Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»
(повне найменування вищого навчального закладу)
Навчально-науковий інститут інформаційних технологій та робототехніки
(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))
Кафедра автоматики, електроніки та телекомунікацій
(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи

бакалавр
(ступінь вищої освіти)

на тему «Модернізація електроприводу бурового насоса типу УНБ-600»

Виконав: студент 2 курсу, групи 201-пМЕ
спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
(шифр і назва напряму підготовки, спеціальності

Бодак С.М.
(прізвище та ініціали)
Керівник Єрмілова Н.В.
(прізвище та ініціали)
Рецензент Галай В.М.
(прізвище та ініціали)

Полтава - 2021 рік

РЕФЕРАТ

кваліфікаційної роботи бакалавра
«Модернізація електроприводу бурового насоса типу УНБ-600»

Робота містить 53 сторінки, 18 ілюстрацій, 1 таблиця, 20 використаних джерел.

Ключові слова: тиристорний перетворювач, буровий насос, синхронний двигун, електропривод.

Об'єктом розроблення кваліфікаційної роботи є електропривод бурового насоса типу „УНБ-600”.

В роботі проведена модернізація електроприводу бурового насоса, при цьому електрично нерегульована система електроприводу замінена на більш сучасну систему «Тиристорний перетворювач – синхронний двигун», яка дає можливість здійснювати регулювання швидкості не вимикаючи двигун, що значно покращує енергетичні та технологічні показники роботи насоса.

Проведене математичне моделювання роботи електроприводу, за допомогою якого були досліджені характеристики системи під час пуску. Також проведені дослідження системи під час регулювання швидкості, які довели, щостворена система працездатна, всі характеристики лежать у межах норми, в перехідних режимах при регулюванні швидкості відбувається швидке встановлення основних параметрів роботи бурового насоса, що відповідає завданню.

Робота має практичну цінність і її результати після більш детальної доробки можуть бути розглянуті для використання на даній буровій установці.

Report

qualification work of the bachelor
"Modernization of the electric drive of the drilling pump like UNB-600"

The work contains 53 pages, 18 illustrations, 1 table, 20 sources used.
Key words: thyristor converter, drilling pump, synchronous motor, electric drive.
The object of development of qualification work is the electric drive of the drilling pump type "UNB-600".
The modernization of the electric drive of the drilling pump is carried out in the work, at the same time the electrically unregulated system of the electric drive is replaced by more modern system "Thyristor converter - synchronous motor" which gives the chance to carry out speed regulation without switching off the engine that considerably improves power and technological indicators.
Mathematical modeling of the electric drive operation was carried out, with the help of which the characteristics of the system during start-up were investigated. Also, studies of the system during speed control, which proved that the created system is operational, all characteristics are within normal limits, in transient modes when speed control is a rapid establishment of the basic parameters of the drilling pump that meets the task.
The work has practical value and its results after more detailed processing can be considered for use on this drilling rig.

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»
Інститут Навчально-науковий інститут інформаційних технологій та робототехніки

Кафедра Автоматики, електроніки та телекомунікацій
Ступінь вищої освіти Бакалавр
Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри автоматики, електроніки та телекомунікацій

_____ О.В. Шефер
“ 11 ” травня 2021 р.

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРУ СТУДЕНТУ

Бодаку Сергію Миколайовичу

1. Тема роботи «Модернізація електроприводу бурового насоса типу УНБ-600»
керівник роботи Єрмілова Наталя Василівна, к.т.н., доцент
затверджена наказом вищого навчального закладу від 03.03.2021 року № 158 - фа

2. Строк подання студентом проекту (роботи) 15.06.2021 р.

3. Вихідні дані до проекту (роботи) технічна документація на бурову установку типу „Уралмаш - 4Е”. Гідравлічна потужність бурового насоса 600 кВт, максимальний тиск на вході P_{max} = 20МПа, найбільша подача $Q_{max} = 75 \cdot 10^{-3}$ м^3/с, номінальна напруга бурового насоса 6000 В, температура бурового розчину від –1 до +80°С. Провести модернізацію схеми електроприводу насоса, забезпечити перерегулювання у межах 30%, час регулювання – не більше 1 сек., запас стійкості по фазі не менше 30^o.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Описання роботи бурової установки, характеристики та обладнання бурових насосів. Постановка задач на кваліфікаційну роботу. Розрахунок потужності бурового насосу. Вибір та перевірка вибору електродвигуна. Модернізація схеми електроприводу бурового насоса. Розрахунок та вибір елементів схеми. Моделювання та дослідження системи ПЧ-СД. Аналіз характеристик модернізованої системи.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових плакатів):
1) загальний вигляд бурового насоса;
2) схема керування електроприводом бурового насоса;
3) модель синхронного двигуна;
4) модель ШІМ інвертора;
5) модель електроприводу;
6) графіки характеристик системи.

