з них буде визначатися системою рівнянь:

$$\begin{cases} H = k_{y1}^2 A_1 + B_1 k_{y1} Q_1 + C_1 Q_1^2; \\ H = k_{y2}^2 A_2 + B_2 k_{y2} Q_2 + C_2 Q_2^2; \\ H = A_2 v^2 + B_2 v Q_3 + C_2 Q_3^2; \\ H = H_c + R_c Q^2; \\ Q = m Q_1 + n Q_2 + Q_3. \end{cases} \quad (6.1)$$

де v – відносна швидкість обертання регульованого насоса, в. од.; Q_3 – продуктивність регульованого насоса в м³/год; m – кількість працюючих насосів першого типу; n – кількість працюючих насосів другого типу, без врахування регульованого насоса.

Після вирішення системи рівнянь (6.1) ми отримаємо величини продуктивностей всіх насосів, які забезпечують задоволення потреб споживача у воді, а також визначимо спільну роботу насосів на напірно-витратний графік:

– для насоса першого типу

$$Q_1(Q) = \frac{1}{2C_1} \left(-k_{y1} B_1 + \sqrt{k_{y1}^2 B_1^2 + 4C_1 H_c + 4C_1 R_c Q^2 - 4C_1 k_{y1}^2 A_1} \right);$$

– для нерегульованих насосів другого типу

$$Q_2(Q) = \frac{1}{2C_2} \left(-k_{y2} B_2 + \sqrt{k_{y2}^2 B_2^2 + 4C_2 H_c + 4C_2 R_c Q^2 - 4C_2 k_{y2}^2 A_2} \right);$$

– для регульованого насоса

$$Q_3(Q, m, n) = Q - \frac{m}{2C_1} \left(-k_{y1} B_1 + \sqrt{k_{y1}^2 B_1^2 + 4C_1 H_c + 4C_1 R_c Q^2 - 4C_1 k_{y1}^2 A_1} \right) - \frac{n}{2C_1} \left(-k_{y2} B_2 + \sqrt{k_{y2}^2 B_2^2 + 4C_2 H_c + 4C_2 R_c Q^2 - 4C_2 k_{y2}^2 A_2} \right) \quad (6.2)$$

Для полегшення виразу відносної швидкості обертання введемо певні заміни:

$$K_1(Q) = \sqrt{k_{y1}^2 B_1^2 + 4C_1 H_c + 4C_1 R_c Q^2 - 4C_1 k_{y1}^2 A_1}, \quad (6.3)$$

$$K_2(Q) = \sqrt{k_{y2}^2 B_2^2 + 4C_2 H_c + 4C_2 R_c Q^2 - 4C_2 k_{y2}^2 A_2}. \quad (6.4)$$

З урахуванням виразів (6.3) та (6.4) відносна швидкість обертання регульованого насоса під час його спільної роботи з іншими нерегульованими насосами на напірно-витратному графіку матиме наступний вигляд:

$$\begin{aligned} v(Q, m, n) = & \frac{1}{4C_1 C_2 A_2} \cdot \left(K_2(Q) B_2 C_1 n - B_2^2 C_1 n k_{y2} - 2B_2 C_1 Q C_2 - m C_2 k_{y1} B_1 B_2 + \right. \\ & + m C_2 K_1(Q) B_2 + \left(4B_2^2 C_1^2 Q^2 C_2^2 - 16C_2^3 A_2 m^2 H_c C_1 + 16C_2^2 A_2 C_1^2 R_c Q^2 - \right. \\ & - 16C_2^2 A_2 C_1^2 n^2 R_c Q^2 - 16C_2^3 A_2 C_1^2 Q^2 - 16C_2^2 A_2 C_1^2 n^2 H_c + 16C_2^2 A_2 C_1^2 H_c - \\ & - 16C_2^3 A_2 m^2 R_c Q^2 C_1 + 4m^2 C_2^2 B_2^2 C_1 H_c + 4m^2 C_2^2 B_2^2 C_1 R_c Q^2 + 4C_1^2 n^2 B_2^2 C_2 H_c + \\ & + 4C_1^2 n^2 B_2^2 C_2 R_c Q^2 - 4B_2^2 C_1 Q C_2^2 m K_1(Q) + 16C_2^3 A_2 m Q C_1 K_1(Q) + \\ & + 8C_2^3 A_2 m^2 k_{y1} B_1 K_1(Q) + 16C_2^3 A_2 m^2 k_{y1}^2 A_1 C_1 + 2m^2 C_2^2 k_{y1}^2 B_1^2 B_2^2 + \\ & + 4B_2^2 C_1 Q C_2^2 m k_{y1} B_1 - 8C_2^3 A_2 m^2 k_{y1}^2 B_1^2 - 4m^2 C_2^2 B_2^2 C_1 k_{y1}^2 A_1 + \\ & + 16C_2^2 A_2 C_1^2 n Q K_2(Q) - 2K_2(Q) B_2^3 C_1^2 n^2 k_{y2} - 4K_2(Q) B_2^2 C_1^2 n Q C_2 - \\ & - \left(-2K_2(Q) B_2^2 C_1 n m C_2 k_{y1} B_1 - 2B_2^3 C_1 n k_{y2} m C_2 K_1(Q) + 2K_2(Q) B_2^2 C_1 n m C_2 K_1(Q) - \right. \\ & - 8C_2^2 A_2 n m C_1 K_2(Q) K_1(Q) + 8C_2^2 A_2 n m C_1 k_{y2} B_2 K_1(Q) + 8C_2^2 A_2 n m C_1 K_2(Q) k_{y1} B_1 + \\ & \left. + 8C_2 A_2 C_1^2 n^2 k_{y2} B_2 K_2(Q) - 8C_2^2 A_2 n m C_1 k_{y2} B_2 k_{y1} B_1 - 16C_2^2 A_2 C_1^2 n Q k_{y2} B_2 + \right. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& +2B_2^3 C_1 n k_{y2} m C_2 k_{y1} B_1 + 4B_2^3 C_1^2 n k_{y2} Q C_2 + 2B_2^4 C_1^2 n^2 k_{y2}^2 - 16C_2^3 A_2 m Q C_1 k_{y1} B_1 - \\
& - 2m^2 C_2^2 K_1(Q) B_2^2 k_{y1} B_1 + 16C_2^2 A_2^2 C_1^2 n^2 k_{y2}^2 - 12C_1^2 n^2 B_2^2 C_2 k_{y2}^2 A_2 \Big)^{\frac{1}{2}}.
\end{aligned}
\tag{6.5}$$

Отримане значення відносної швидкості обертання дає можливість забезпечити необхідну подачу станції Q для певної кількості увімкнених насосів, а отримані значення продуктивності насосів дозволяють оцінити затрати енергії на забезпечення вказаного режиму роботи. На рис. 6.1 показані відносні швидкості обертання v , продуктивність Q_3 регульованого насоса для забезпечення подачі насосної станції другого підйому.