6. Дата видачі завдання 11.05.2021 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Пор. №	Назва етапів кваліфікаційної роботи бакалавра	Термін виконання етапів роботи			Примітка (плакати)
1	Описання роботи бурової установки, характеристики та обладнання бурових насосів. Постановка задач на кваліфікаційну роботу.	18.05.21		25%	Пл. 1
2	Розрахунок потужності бурового насосу. Вибір та перевірка вибору електродвигуна.	26.05.21	I	50%	Пл. 2
3	Модернізація схеми електроприводу бурового насоса. Розрахунок та вибір елементів схеми.	02.06.21		60%	Пл. 4
4	Моделювання та дослідження системи ПЧ-СД. Аналіз характеристик модернізованої системи.	09.06.21		80 %	Пл. 5
5	Оформлення кваліфікаційної роботи бакалавра	15.06.21	II	100%	Пл. 6

Студент _____ Бодак С.М.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____ Єрмілова Н.В.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Зміст

Реферат……2
Report……3
Вступ..... 5
1. ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА 7
1.1 Застосування та класифікація бурових установок..... 7
1.2 Технічні характеристики бурової установкитипу Уралмаш-4Е..... 9
1.3 Характеристики та обладнання бурових насосів..... 9
1.4 Постановка задач на кваліфікаційну роботу 14
2. МОДЕРНІЗАЦІЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ БУРОВОГО НАСОСА..... 15
2.1. Перерахунок потужності приводу бурового насосу..... 15
2.2 Вибір та перевірка вибору приводного двигуна 19
2.3 Розроблення електроприводу бурового насоса..... 21
2.4 Вибір обладнання 26
2.5 Розроблення схеми керування електроприводом бурового насоса 32
2.6 Вибір апаратури..... 34
3. МОДЕЛЮВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ ПЧ-СД..... 36
3.1 Перетворення синхронної машини..... 36
3.2 Рівняння синхронної машини в осях dq..... 39
3.3 Моделювання системи..... 44
ВИСНОВКИ..... 51
ВИКОРИСТАНА ЛІТЕРАТУРА 52

Вступ

Бурова установка – комплекс бурового обладнання та споруд, які призначені для буріння свердловин. Склад вузлів бурової установки, їх конструкція визначається призначенням свердловини, умовами і способом буріння. Процес спорудження свердловин складається із повторюваних операцій: спуску бурильних труб з долотом (інструменту) у свердловину; руйнування породи на забої – буріння; нарощування колони труб по мірі заглиблення свердловини; підйому труб для заміни зношеного долота.

Для здійснення цих операцій, а також робіт по кріпленню стовбура свердловини використовують бурові установки, які представляють собою складний комплекс виробничих механізмів. У склад цього комплексу входять підйомна система з індивідуальними приводами для підйому, спуску та подачі інструмента, бурові насоси, ротор, механізми для приготування та очищення бурового розчину, вантажно-розвантажувальних робіт, забезпечення установки стисненим повітрям та ін. Основні (ротор, бурова лебідка з талевою системою та бурові насоси) і допоміжні механізми бурової установки приводяться в дію від силового привода, тип якого вибирають в залежності від умов буріння, конструкцій механізмів та інших факторів.

Концепція максимальної автоматизації бурових установок дозволяє здійснювати більшість робочих операцій процесу буріння, включаючи спуско-підйомні операції (СПО) колон бурових й насосно-компресорних труб, з найкращими експлуатаційними показниками.

Повністю автоматизований трубний маніпулятор, що керується з кабіни бурильника, дозволяє виконувати СПО без втручання оператора. Функції робочих обмежуються лише змащуванням різьбових з’єднань труб й зміною компоновок низу бурильних колон. Таким чином, для експлуатації автоматизованих бурових установок потрібна бурова бригада меншої чисельності, ніж для традиційних бурових. Така система функціонує автоматично в послідовності, що задається програмованим логічним

контролером, при цьому в оператора-бурильника зберігається можливість керувати усіма системами бурової зі свого пульта управління в кабіні.

Важливим елементом, що дозволяє експлуатувати бурові установки в автоматичному режимі, є гідравлічний силовий трубний ключ з автоматичними захватами, який розміщується позаду закріпленої частини основи мачти, регулюється по висоті і керується з пульта бурильника, обертаючись вперед і назад відносно центру свердловини для згвинчування та розгвинчування трубних з'єднань без використання ручної праці. Іншим важливим елементом таких бурових установок є можливість забезпечення автоматичного буріння з постійним навантаженням на долото або з постійною швидкістю буріння, котрі вибираються оператором бурильником зі свого пульту. Також можна встановлювати максимально можливе значення навантаження на гаку.

Привід основних виробничих механізмів може бути автономним – незалежним від енергосистеми (дизельний, дизель – електричний, газотурбоелектричний) та неавтономним – з живленням від промислових електричних мереж (електричний на змінному чи постійному струмі), також регульованим п швидкості обертання та нерегульованим. Актуальність теми полягає в тому, що настає час, коли необхідно максимально автоматизувати діючі бурові установки та модернізувати їх електроприводи для поліпшення умов буріння та покращення економічних та експлуатаційних показників цього процесу.