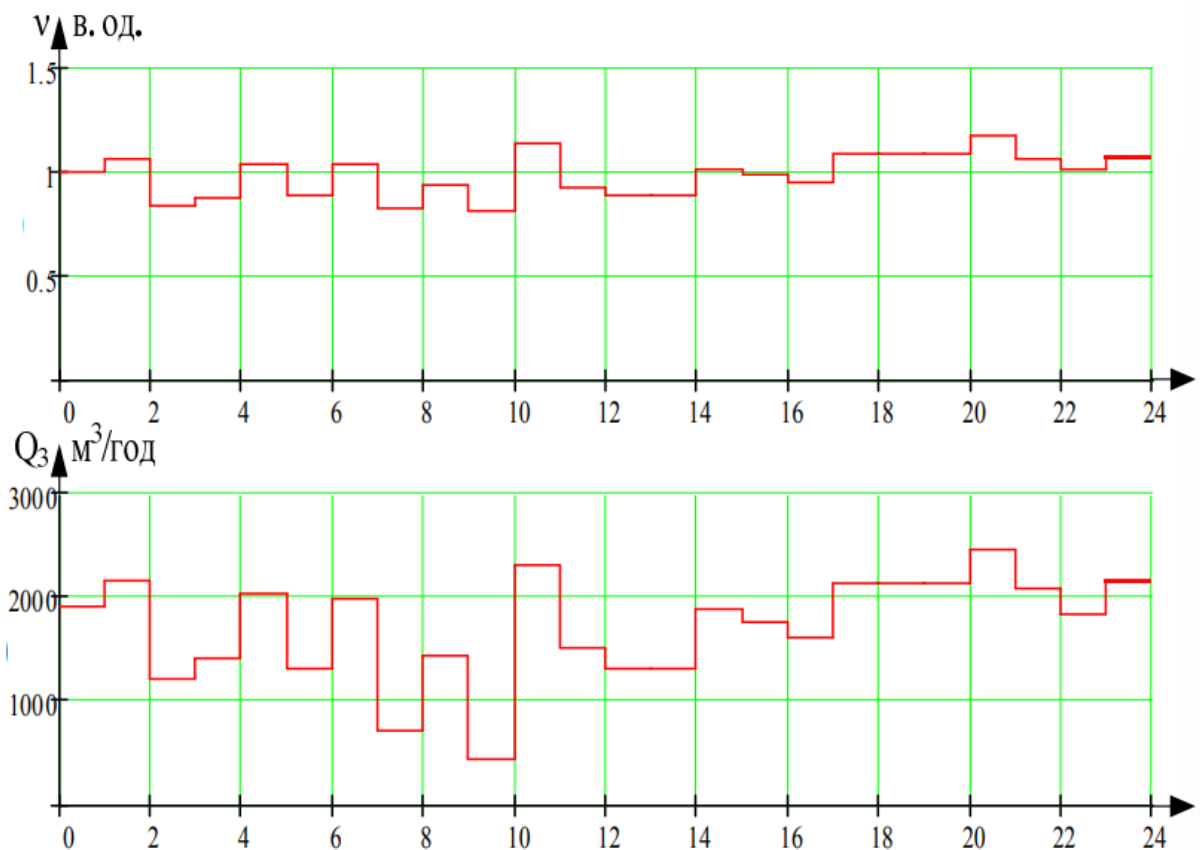


Рисунок 6.1 - Відносна швидкість обертання двигуна регульованого насоса (v) та його продуктивність (Q_3) для насосної станції другого підйому.

Для насосної станції з трьома насосами першого типу та двома насосами другого типу отримані значення продуктивностей нерегульованих насосів матимуть вигляд, зображений на рис. 6.2.

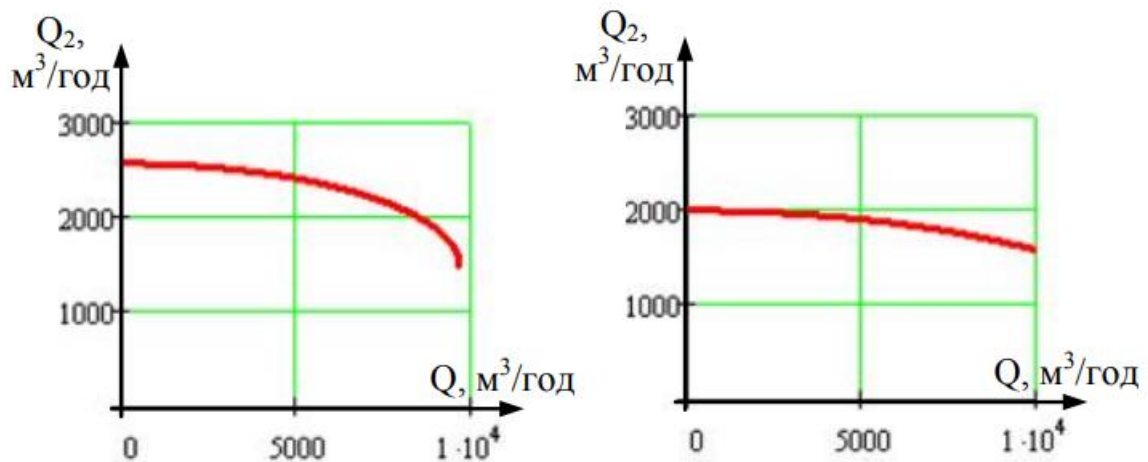


Рисунок 6.2 - Продуктивність насосів першого типу (Q_1) та другого типу (Q_2) при роботі на напірно-витратному графіку.

З графіків видно, що при паралельній роботі насосів двох типів насоси першого типу працюють з продуктивністю, що перевищує номінальне значення до загальної продуктивності 8585 м³/год. Перевищення продуктивності найбільше при низьких значеннях подачі, досягаючи 2578 м³/год. (129% від номінального), і зменшується поступово при збільшенні подачі.

Насоси другого типу (меншої потужності) працюють з постійно підвищеною продуктивністю. Найбільше перевищення продуктивності також спостерігається при низьких значеннях подачі, досягаючи 2003 м³/год. (160,2% від номінального), і також зменшується при зростанні подачі.

Подача та швидкість обертання регульованого насоса залежать від необхідного значення загальної продуктивності та кількості активних насосів. Розглянемо три можливі комбінації увімкнення насосів:

- регульований насос та один нерегульований;
- регульований насос та два нерегульованих;
- регульований насос та три нерегульованих.

При цьому продуктивність та швидкість обертання регульованого насоса будуть мати ступеневий вид. Кожна ступінь відповідає певній кількості активних нерегульованих насосів.

Відобразимо вказані залежності для насосної станції другого підйому при різних кількостях активних насосів на одній системі координат. На рис. 6.3 показано залежність відносної швидкості обертання двигуна регульованого насоса, а на рис. 6.4 - продуктивності цього насоса.

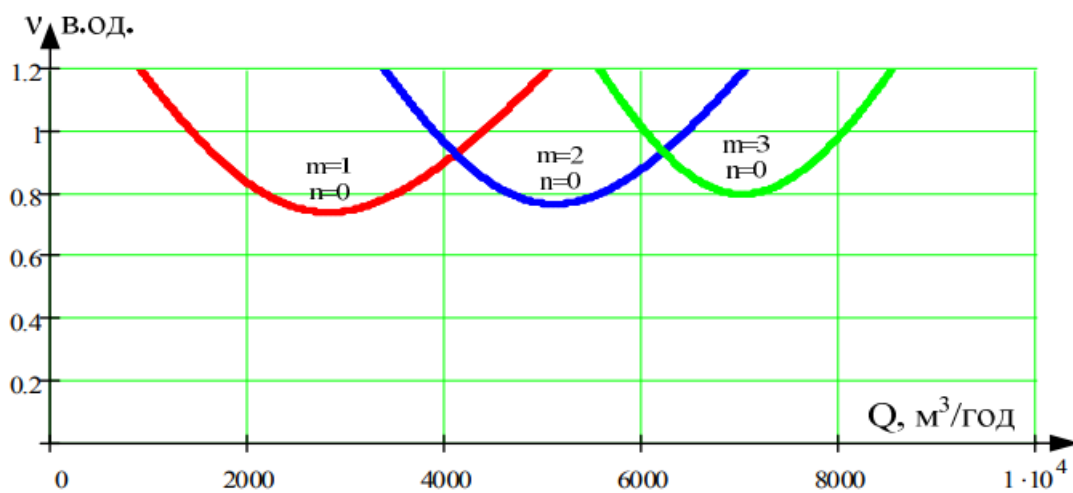


Рисунок 6.3 - Відносна швидкість обертання двигуна регульованого насоса

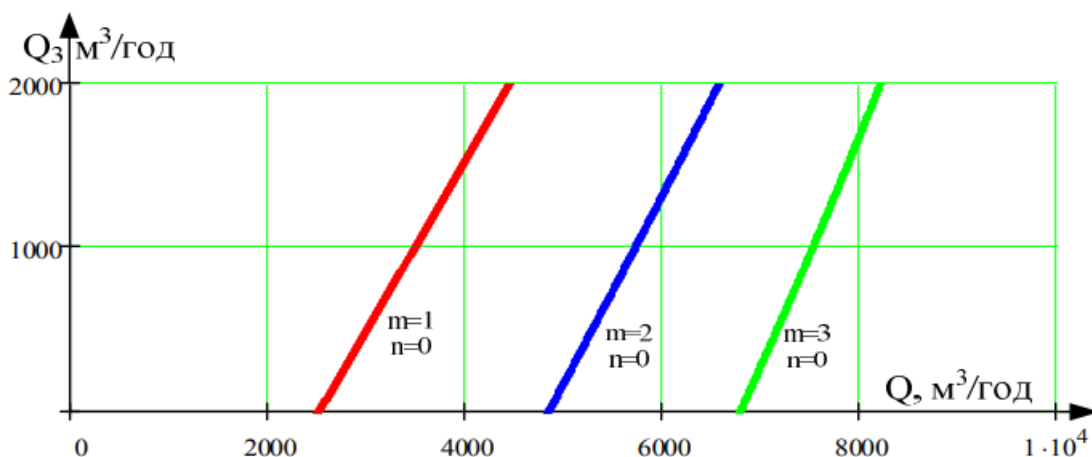


Рисунок 6.4 - Продуктивність регульованого насоса при сумісній роботі з нерегульованими насосами на мережі водопостачання.

Важливо відзначити, що при роботі з продуктивністю від 0,3 до 0,5 номінального значення [9], насос відзначається підвищеною вібрацією, виникають нестационарні осьові та радіальні сили, які негативно впливають на опорні та ущільнюючі вузли насоса. Для насосів з зростаючою частиною характеристики спостерігається явище помпажу. Оптимальним робочим діапазоном для насоса вважається його ефективна праця при продуктивності від 0,7 до 1,2 від оптимального значення [9].

При взаємодії нерегульованих насосів їх продуктивність працює на значеннях, які перевищують нормальні. Продуктивність регульованого насоса змінюється майже лінійно відносно необхідної продуктивності Q . З графіків стає видно, що зі збільшенням кількості активних насосів область зміни швидкості регульованого насоса зменшується.

Отже, внаслідок теоретичних досліджень системи постачання води в напірну мережу, що включає кілька насосів, з одним із них, що регулюється за частотою обертання, був визначений закон зміни швидкості обертання двигуна цього насоса. Дотримання цього закону дозволить забезпечити точне значення продуктивності групи насосів, що працюють паралельно.

Отримані значення подачі насосів дозволяють оцінити витрати енергії, необхідні для забезпечення роботи в такому режимі. Знаходячи продуктивність та швидкість обертання регульованого насоса, ми можемо розрахувати його коефіцієнт корисної дії протягом доби. Підставивши ці значення, разом із продуктивностями та тиском, ми знайдемо потужності, які споживатиме регульований привід насоса щогодини. При розрахунках введемо припущення про постійність коефіцієнта корисної дії двигуна. Додавши споживану потужність всіма електричними двигунами, які включені, можна отримати загальну потужність, яку споживає станція протягом доби при регулюванні продуктивності за допомогою зміни кількості працюючих насосів та їх подачі.

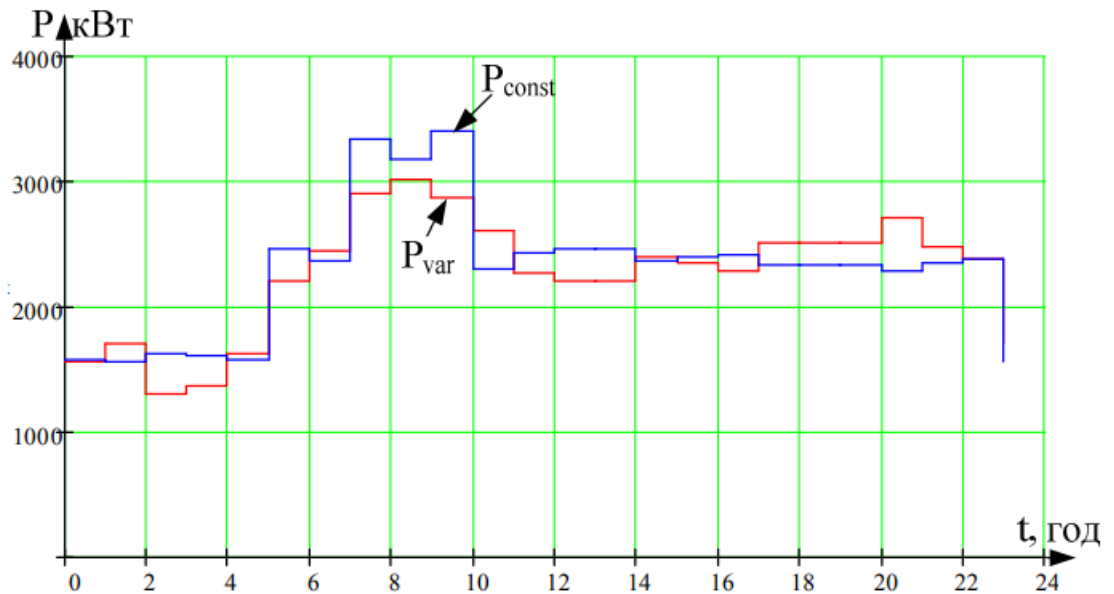


Рисунок 6.5 - Сумарна потужність, яку споживають двигуни насосної станції другого підйому.