Метою даної роботи є модернізація електроприводу бурового насоса із заміною нерегульованого електроприводу на регульований, що забезпечить дотримування номінальних коливань тиску та витрат на виході насоса та найбільш економічну його роботу. Відповідно до поставленої мети, необхідним є вирішення ряду завдань роботи, зокрема наступні:

– провести перерахунок потужності електродвигуна;
– замінити двигун на більш сучасний, провести перевірку вибору двигуна на перевантаження;
– модернізувати схему керування електроприводом бурового насоса;
– дослідити параметри проектованої системи на якість та стійкість.

1. ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

1.1 Застосування та класифікація бурових установок

Бурові установки застосовуються для буріння неглибоких (до 25 метрів) свердловин невеликого діаметра (76-219 мм) при сейсморозвідці та інженерних вишукуваннях а також:

- буріння свердловини середньої глибини (до 600 м) – структурних та пошукових свердловин на тверді корисні копалини;
- буріння глибоких (до 6000 м) розвідувальних та експлуатаційних свердловин на нафту і газ;
- капітальний ремонт та випробовування свердловин на нафту і газ;
- буріння свердловин на воду;
- буріння вибухових свердловин на відкритих гірничих виробках і в шахтах.

За видом робіт бурові установки розподіляються:

- для експлуатаційних робіт;
- для розвідувальних робіт;
- для технічних свердловин.

За способом буріння розрізняють такі бурові установки:

- обертального буріння;
- обертального - ударного буріння;
- ударного буріння;
- вогнеструменевого буріння;
- розрядно–імпульсного буріння;

За типом приводу бурові установки діляться на:

- електричні (AC/DC) бурові установки;
- електрогідравлічні бурові установки;
- дизель-електричні бурові установки;
- дизельні бурові установки.

Нафтогазова промисловість, а особливо електробуріння, є дуже енергоємними галузями, причому основний об'єм електроенергії споживають привід бурових насосів і лебідок. Значне зростання вартості електроенергії, що отримується від джерел централізованого електропостачання, і вартості ліній електропередачі, а також тенденції переходу, що намітилися, до автономного енергопостачання з джерелами обмеженої встановленої потужності виводять на перший план завдання енергозбереження. При бурінні в нафтовій і газовій промисловості ці завдання успішно вирішуються застосуванням регульованого електроприводу.

Найближчими роками основний об'єм впровадження регульованих електроприводів на підприємствах нафто- і газодобування нашої країни буде пов'язаний з їх реконструкцією. При цьому разом із заміною зношеного або морально застарілого устаткування можлива і модернізація електроприводів шляхом доукомплектовування існуючих електричних машин і систем управління тиристорними перетворювачами і іншими компонентами регульованого електроприводу. При цьому очікувана економія електроенергії за рахунок впровадження регульованого електроприводу може скласти до 40% від очікуваної економії по усій сукупності заходів.

Практична безальтернативність регульованого електроприводу для важких і екстремальних умов експлуатації обумовлює особливу важливість створення таких електроприводів для технічних засобів освоєння континентального шельфу.

Основні напрями розвитку електроприводу технологічних установок нафтової і газової промисловості співпадають із загальною тенденцією розвитку електроприводу і на сучасному етапі характеризується усе більш широким застосуванням регульованого електроприводу і комп'ютерних засобів автоматизації при створенні нового і модернізації діючого технологічного устаткування. Слід також відмітити специфічний для нафтової і газової промисловості напрям подальшого вдосконалення електроприводу - підвищення надійності і вибухозахищеності.

1.2 Технічні характеристики бурової установкитипу Уралмаш-4Е

Бурова установка «Уралмаш-4Е» призначена для буріння нафтових та газових свердловин в електрифікованих районах на глибину до 5000 метрів.

Умовна глибина буріння свердловини при масі одного метра бурильної колони 30 кілограмів складає 5000 метрів. Допускається навантаження на гаці в процесі проведення та кріплення свердловини в 2250 кН. Максимальна швидкість підйому гака складає 5,8 метрів за секунду, мінімальна – 0,19. Максимальна частота обертання стола ротору – 232 обертів за хвилину, мінімальна – 20. Постачання бурової установки електроенергією здійснюється від мережі змінного струму 6000 В, 50 Гц.

Електроустаткування бурової установки складається з ряду самостійних систем управління приводами головних та допоміжних механізмів бурової установки:

- електроустаткування забезпечення живлення та розподілу електроенергії напругою 6000 В;
- електроустаткування забезпечення живлення та розподілу електроенергії напругою 380/220 В;
- електроустаткування бурової лебідки;
- електроустаткування бурових насосів;
- електроустаткування компресорів низького тиску;
- електроустаткування компресорів високого тиску;
- електроустаткування допоміжної лебідки;
- електроустаткування освітлення;
- електроустаткування циркуляційної системи.

1.3 Характеристики та обладнання бурових насосів

Буровий насос призначений для нагнітання бурового розчину в бурильну колону і створення циркуляції бурового розчину в свердловині у процесі буріння. Бурові насоси – основні споживачі електроенергії, на них припадає

70-80% установленої потужності двигунів усієї бурової установки. Потужність сучасних бурових насосів коливається від 300 до 3000 кВт. Для кожного класу бурової установки насос повинен мати визначену потужність, подачу й тиск.