На рис. 6.5 використані наступні позначення: P_{var} – потужність, яку споживають двигуни насосної станції при регулюванні швидкості обертання одного з них; P_{const} – потужність, яку споживають двигуни насосної станції при зміні кількості працюючих насосів. Додавши отримані значення потужності та помноживши їх на час, ми можемо знайти кількість електроенергії, яку споживають двигуни насосної станції протягом доби:

$$E_{var} = \sum_{i=0}^{23} \sum_{j=1}^5 E_{ij} = 5,399 \cdot 10^4 \text{ (кВт·добу)}.$$

При регулюванні тільки зміною кількості працюючих двигунів різниця становитиме:

$$E_{const} - E_{var} = 5,502 \cdot 10^4 - 5,399 \cdot 10^4 = 1,01 \cdot 10^3 \text{ (кВт·добу)}.$$

Так, застосування регульованого електроприводу для одного насосного агрегату дозволяє зменшити загальне споживання енергії групою кількох насосів під час регулювання продуктивності станції. На насосній станції другого підйому це може призвести до зменшення споживання енергії на 1,01 МВт·добу. Зазначений підхід може бути застосований як до насосних

станцій із насосами різних характеристик, так і до станцій з різною кількістю працюючих насосів.

Таким чином, необхідне значення обсягу води, який подається насосною станцією (НС), забезпечується певною кількістю увімкнених насосів, серед яких $m+n$ є нерегульованими, а один регульований. Регулювання відбувається за допомогою зміни частоти обертання робочого колеса насоса меншої потужності, сприяючи при цьому сумісній роботі насосів. Шляхом регулювання швидкості обертання двигуна регульованого насоса відповідно до закону (6.5) досягається підтримання на його виході відповідного тиску та продуктивності, що забезпечує узгоджену роботу нерегульованих насосів.

7 ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ СИСТЕМ КЕРОВАНОГО РУШАННЯ

7.1. Оцінка впливу впровадження систем керованого рушання на збільшення терміну служби ізоляції електричних машин.

Тривалість терміну служби ізоляції електричного двигуна визначається за формулою:

$$B = C \cdot e^{-b\vartheta}, \quad (7.1)$$

де B і C - параметри, що мають розмірність часу (рік, місяць, день, години, секунди);

b - коефіцієнт, який характеризує становище і фізичні особливості ізоляції при незмінній температурі ϑ . Приймаємо $b = 0.069^\circ \text{C}^{-1}$.

Знос ізоляції за одиницю часу при незмінній температурі $\vartheta^\circ \text{C}$

$$\xi = \frac{1}{B} = \frac{1}{C} \cdot e^{b\vartheta}, \quad (7.2)$$

де ξ - параметр, який вимірюється розмірністю час^{-1} .

Для розрахування відносного збільшення або зменшення терміну служби ізоляції використовуємо безрозмірну величину $\xi C = z$.

Так, наприклад, знос ізоляції протягом одного року за відсутності перевантажень (при $\vartheta_{\text{ном}} = 120^\circ \text{C}$) і при щоденній роботі АД:

$$z_{\text{ном}} = e^{b\vartheta} \cdot D \cdot C^\Sigma = 122,7 \cdot 10^9, \quad (7.3)$$

де $C^\Sigma = 24 \cdot 3600$ - число секунд за одну добу роботи АД при номінальному режимі;

$D = 365$ - число днів роботи АД на протязі року.

Термін служби ізоляції електричного двигуна при відсутності перевантажень, відповідно рівнянь (7.1) і (7.2), визначається як обернено-пропорційна величина:

$$\frac{1}{Z_{ном}} = 8,15 \cdot 10^{-12}. \quad (7.4)$$

Внесемо ряд припущень:

– оскільки при кожній спробі пуску час перевантаження $t_{пер}^N$ значно менший за постійний час нагріву τ , а час між спробами пуску невеликий, приймемо, що відбувається лише одна спроба пуску протягом заданого періоду:

$$t_{пер}^{\Sigma} = t_{пер}^1 + t_{пер}^2 + t_{пер}^3 + t_{пер}^4 = 10 \text{ з};$$

$k = 5$ – кратність пускового струму відносно номінального ;

$\tau = 150 \text{ с}$ – постійна часу нагріву ;

$\vartheta_{ном} = 120^\circ \text{ С}$ – температура обмоток при номінальному режимі ;

Нехтуючи тепловіддачею протягом короточасних перевантажень, визначимо знос ізоляції протягом періоду нагріву струмом $I_{\Pi} = k \cdot I_{ном}$:

$$Z_{нагр} = \int_0^{t_{пер}} e^{\left[\vartheta_{ном} + \Delta(\Delta\vartheta)_{пер} \frac{t}{t_{пер}} \right]} dt = \frac{t_{пер} e^{b\vartheta_{ном}}}{b\Delta(\Delta\vartheta)_{пер}} \left[e^{b\Delta(\Delta\vartheta)_{пер}} - 1 \right], \quad (7.5)$$

де $\Delta(\Delta\vartheta)_{пер}$ - зростання перевищення температури протягом часу перевантаження $t_{пер}^{\Sigma}$.

Визначимо зростання перевищення температури обмоток статора відповідно навколишнього середовища по рівнях:

$$\Delta(\Delta\vartheta)_{пер} = \Delta\vartheta_{пер} - \Delta\vartheta_{нач} = \frac{k_R \cdot J_{ном}^2}{150} (k^2 - k_{нач}^2) \cdot t_{пер}^{\Sigma}, \quad (7.6)$$

де k_R - коефіцієнт, який враховує збільшення активного опору шляхом витіснення струму (при перевантаженнях, зменшуючих швидкість не більше ніж на 10-20%, $k_R \approx 1$, при нерухомому роторі $k_R = 3$);

$k_{\text{нач}}$ - початкова величина кратності пускового струму відносно номінального (при номінальному режимі $k_{\text{нач}} = 1$, при нерухомому роторі $k_{\text{нач}} = 0$);

$J_{\text{ном}}$ - номінальна щільність струму, приймається $J_{\text{ном}} = 5 \text{ А/мм}^2$.

При $k = 5, k_{\text{нач}} = 0, k_R = 3, J_{\text{ном}} = 5 \text{ А/мм}^2, t_{\text{пер}}^{\Sigma} = 10 \text{ с}$ отримуємо:

$$\Delta(\Delta\vartheta)_{\text{пер}} = \frac{3 \cdot 5^2}{150} (5^2 - 0) \cdot 10 = 125^\circ \text{C}.$$

Знос ізоляції протягом охолодження визначається згідно виразу:

$$z_{\text{охл}} = \frac{\tau \cdot e^{b\vartheta_{\text{ном}}}}{b\Delta(\Delta\vartheta)_{\text{пер}}} \left[\left[e^{b\Delta(\Delta\vartheta)_{\text{пер}}} + 4e^{\frac{b\Delta(\Delta\vartheta)_{\text{пер}}}{2}} - 5 \right] \right] \quad (7.7)$$

Сумарний знос ізоляції протягом одного циклу нагріву і охолодження обмотки двигуна:

$$z = z_{\text{нагр}} + z_{\text{охл}} = \frac{\tau \cdot e^{b\vartheta_{\text{ном}}}}{b\Delta(\Delta\vartheta)_{\text{пер}}} \times \times [4e^{b\Delta(\Delta\vartheta)_{\text{пер}}} + e^{b\Delta(\Delta\vartheta)_{\text{пер}}} (1 + \frac{t_{\text{пер}}}{\tau}) - 5 - \frac{t_{\text{пер}}^{\Sigma}}{\tau}] \quad (7.8)$$

Якщо прийняти, що перевантаження буває один раз на добу, то додатковий знос ізоляції за рік:

$$z_1 = z \cdot D, \quad (7.9)$$

де $D = 365$ - число днів роботи АД в рік.