Насоси можуть працювати при температурі навколишнього середовища ±50°С. При цьому температура бурового розчину коливається від –1 до 80°С. Буровий насос має бути пристосований до ступінчастої зміни подачі в процесі буріння в 2–3 рази. До того ж він повинен мати здатність короткочасно розвивати необхідний тиск для продавлення частинок вибуреної породи, які осідають в затрубному просторі.

Час роботи насоса – від 30 хвилин до 200 годин і більше залежно від терміну роботи долота. Термін періодичних технологічних зупинок може складати 3–15 хвилин для нарощування бурильної колони, близько 10 годин при спуску й підйомі долота з великої глибини.

Аналіз конструктивних особливостей різних типів насосів показує, що вимоги технології продавлення найбільше задовольняють поршневі горизонтальні насоси. Поршневі насоси мають потужність 32, 50, 80, 125, 190, 235, 300, 345, 475, 600, 750, 950, 1180, 1840 кВт при максимальній подачі 40–50 л/с бурового розчину й розвивають максимальний тиск 90–105 МПа при мінімальних подачах. На початку буріння свердловини тиск, що створюється насосом, невеликий. По мірі заглиблення свердловини, внаслідок збільшення гідравлічного опору труб збільшується і тиск на виході насоса. Тому, починаючи з певної глибини, подачу насоса необхідно обмежувати. При нерегульованому електроприводі регулювання подачі насоса від 5–20 л/с до максимальної здійснюється ступінчасто заміною поршнів і втулок різних діаметрів. В сучасних схемах плавне регулювання подачі здійснюють регулюванням швидкості обертання двигунів за допомогою потужних частотних перетворювачів. У якості привідних двигунів використовуються потужні синхронні та асинхронні двигуни з короткозамкненим та фазним ротором, які живляться напругою 6000 В.

При обертовому бурінні з безперервною циркуляцією розчину застосовуються поршневі насоси з різними структурними схемами:

- прямодіючі,

- привідні.

Незважаючи на більш складну конструкцію і нерівномірну подачу, найбільше розповсюдження у бурових установках отримали поршневі привідні насоси, оскільки вони значно економічніші, ніж поршневі прямодіючі насоси.

Серед поршневих привідних насосів переважно застосовують двопоршневі насоси двосторонньої дії і трипоршневі насоси односторонньої дії. Як показала практика, подальше збільшення кількості поршнів нераціональне у зв'язку зі збільшенням швидкозношуваних деталей і складністю в експлуатації. Значна пульсація миттєвої подачі у поршневих привідних насосах є результатом перетворення обертового руху у зворотно–поступальний, що здійснюється кривошипно-шатунним механізмом. Для зменшення шкідливого впливу пульсації подачі в конструкцію цих насосів уведені компенсатори, котрі амортизують коливання подачі бурового розчину. Спроби застосувати трипоршневі насоси двосторонньої дії, у котрих подача набагато рівномірніша, ніж у двопоршневих, не дали задовільних результатів. З появою більш досконалих діафрагмових компенсаторів, які забезпечують високу рівномірність подачі, складні трипоршневі насоси двосторонньої дії втратили свої переваги.

Для поліпшення рівномірності подачі робилися спроби використовувати багатоплунжерні насоси, але під час перекачування бурових розчинів вони також не дали позитивних результатів, тому що плунжери і сальники погано працювали при високих тисках, а заміна їх досить складна. Спроби замінити у шестиплунжерному опозитному буровому насосі односторонньої дії плунжери на поршні виявилися більш ефективними. Переваги цього насоса – відносно висока рівномірність подачі (коливання миттєвої подачі – 15%), можливість легкої заміни поршнів, клапанів та втулок і відсутність сальникових штоків. Необхідність мати на буровій два таких насоси з великою кількістю

швидкозношуваних деталей стала причиною того, що ці насоси не знайшли застосування. Нині використовуються здебільшого двопоршневі насоси двосторонньої дії з кількістю подвійних ходів за хвилину 35–90 і довжиною ходу до 0,5 м , а також трипоршневі насоси односторонньої дії з кількістю подвійних ходів за хвилину 35–180 і довжиною ходу до 0,3 м при діаметрі циліндрових втулок 120–200мм.

Вихідні пульсації трипоршневого насоса односторонньої дії менші, ніж пульсації двопоршневого насоса двосторонньої дії. Ефективність різних структурних схем насосів визначається простотою конструкції, технологічністю, кількістю швидкозношуваних деталей, вірогідністю безвідмовної роботи, масою, величиною ККД і т. ін.

В буровій установці «Уралмаш-4Е» застосований двопоршневий насос двосторонньої дії типу УНБ-600. Він призначений для подачі промивної рідини на забій при бурінні свердловин глибиною до 5000 м. При роторному бурінні промивна рідина подається буровим насосом УНБ-600 через колону бурильних труб на забій для охолодження й виносу зруйнованої долотом гірської породи, а також для передачі енергії потоку турбобуру й пов'язаному з ним долоту. У якості промивної рідини застосовується вода або глинистий розчин з наявністю нафти, луги, соди й інших компонентів.

Дуже важливою вимогою до приводу бурового насосу є необхідність мати регульовану швидкість обертання електродвигуна, яку необхідно регулювати при бурінні не менш, ніж на 20-30% вниз від номінальної і до 50-60% - при відновленні циркуляції розчину. Крім того, необхідно враховувати і той факт, що при переході з одного шару ґрунту до іншого, можливе виникнення ударних навантажень, які можуть призвести як до стопоріння приводу, так і до виходу його з ладу.

Друга вимога пов'язана з особливостями навантажувального режиму приводного двигуна. Відомо, що навантаження на двигуні постійно змінюється: по мірі заглиблення свердловини – зростає, а при зниженні швидкості двигуна – зменшується, але у всіх випадках воно змінюється поступово. Крім того, як при

зміні втулок, так і при нарощуванні колони в процесі буріння електродвигун повинен вимикатися з мережі, або вал насосу повинен від'єднуватися від валу двигуна. Таким чином, друга вимога полягає в тому, що двигун бурового насосу повинен працювати в тривалому режимі з відносно спокійним навантаженням, але з частими пусками та зупинками і тому для привода бурового насосу застосовуються або асинхронний двигун з фазним ротором, який має понижені пускові струми та витримує часті пуски, або для оперативного керування між двигуном та насосом встановлюється електромагнітна муфта. В цьому випадку можна застосовувати й інші типи двигунів, причому найширше розповсюдження отримали синхронні двигуни.

У випадках забивання долота вибуреною породою для відновлення циркуляції промивочної рідини на виході насоса короткочасно створюється підвищений тиск. Тому двигун бурового насосу повинен мати достатньо високу перевантажувальну здатність, особливо при бурінні в важких умовах.

В серійних електрофікованих бурових установках типу БУ-80 БрЕ, БУ-2500 БрЕ, Уралмаш 125 БЕ, Уралмаш 4Е, Уралмаш 4000 БЕ, Уралмаш 125Е та Уралмаш 160Е для привода бурових насосів застосовують синхронні двигуни з глухопідключеним збуджувачем.

Синхронні електроприводи не припускають частих вмикань та вимикань, тому для оперативного від'єднання вала електродвигуна від валу бурового насосу між ними встановлюють шків, в якій вмонтована шинно-пневматична муфта. Головними перевагами таких двигунів є:

– здатність СД віддавати в мережу реактивну потужність, що є найбільш простим і ефективним способом підвищення коефіцієнта потужності. У цих умовах електричні мережі розвантажуються від реактивних струмів, споживаних асинхронними електродвигунами, трансформаторами та іншими пристроями, в результаті чого зменшуються втрати в мережах;

– статична перевантажувальна здатність синхронних електродвигунів без урахування явнополюсності залежить від напруги мережі лінійно, а не квадратично, як у асинхронних двигунів;

– форсування збудження при зниженнях напруги нижче 0,8 від номінальної. Отже, при великих зниженнях напруги мережі, робота навантаженого синхронного електродвигуна стійкіша, ніж асинхронного.

– можливість застосування систем збудження з АРВ, що забезпечують сталість статичного та динамічного перевантаження при зміні режимів роботи.

Але є і значні недоліки:

- синхронні двигуни не припускають частих вмикань та вимикань, хоча це компенсується застосуванням магнітопорошкових муфт. Практика показала, що застосування магнітопорошкових муфт виправдовує себе тільки при передачі відносно невеликих моментів;

- для застосування цього приводу необхідно регулювати подачу насосу за допомогою зміни циліндрових втулок, тому для отримання високої якості регулювання необхідно мати велику кількість втулок що, в свою чергу, призводить до підвищення вартості установки і зменшення ефективності. Крім того, досить багато часу буде витрачатися на заміну втулок (при цьому двигун не вимикається).

- ефективність використання двигуна при такому способі не перевищує 60-80% (зазначений відсоток залежить від кількості змінних втулок).

1.4 Постановка задач на кваліфікаційну роботу

В даній роботі необхідно модернізувати електропривод бурового насоса, а саме:

- провести перерахунок потужності електродвигуна;
- замінити двигун на більш сучасний, провести перевірку вибору двигуна на перевантаження;
- замінити нерегульований привод двигуна на регульований, тобто розробити таку систему автоматичного керування електроприводом насосу, що зможе забезпечувати дотримування номінальних коливань тиску та витрат на виході насоса, які обумовлені конструктивними особливостями поршньових насосів, а також найбільш економічну його роботу.

2. МОДЕРНІЗАЦІЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ БУРОВОГО НАСОСА

2.1. Перерахунок потужності приводу бурового насосу

При проектуванні насос розраховується за номінальними параметрами: гідравлічній потужності $N_г$, найбільшому постійному тиску P_{max} та найбільшій постійній подачі Q_{max}, що задаються як вихідні величини.