Знос ізоляції при роботі двигуна при номінальному режимі протягом року при температурі обмоток 120°C :

$$z_2 = e^{b_9} \cdot D \cdot C, \quad (7.10)$$

де $C = 85940$ - кількість секунд роботи АД при номінальному режимі, не враховуючи час перевантажень $t_{\text{пер}}^{\Sigma} = 10 \text{ с}$ і час охолодження $3\tau = 450 \text{ с}$.

Знос ізоляції протягом року:

$$z_{\Sigma} = z_1 + z_2.$$

Термін служби ізоляції АД при перевантаженнях:

$$D_{\text{пер}}^{\Sigma} = \frac{1}{z_1 + z_2}. \quad (7.11)$$

Визначаємо термін служби і знос ізоляції двигуна за рік при використанні системи керованого рушання.

При $k = 5, k_{\text{нач}} = 0, k_R = 3, J_{\text{ном}} = 5 \text{ А / мм}^2, t_{\text{пер}}^{\Sigma} = 2 \text{ с}$ відповідно (7.6) визначимо зростання температури обмоток статора відносно навколишнього середовища:

$$\Delta(\Delta\vartheta)_{\text{пер}} = \frac{3 \cdot 5^2}{150} (5^2 - 0) \cdot 2 = 25^{\circ}\text{C}$$

Використовуючи рівняння (7.5), (7.7), (7.8) обчислюємо знос ізоляції протягом нагріву $z_{\text{нагр}}^y$, знос ізоляції протягом охолодження $z_{\text{охл}}^y$ і знос ізоляції z^y протягом циклу «нагрів-охолодження» при керованому рушанні. По (7.9), (7.10) визначається додатковий знос ізоляції при впровадженні системи керованого рушання АД z_1^y , а також річний знос ізоляції при роботі двигуна в номінальному режимі z_2^y . Загальний річний знос визначимо як

$z_{\Sigma}^y = z_1^y + z_2^y$. Термін служби ізоляції при використанні системи керованого рушання визначимо відповідно виразу (7.11) . Результати розрахунків зводимо в таблицю 7.1

Таблиця 7.1 Стан ізоляції АД за різних умов рушання електродвигуна.

Пуско- вий режим АД	Знос протягом нагріву	Знос протягом охолоджува ння	Знос протягом циклу	Знос протягом року	Термін служби ізоляції
Прямий пуск	$z_{нагр}$ $= 25,462 \cdot 10^6$	$z_{охл}$ $= 402,15 \cdot 10^6$	z $= 427,61 \cdot 10^6$	z_{Σ} $= 257,968 \cdot 10^9$	D_{Σ} $= 3,624 \cdot 10^{-12}$
Пуск з СУТ	$z_{нагр}^y$ $= 21,094 \cdot 10^3$	$z_{охл}^y$ $= 3,46 \cdot 10^6$	z^y $= 3,48 \cdot 10^6$	z_{Σ}^y $= 127,88 \cdot 10^6$	D_{Σ}^y $= 7,82 \cdot 10^{-12}$

Відношення зносу при прямому пуску і при керованому рушанні: .
Таким чином, вживання системи керованого рушання дозволяє збільшити термін служби ізоляції електричної машини більш ніж в 2 рази при щоденних перевантаженнях під час важкого пуску.

Співвідношення зносу при прямому пуску та при керованому рушанні становить $z_{\Sigma} / z_{\Sigma}^y = 2,158$.

Отже, використання системи керованого рушання дозволяє підвищити термін служби ізоляції електричного двигуна більше ніж у 2 рази при щоденних перевантаженнях в режимі важкого пуску.

7.2. Економія електроенергії шляхом зміни пускового режиму двигуна

Економія електроенергії шляхом зміни пускового режиму двигуна обчислюється, виходячи з паспортних даних АД наступним чином:

$$C_E = (E_{nn} - E_{on}) \cdot C_{кВт} \cdot N, \quad (7.12)$$

де $C_{кВт}$ - вартість електричної енергії $C_{кВт} = 2,4 \text{ грн}$;

N - кількість насосних установок;

E_{nn} - енергія, спожита протягом року при прямих пусках;

E_{on} - енергія, спожита протягом року при полегшених пусках.

Визначимо величину E_{nn} , виходячі з кількості робочих днів в році $D = 365$, з кратністю пускового струму $k = 5$, тривалістю прямого пуску $t_{пп} = 10 \text{ с} = 0,002778 \text{ ч}$, кількістю пусків за добу $n_1 = 5$:

$$E_{nn} = \sqrt{3} \cdot I_{nn} \cdot U_{nn} \cdot \cos \phi \cdot D \cdot t_{пп} \cdot n_1; \quad (7.13)$$

де $U_{пп}$ - фазна напруга прямого пуску;

$I_{пп}$ - фазний струм прямого пуску $I_{пп} = k \cdot I_n = 5 \cdot 300 = 1500 \text{ А}$

Енергія, що споживається при прямих пусках:

$$E_{nn} = \sqrt{3} \cdot 1500 \cdot 285 \cdot 0,89 \cdot 365 \cdot 0,002778 \cdot 5 \cdot 10^{-3} = 3341,04 \text{ кВт};$$

Визначимо енергію, що споживається протягом року для режиму керованого рушання при часі пуску $t_{оп} = 2 \text{ с} = 0,000556 \text{ ч}$:

$$E_{on} = \sqrt{3} \cdot I_{on} \cdot U_{on} \cdot \cos \phi \cdot D \cdot t_{оп} \cdot n_1, \quad (7.14)$$

де $U_{оп}$ - фазна напруга керованого рушання;

$I_{оп}$ - фазний струм керованого рушання.

β - коефіцієнт, який враховує зниження напруги при частотному управлінні, $\beta = 0,45$

$$E_{on} = \sqrt{3} \cdot 1500 \cdot 0,45 \cdot 285 \cdot 0,89 \cdot 365 \cdot 0,000556 \cdot 5 \cdot 10^{-3} = 601,81 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$$

Вартість заощадженої електроенергії відповідно (7.12)

$$C_E = (3341,04 - 601,81) \cdot 2,4 \cdot 4 = 26296,61 \text{ грн.}$$

7.3. Економічний ефект, отриманий шляхом підвищення терміну служби двигуна.

За даними середньостатистичних випадків, при прямому пуску 70% аварій ведуть до капітального ремонту, а 30% - до поточного ремонту. У випадку використання пристрою полегшеного запуску, лише 35% аварій призводять до капітального ремонту, тоді як 65% вимагають середнього ремонту. Це сприяє економії ресурсів через зменшення частоти потреби в капітальних ремонтах для асинхронних двигунів.