Виходячи з призначення та умов експлуатації бурової установки «Уралмаш –4Е» буровий насос типу УНБ-600 повинен мати:

– гідравлічну потужність $N_г = 600$ кВт;

– тиск на вході $P_{max} = 20$МПа;

– найбільшу постійну подачу $Q_{max} = 75 \cdot 10^{-3}$ м^3/с.

Розраховуємо механічні параметри необхідного насосу з формули гідравлічної потужності [15]:

$$N_Г = P \cdot Q, \tag{2.1}$$

де $N_г$ – гідравлічна потужність насосу, Вт;

P - тиск на виході насосу, Па;

Q - подача насоса, м^3/с.

Визначаємо продуктивність Q при найбільшому тискові за формулою:

$$Q_{\min} = \frac{N_Г}{P_{\max}}, \tag{2.2}$$

Теоретичну продуктивність насосу визначаємо за формулою [15]:

$$Q_T = \frac{Q}{a}, \tag{2.3}$$

де a – коефіцієнт подачі, для розрахунків приймаємо $a = 0{,}9$ виходячи з рекомендацій [15].

Виходячи з цього, мінімальна теоретична продуктивність буде дорівнювати:

$$Q_{T\min} = \frac{Q_{\min}}{a}. \tag{2.4}$$

Максимальна теоретична продуктивність буде дорівнювати:

$$Q_{T\max} = \frac{Q_{\max}}{a}. \tag{2.5}$$

Задаючись діаметром штоку поршня та підраховуючи площу його перерізу f з формули по [15]:

$$Q_T = z \cdot (2 \cdot F - f) \cdot \frac{\vartheta_{сер}}{2}, \tag{2.6}$$

де z - число циліндрів, для розрахунків приймаємо z = 2;

$\upsilon_{сер}$ - середня швидкість поршня, м/с, (зазвичай в межах 0,85÷0,95 м/с) для розрахунків приймаємо $\upsilon_{сер}$ = 0,9;

F - площа поршня, м^2;

f - площа штока, м^2.

Розраховуємо найбільшу та найменшу площу перерізу поршня.

Приймемо діаметр штока $d_ш$ =70 мм=0,07 м та вирахуємо його площу за формулою:

$$f = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot d_ш^{\,2}. \tag{2.7}$$

Визначимо найменшу площу перерізу поршня:

$$F_{\min} = \frac{Q_{T\min}}{z \cdot \vartheta_{сер}} + \frac{f}{2}. \tag{2.8}$$

Найбільша площа перерізу поршня буде дорівнювати:

$$F_{\max} = \frac{Q_{T\max}}{z \cdot \vartheta_{сер}} + \frac{f}{2}. \tag{2.9}$$

Визначаємо найбільший та найменший діаметри поршня:

$$D_{\min} = 2 \cdot \sqrt{\frac{F_{\min}}{\pi}}. \tag{2.10}$$

$$D_{\max} = 2 \cdot \sqrt{\frac{F_{\max}}{\pi}}. \tag{2.11}$$

Отримані розміри округлюються до найближчого меншого діаметру за прийнятим рядом діаметрів поршнів. Довжина ходу поршня S для бурових насосів знаходиться у межах 350÷450 мм [15]. Для розрахунків приймаємо усереднену довжину ходу поршня S = 400мм = 0,4 м.

Номінальну кількість подвійних ходів поршня за секунду визначаємо з формули середньої швидкості [15]:

$$\vartheta_{сер} = 2 \cdot S \cdot n, \tag{2.12}$$

де S - довжина ходу поршня, м;

n - число подвійних ходів поршня за секунду.

$$n = \frac{\vartheta_{сер}}{2 \cdot S}. \tag{2.13}$$

Визначаємо число подвійних ходів поршня за хвилину:

$$n_M = n \cdot 60. \tag{2.14}$$

За один оберт корінного валу поршень здійснює один подвійний хід, тобто швидкість обертання корінного валу дорівнює числу подвійних ходів за хвилину:

$$n_к = n_м, \tag{2.15}$$

Швидкість обертання трансмісійного валу визначається за формулою:

$$n_T = n_k \cdot i, \tag{2.16}$$

де i - передавальне число редуктора насоса.

Передавальні числа редукторів бурових насосів знаходяться у межах 4÷5 [16]. Приймаємо i = 5.

Номінальна приведена потужність насоса визначається за формулою:

$$N_н = \frac{N_Г}{\eta_н}, \tag{2.17}$$

де $\eta_н$ - коефіцієнт корисної дії насосу, приймаємо $\eta_н$ = 0,85 [17].

Потрібна потужність приводного двигуна визначається за формулою:

$$N_{пот} = \frac{N_н}{\eta_{кп}}, \tag{2.18}$$

де $\eta_{кп}$ - коефіцієнт корисної дії клинопасової передачі, приймаємо $\eta_{кп}$=0,95 [15].