Річні витрати на ремонт двигуна в умовах прямого пуску:

$$C_{гпп} = \frac{T_o}{T_{пп}} C_{пп}, \quad (7.15)$$

і в полегшених умовах

$$C_{гоп} = \frac{T_o}{T_{оп}} C_{оп} \quad (7.16)$$

де $T_o = 12$ - число місяців року;

$T_{пп}, T_{оп}$ - напрацювання на відмову, в місяцях в режимі прямого і полегшеного пуску;

$C_{пп}, C_{оп}$ - затрати на ремонт АД при прямому і полегшеному пуску

$C_{кап.рем.} = 8200,56 \text{ грн}$ - вартість капітального ремонту асинхронного двигуна, грн.

$C_{ср.рем.} = 2680,23$ - вартість середнього ремонту АД, грн.

$$C_{\text{зм}} = \frac{12}{4} (8200,56 \cdot 0,7 + 7680,23 \cdot 0,3) = 7195,2 \text{ грн.}$$

$$C_{\text{зон}} = \frac{12}{48} (8200,56 \cdot 0,35 + 7680,23 \cdot 0,65) = 163,8 \text{ грн.}$$

Економія коштів за рахунок підвищення терміну служби електродвигуна складе:

$$C_{\text{РΣ}} = (C_{\text{гпш}} - C_{\text{гоп}}) \cdot N, \quad (7.17)$$

де $N=4$ – число насосних агрегатів

$$C_{\text{РΣ}} = (7195,2 - 163,8) \cdot 4 = 28125,6 \text{ грн.}$$

Продовження терміну служби насосів можна досягти шляхом зменшення:

- Зносу робочих коліс насосів. Місцевий знос робочого колеса виникає внаслідок несприятливих умов роботи або неправильної геометрії проточної частини, а також відхилень геометрії від режимів експлуатації. Щоб уникнути або значно зменшити місцевий знос, необхідно виправити ці відхилення або зменшити їх до мінімуму, або обрати менш високий режим роботи.

- Кавітаційного зносу робочих коліс насосів. Кавітаційні властивості насосів характеризуються критичним запасом кавітації, при якому розпочинається кавітація. Цей запас визначається енергією, при якій повний тиск перевищує паровий тиск насиченої рідини. Якщо падіння тиску в русі рідини від входу до насоса до певної точки з мінімальним тиском дорівнює критичному запасу кавітації, відбувається кавітація. Ця точка розташована на тильній стороні лопаті близько від вхідної кромки. У вузьких міжлопатевих каналах тихохідних коліс порожнина, що утворилася, при подальшому падінні тиску на вході, займає весь поперечний перетин каналу, що спричиняє різке зниження тиску, потужності і ККД.

- Інтенсивності зношування лопатей робочого колеса.
- Зносу переднього ущільнення відцентрового насоса. Переднє ущільнення відцентрового насоса заважає об'ємним витокам. Знос проточної частини майже не впливає на характеристики насоса, а погіршення, помічене під час експлуатації, пов'язане зі зростанням об'ємних витоків.
- Кількості випадків вийдення з ладу підшипників насосного агрегату.

7.4 Економічний ефект впровадження системи керованого рушання.

Сумарний економічний ефект:

$$E_{\Sigma} = C_E + C_{P\Sigma} + C_{P\Sigma}^H + C_{II} + P \quad (7.18)$$

$$E_{\Sigma} = 26296 + 28125,6 + 38075,36 + 6533 + 5646,82 = 104676,8 \text{ грн.}$$

Річний економічний ефект:

$$\mathfrak{E}_r = \mathfrak{E}_{\Sigma} - E_H \cdot C_C, \quad (7.19)$$

де $E_H = 0,15$ - нормативний коефіцієнт капітальних вкладень;

C_C – витрати на впровадження систем полегшеного запуску АД;

$$E_e = 104676,8 - 0,15 \cdot 14252,6 = 102538 \text{ грн.}$$

Період окупності витрат на впровадження системи полегшеного запуску:

$$T_0 = 12 \cdot \frac{C_C}{E_e} = 12 \cdot \frac{14252,6}{102538} = 1,7 \text{ місяців}$$

Впровадження системи керованого рушання сприяє підвищенню ефективності та енергозбереженню електромеханічної системи, сприяє поліпшенню енергетичних показників електронасосної установки на етапі запуску. Економічний вигідний результат досягається за рахунок зменшення

витрат на обслуговування електромеханічної системи та скорочення обсягу спожитої енергії.

Розрахунки економічної ефективності показують, що використання пристрою для покращення пускових характеристик призводить до щорічної економії в 105 тис.грн та термін окупності устаткування складає 1,7 місяці.

8 ОХОРОНА ПРАЦІ

8.1. Профілактичні заходи для забезпечення електробезпеки під час технічного обслуговування електроустановок.

Виконання вимог щодо безпеки праці та технічних стандартів є обов'язковим для працівників, які проводять технічне обслуговування електроустановок. Роботи з ремонту та технічного обслуговування виконуються на приладах і пристроях, розташованих на панелях релейного захисту та автоматики (РЗА), а також на масляних вимикачах (МВ), роз'єднувачах, короткозамкнутиках, їхніх приводах, газових захистах трансформаторів струму (ТС) і напруги (ТН), а також на їхніх колах і колах вторинної комутації.

Основною метою виконаних робіт є перевірка відповідності вказаних приладів і пристроїв необхідним параметрам і забезпечення їх безперебійної роботи. Ці вимоги визначені в "Правилах безпечної експлуатації електроустановок споживачів" і "Правилах технічної експлуатації електроустановок споживачів", які надалі позначаються як "ПБЕЕС" і "ПТЕЕС".

8.2. Перелік інструкцій з технічного обслуговування, обладнання і директивних матеріалів.

Під час виконання робіт електромонтер повинен використовувати наступні нормативні документи і інструкції:

1. ПТЕЕС – правила технічної експлуатації електроустановок споживачів (2006 р.);
2. ПБЕЕС – правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів;
3. Норми устаткування електроустановок "ПУЕ";
4. Збірка директивних матеріалів. Електрична частина;

5. Методичні вказівки до "Правил технічного обслуговування пристроїв релейного захисту, електроавтоматики, дистанційного керування і сигналізації електростанцій і ліній електропередачі 35-330 кВ;
6. Інструкція з перевірки пристроїв релейного захисту й автоматики;
7. Програма і методика випробувань (ПМВ).

8.3. Перелік схем і пристроїв електроустаткування.

Відповідно до вимог ПТЕЕС роботи в колах пристроїв релейного захисту здійснюються за виконавчими схемами. Виконавчі схеми, необхідні для проведення робіт, обираються з існуючого набору схем, що додаються до пристроїв релейного захисту й автоматики. При використанні приладів і необхідного електроустаткування використовуються схеми, прикріплені до інструкцій приладів, або схеми, виготовлені безпосередньо на них (на кришках приладів).

8.4. Права, обов'язки і відповідальність персоналу

Особи, які мають дозвіл на виконання робіт у пристроях релейного захисту та автоматики, повинні пройти спеціальну підготовку, бути старше 18 років, пройти медичний огляд і мати визнану придатність для виконання відповідних завдань. Після завершення теоретичного і практичного навчання електромонтер перевіряється на знання, після чого йому визначається відповідна група з електробезпеки. Електромонтери з 4 і 5 групою електробезпеки мають право працювати як оперативно-ремонтний персонал в електроустановках 6, 10, 35 кВ без постійного обслуговуючого персоналу. Під час виконання робіт електромонтер повинен періодично проходити інструктаж (не рідше одного разу на місяць), а також перевірку знань "ПБЕЕС" і "ПТЕЕС" (один раз на рік) і медичний огляд (один раз у 2 роки).

Під час виконання робіт слід дотримуватися таких вимог:

1. Перевірка робочого місця, включає в себе: а) Перевірку наявності достатнього освітлення для безпечного виконання робіт. б) Перевірку відсутності вологи на робочому місці. в) При виявленні масляних плям на поверхні підлоги або підставці, їх слід ліквідувати для запобігання можливих падінь персоналу. г) Діелектричні підставки, які використовуються під час робіт, повинні відповідати вимогам щодо застосування і проходження електротехнічних випробувань.

2. Підготовка робочого місця повинна відповідати вимогам з безпеки. Електромонтер, який є керівником робіт, особисто перевіряє виконання всіх заходів з безпеки (перевірка заземлення, необхідне відключення, контроль плакатів), передбачених нарядом-допуском для робіт в електроустановках чи розпорядженням.

3. Під час обслуговування пристроїв РЗА слід дотримуватися наступних вимог:

1) Всі роботи повинні виконуватися відповідно до правил і методик, зазначених у відповідних інструкціях з обслуговування устаткування і директивах.

2) Роботи в колах РЗА проводяться лише за схемами, використання пам'яті без схем заборонено.

3) Використовується тільки справне, перед використанням перевірене в лабораторних умовах і держповірене устаткування, з необхідними схемами та інструкціями. З'єднання устаткування повинні мати надійну ізоляцію та справні клемні з'єднання.

4) Електромонтер повинен використовувати інструмент з ізольованими рукоятками та перевірені електрозахисні засоби.

5) Перед початком роботи необхідно переконатися, що роботи виконуються на необхідній релейній панелі, а не на будь-якій іншій, що може призвести до аварії або помилкового відключення.

6) При необхідності виконання робіт у ввімкненому основному устаткуванні проводяться додаткові заходи для запобігання його випадкового відключення.

7) Заборонено виконувати роботи на панелях поруч із релейною апаратурою, які можуть призвести до сильного струсу релейної апаратури та спричинити помилкове спрацювання реле.

8) При перевірці кіл вимірювання, сигналізації, керування та захисту, якщо це необхідно, в електроустановках напругою вище 1000 В дозволяється залишати одного члена бригади. Якщо член бригади залишається окремо від керівника робіт, він повинен мати групу з електробезпеки не нижче 3 і отримувати необхідні вказівки з техніки електробезпеки від керівника робіт.

9) З метою забезпечення безпеки робіт усі вторинні обмотки вимірювальних трансформаторів струму і напруги повинні бути постійно заземлені. У складних схемах релейного захисту, де є група електрично з'єднаних вторинних обмоток трансформаторів струму, незалежно від їх кількості, допускається виконувати заземлення лише в одній точці. Якщо необхідно розірвати струмове коло вимірювальних приладів і реле, коло вторинної обмотки трансформатора струму перед цим має бути закорочено за допомогою спеціальних затискачів.

10) Заборонено виконувати роботи в колах між трансформатором струму і затискачами, де встановлено коротке з'єднання, які можуть призвести до відмикання кола.

11) При виконанні робіт на трансформаторах струму в їхніх вторинних колах слід дотримуватись наступних вимог безпеки:

а) Не використовувати шини первинних кіл як допоміжні струмопроводи при монтажі струмоведучих кіл чи при виконанні зварювальних робіт.

б) Підключати коло вимірювання і захисту до затискачів вказаних трансформаторів струму лише після завершення повного монтажу вторинних схем.

в) Під час перевірки полярності приладів надійно приєднувати їх до затискачів вторинної обмотки перед подачею імпульсу струму до первинної обмотки.

12) При перевірці газового захисту трансформаторів електромонтер, який оглядає газовий реле безпосередньо на трансформаторі, повинен мати на собі страхувальний пояс, який міцно закріплений на визначеному місці, згідно із зазначеними під час інструктажу вимогами. Порухення правил і інструкцій з охорони праці може призвести до проведення позачергового інструктажу чи перевірки знань електромонтера. У випадку серйозних порушень можуть бути застосовані дисциплінарні або адміністративні заходи.

Електромонтер має право наступне:

1) Запитувати технічну документацію з електроустаткування для вивчення.

2) Отримувати від оперативного персоналу інформацію про роботу устаткування, включаючи проведені перемикання і стан електрообладнання.

3) Вносити зміни до технічної документації у випадку незначних відмінностей між схемою РЗА та реальною схемою.

4) Вимагати від суміжних організацій і оперативного персоналу усунення дефектів та виконання рекомендацій з експлуатації устаткування.

5) Підписувати протоколи виконання профілактичних робіт в засобах РЗА, а також настроювання реле та іншого устаткування.

6) Мати чітке уявлення про ціль, характер і процес виконуваних робіт.

Електромонтер несе відповідальність за наступне:

1) Неналежне виконання покладених на нього обов'язків;

2) Неправильне та неповне використання наданих прав;

3) Недотримання правил охорони праці, ПБЕЕС, ПТЕЕ, Правил пожежної безпеки України та промислової санітарії;

4) Неякісне виконання робіт, що може призвести до зриву планово-попереджувального ремонту, налагоджувальних робіт, ушкодження устаткування та неправильної роботи пристроїв РЗА;

5) Надані в його розпорядження прилади, устаткування, інструмент і спецодяг;

6) Чітке виконання вимог, які висуваються відповідно до групи з електробезпеки і розряду, присвоєних електромонтеру;

7) Дотримання розпорядку робочого часу.

8.5. Оптимізація робочих процесів.

Для гарантії безперебійного функціонування електромонтер повинен володіти чітким розумінням організаційної структури, спрямованої на забезпечення надійності та безпеки роботи. Ключовим є точне виконання координації із співробітниками електротехнічного персоналу, які займаються проведенням робіт:

1) Підготовка робочого місця виконується оперативним персоналом на Головній Підстанції (ГПП) і оперативно-ремонтним персоналом на інших підстанціях і Розподільчих Пристроях (РП) підприємства за узгодженням із старшим оперативним персоналом та відповідно до вказівок наряду-допуску чи розпорядження.

2) Перевірка зібраної дослідної схеми випробувань проводиться керівником робіт.

3) Зняття заземлень, регулювання режиму роботи, а також оперативні переключення, необхідні для проведення робіт, виконуються виключно оперативним персоналом на ГПП, оперативно-ремонтним персоналом на інших Підстанціях і РП підприємства за узгодженням

(за потреби) з адміністративно-технічним персоналом - старшим оперативним персоналом.