Усі розрахунки проводимо за допомогою програми MathCad на ПЕОМ. За результатами розрахунків проводимо вибір та перевірку вибору двигуна бурового насосу, що серійно випускається промисловістю.

Вхідні данні для розрахунку:

Гідравлічна потужність насосу, кВт	600
Найбільший постійний тиск еа вході, МПа	20
Найбільша постійна подача 10 ехр-3, $м^3/с$	75
Коефіцієнт подачі	0,9
Число циліндрів насосу	2
Середня швидкість поршня, м/с	0,9
Діаметр штока, мм	70
Довжина ходу поршня, мм	400
Передаточне число редуктора насоса	5
ККД насоса	0,85
ККД клинопасової передачі	0,95

Отримані результати розрахунку:

Продуктивність насосу при тискові $Р_{мах}$, $м^3/с$	0,0300
Теоретична продуктивність насосу, $м^3/с$	0,0270
Мінімальна теоретична продуктивність, $м^3/с$	0,0333
Максимальна теоретична продуктивність, $м^3/с$	0,0556
Площа штоку, $м^2$	0,0038
Найменша площа перерізу поршня, $м^2$	0,0204
Найбільша площа перерізу поршня, $м^2$	0,0328
Найменший діаметр поршня, м	0,1613
Найбільший діаметр поршня, м	0,2043
Число подвійних ходів поршня в секунду	1,1250
Число подвійний ходів поршня за хвилину	67,5000
Швидкість обертання трансмісійного валу	337,5000
Номінальна приводна потужність насосу, Вт	605882,3529
Необхідна потужність приводного двигуна, Вт	623034,0557

2.2 Вибір та перевірка вибору приводного двигуна

Ґрунтуючись на проведених розрахунках, виконуємо вибір приводного двигуна за співвідношенням:

$$P_{дн} \geq N_{пот}, \quad (2.19)$$

де $P_{дн}$ - номінальна потужність приводного двигуна, кВт,

$N_{пот}$ – розрахована потужність приводного двигуна (маємо 623,034 кВт).

Раніше на буровій установці”Уралмаш – 4Е” для приводу бурових насосів були встановлені два синхронні двигуни типу СМБО-15-49-89УХЛ2 потужністю 630 кВт кожен. Розрахунок показав, що за величиною потужності вони нас задовольняють, але на таку ж потужність розроблений і широко впроваджується в нафтову промисловість більш сучасний синхронний двигун серії СДБМ. Даний тип двигуна має більш високий ККД, ступінь захисту двигунів - IP24, коробки виводів - IP44, кожуха зовнішнього вентилятора - IP20, шафи управління - IP44. Тому обираємо двигун серії СДБМ.

Тип та технічні параметри приводного двигуна наведені нижче.

Таблиця 2.1 – **Характеристики двигуна типу СДБМ 9**

Показник	**Значення показника**
Марка двигуна	СДБМ 99/46-8УХЛ2
Тип двигуна	Синхронний
Номінальна потужність, кВт	630
Номінальна напруга статора, В	6000
Номінальний струм статора, А	72
Коефіцієнт корисної дії, %	94,7
$M_{макс}/M_{ном}$	2,2
$I_{макс}/I_{ном}$	6
cos φ	0,88
Струм збудження збудника, А	163
Напруга збудника, В	47 (39)

Перевірку двигуна на перевантажувальну здатність проводимо по методиці, викладеній в [4].

Визначаємо номінальний момент двигуна $M_н$ через номінальну потужність $P_{дн}$ та номінальну кутову частоту обертання $\omega_н$:

$$M_H = \frac{1000 \cdot P_{ДН}}{\omega_H} = \frac{1000 \cdot 630}{78{,}53} = 8022{,}41 H \cdot м, \qquad (2.20)$$

де $\omega_H = \frac{n_H}{9{,}55} = \frac{750}{9{,}55} = 78{,}53\ рад/сек.$

Максимальний момент двигуна

$$M_{\max} = k_1 M_H = 2{,}2 \cdot 8022{,}41 = 17649{,}30\ H \cdot м. \qquad (2.21)$$

де k_1 - коефіцієнт кратності максимального і номінального моментів двигуна, що обрано.

Для перевірки двигуна розраховуємо максимальний статичний момент, тобто момент, коли статична потужність на валу більша за номінальну.

З проведеного раніше розрахунку відомо, що найбільша теоретична подача насосу складає $Q_{\max}$ =0,05 м^3/с, найбільший постійний тиск P_{max} = 20 Мпа.