- 4) Після завершення робіт розбір схеми та ввімкнення устаткування в роботу здійснюється оперативним або оперативно-ремонтним персоналом.

При виявленні несправностей устаткування, пристроїв та інструменту, які можуть становити загрозу для безпеки персоналу чи нормального функціонування устаткування, слід негайно повідомити про це керівника і утримуватися від початку роботи без його дозволу.

Під час виконання робіт члени бригади повинні дотримуватися вказівок керівника.

8.6. Безпека в надзвичайних ситуаціях.

У разі виникнення надзвичайної ситуації або ситуації, яка створює загрозу для життя людей, електромонтер повинен негайно відключити електрообладнання та устаткування, що перебувають у стані аварії. Також необхідно сповістити адміністративно-технічний персонал та диспетчера, і вжити заходів для ліквідації аварії та надання допомоги потерпілим. У випадку загорання електроустаткування слід відключити його від електромережі та гасити полум'я сухим піском чи азбестовою тканиною. Заборонено використовувати воду та пінні вогнегасники для гасіння електроустаткування під напругою. Гасіння електрообладнання під напругою до 1000 В дозволяється вогнегасниками ОПУ і ОУ (вогнегасник порошковий уніфікований, вогнегасник вуглекислий). Під час гасіння слід знаходитися з боку, звідки надходить свіже повітря.

Надання першої медичної допомоги.

Кожен електромонтер повинен вміти надавати першу медичну допомогу собі та своєму товаришеві в нещасних випадках:

- а) При пораненні потрібно припинити кровотечу: артеріальну – застосуванням джгута, венозну - стисненням пов'язки. Заборонено промивати

рану водою, торкатися її руками, використовувати випадкові предмети для перев'язування або видалення чужорідних частин, що потрапили в рану;

б) При отруєнні газами або враженні електричним струмом слід: звільнити потерпілого від дії електричного струму, вивести на свіже повітря, провести заходи для відновлення свідомості; у випадку зупинки дихання та серцебиття застосувати штучне дихання та непрямий масаж серця;

в) При переломах кінцівок потрібно накласти шину з дошки чи іншого доступного матеріалу.

Після надання першої медичної допомоги слід доставити потерпілого в лікарню.

ВИСНОВКИ

Кваліфікаційна робота присвячена аналізу засобів та методів формування алгоритму керування електроприводів насосних установок.

У роботі обґрунтована доцільність вживання систем керованого рушання на базі перетворювача частоти, які повинні забезпечувати реалізацію спеціальних алгоритмів руху валу, для ефективного подолання підвищеного моменту опору що виникає при рушанні.

Проведений аналіз статичних і енергетичних характеристик дозволив визначити найбільш раціональний закон частотного регулювання, який забезпечує не лише високі енергетичні показники, але дозволяє збільшити пусковий момент двигуна при роботі на знижених частотах обертання.

Запропоновані алгоритми і структура системи керованого рушання, які дозволяють розширити можливості частотно-регульованого приводу і здійснювати передстартові операції з метою зменшення моменту рушання технологічного механізму.

Розроблена математична модель системи керованого рушання, що дозволяє оцінювати ефективність розробленої системи і алгоритмів передстартової підготовки електроприводу. Отримані результати моделювання дозволяють оцінити енерговитрати і ефективність роботи системи керованого чіпання на базі перетворювача частоти.

Розрахунок економічної ефективності показав, що вживання пристрою поліпшення пускових характеристик дозволяє отримати річний економічний ефект і отримати термін окупності - 2 місяці. Економічний ефект досягається шляхом зміни пускового режиму, підвищення терміну служби насоса, зменшення витрат на ремонт електромеханічної системи і зменшення кількості споживаної енергії.

Отримані результати можуть бути використані при розробці системи керованого рушання на базі перетворювача частоти для нерегульованих електроприводів змінного струму.

Використання алгоритмів системи керованого рушання підвищує працездатність і енергоефективність електромеханічної системи, зокрема, забезпечує продовження терміну служби ізоляції АД, покращує енергетичні характеристики електроприводу на етапі рушання.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Кваліфікаційна робота магістра : метод. рекомендації до змісту, структури та оформлення кваліфікаційної роб. : для студ. спец. 141 - Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка / [уклад. П. Г. Плешков, К. Г. Петрова, Н. Ю. Гарасьова та ін.] ; М-во освіти і науки України, Центральноукраїн. нац. техн. ун-т. - Кропивницький : ЦНТУ, 2023. - 74 с.
2. Коренькова Т. В. Режими роботи насосних та вентиляторних установок із автоматизованим електроприводом: навч. посібник / Т. В. Коренькова, О. О. Сердюк, В. Г. Ковальчук. – Кременчук: Видавництво ПП Щербатих О. В., 2013. – 200 с.
3. Возняк, О.М., Штуць. А.А., Колісник М.А. Сучасні системи електроприводів. Теорія та практика. Частина 1. / Навчальний посібник. – Вінниця: ТВОРИ, 2021. – 280 с.
4. Попович М.Г. Лозинський О.Ю., Буртний В.В., Панченко Б.Я., Місюренко В.О. та ін. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи / За ред. М.Г.Поповича, О.Ю. Лозинського. – К.:Либідь 2005. –679с.
5. Теорія електропривода, під редакцією М.Г. Поповича, Київ: Вища школа, 1993. – 493.
6. Шадура В.О., Кравченко Н.В. Водоспоживання та водовідведення: навчальний посібник. – Рівне: НУВГП, 2018. 343 с.
7. Бур'ян С.О. Дослідження роботи електромеханічної системи автоматизації послідовно з'єднаних насосних установок в пакеті SIMHYDRAULICS / С.О. Бур'ян, М.В. Печеник, Г.Ю. Землянухіна, А.І. Бабарова // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Технічні науки. Випуск 204 «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України». –

Харків: ХНТУСГ, 2019. – С. 84-86.
<http://dspace.khntusg.com.ua/handle/123456789/10330>

8. Регулювання роботи насосів. URL:
https://studopedia.com.ua/1_133889_regulyuvannya-roboti-nasosiv.html

9. Метод та засоби оптимізації роботи електроприводів насосної станції водопостачання : монографія / В. В. Грабко, М. М. Мошноріз. – Вінниця : ВНТУ, 2011. – 138 с.

10. Куцик А. С., Місюренко В. О. Автоматизовані системи керування на програмованих логічних контролерів. - Львів: Видавництво Львівської Політехніки, 2015. - 200с

11. Вербовська С.О., Проблеми врахування нерівномірності водоспоживання при забезпеченні надійності системи водопостачання населених пунктів. Водопостачання, водовідведення, раціональне використання і охорона водних ресурсів. м. Рівне, 4с

12. Казачковський М. М. Автономні перетворювачі та перетворювачі частоти: навч. посіб. [Електронний ресурс] / М. М. Казачковський ; М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. – Електрон. текст. дані. – 2-ге вид., випр. та допов. – Дніпро.: НГУ, 2017. – 324 с.

13. Енергоефективність: переваги застосування частотно-регульованого приводу в насосних, вентиляційних і компресорних установках: Технічна колекція Schneider Electric, вип. № 27. 2009. - 36 с.