Тоді можна розрахувати максимальну статичну потужність й максимальний статичний момент, що створює навантаження:

$$P_{cm\max} = k \frac{Q_{\max} \cdot P_{\max}}{\eta} = 1{,}02 \cdot \frac{0{,}05 \cdot 20 \cdot 10^6 \cdot 10^{-3}}{0{,}783} = 1302{,}68\ \ кВт, \qquad (2.22)$$

$$M_{cm\max} = \frac{P_{cm\max} \cdot 10^3}{\omega_H} = 1000 \frac{1302{,}68}{78{,}53} = 16588{,}34\ H \cdot м, \qquad (2.23)$$

тут k - коефіцієнт, що враховує можливість тривалого перенавантаження насоса, для бурових насосів звичайно приймають К= 1,02 –1,05. Беремо середнє значення К= 1,04;

η - загальний коефіцієнт корисної дії технічної системи, який складається з декількох ККД:

$$\eta = \eta_0 \cdot \eta_г \cdot \eta_м \cdot \eta_п = 0{,}99 \cdot 0{,}98 \cdot 0{,}85 \cdot 0{,}95 = 0{,}783 \qquad (2.24)$$

тут η_0- об'ємний ККД бурового насоса , який враховує витрати потужності на прокачування під тиском частини розчину через ущільнення поршнів, штоків клапанів, звичайно приймають η_0 =0,95-0,99, беремо $\eta_г$ =0,99;

$\eta_г$ – гідравлічний ККД бурового насоса, за допомогою котрого оцінюють витрати потужності в клапанах вхідного і вихідного колекторів у гідравлічній коробці, звичайно приймають $\eta_г$ =0,97-0,98, беремо $\eta_г$ =0,98;

$\eta_м$ – механічний ККД насосного агрегату, який враховує витрати енергії на тертя у механізмі перетворення обертового руху повзуна, в нашому випадку $\eta_м$ =0,85;

$\eta_п$ – ККД передачі між двигуном і насосом, $\eta_п$ = 0,95.

Перевантажувальній здатності двигун бурового насоса задовольняє, якщо виконується умова:

$$M_{\max} \geq M_{cm\max} . \qquad (2.24)$$

В нашому випадку

17649,3 Н м> 16588,3 Н м .

Перевірка зійшлася, двигун витримує перенавантаження.

2.3 Розроблення електроприводу бурового насоса

2.3.1 Регулювання швидкості обертання синхронних електродвигунів

В даній роботі для приводу бурового насоса обрано синхронний електродвигун типу СДБМ 99/46-8УХЛ2.

Синхронні електричні машини характерні тим, що у них ротор в сталому режимі обертається з кутовою швидкістю обертового магнітного поля, створюваного струмами в фазних обмотках статора, подібного статору асинхронної машини. Це досягається тим, що ротор синхронної машини являє собою звичайно електромагніт або рідше постійний магніт з числом пар полюсів, що дорівнює кількості пар полюсів обертового магнітного поля. Взаємодія полюсів обертаючого магнітного поля і полюсів ротора забезпечує постійну кутову швидкість останнього незалежного моменту на валу. Ця

властивість синхронних машин дозволяє використовувати їх в якості двигунів для приводу механізмів з постійною кутовою швидкістю.

Було вирішено замінити механічно-регульований привод синхронного двигуна на електрично-регульований, тобто розробити таку систему автоматичного керування електроприводом насосу, котра зможе забезпечувати дотримування номінальних коливань тиску та витрат на виході бурового насоса, які обумовлені конструктивними особливостями поршньових насосів.

Частотне регулювання швидкості обертання синхронних двигунів (СД) характеризується в основному такими ж показниками, що і частотне регулювання асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором. Регулювання швидкості обертання СД повинне проводиться з високими енергетичними показниками: по гармонійному складу, коефіцієнту потужності і т.д. Також повинні бути високими плавність і стабільність регулювання, при цьому не потрібно забувати, що регулювання повинно проводиться при постійному моменті, для цього при законі регулювання відповідного $U_{ном}/f_{ном}$=const необхідно регулювати струм збудження при зміні моменту на валу двигуна за законом:

$$I_в/I_{ном} = \sqrt{M/M_{ном}}. \qquad (2.25)$$

2.3.2 Регулювання струму збудження СД

Дослідниками електричних машин проведена значна робота по створенню, дослідженню і впровадженню різних систем збудження та регулювання СД. Однак з тривалим часом були абсолютно різні точки зору у виборі законів автоматичного регулювання і типів систем збудження.

В останні роки у зв'язку з розвитком напівпровідникової техніки і створенням спеціальних типів кремнієвих діодів і тиристорів почалося інтенсивне впровадження в промисловість синхронних електродвигунів з новими системами збудження.

СД знаходять широке застосування для електроприводу різних механізмів. За цих умов є важливим раціональне використання особливості синхронного

електродвигуна – можливість зміни величини і напруги реактивної потужності і тим самим здійснення регулювання напруги у вузлах навантаження. Форсування збудження при зниженні напруги до певної величини значно підвищує стійкість роботи синхронних електродвигунів.

У зв'язку з тим, що застосування нових типів систем збудження дозволяє істотно підвищити статичну і динамічну стійкість роботи машин проєктування синхронних електродвигунів слід проводити із зниженими повітряними зазорами і зменшеними запасами статичної перевантаженості. Таке комплексне проектування синхронного електродвигуна разом з системою збудження і автоматичним регулюванням збудження дає можливість зменшити вагу, габарити і вартість електродвигуна.

2.3.3 Вибір тиристорного збуджувача

До систем збудження пред'являються такі основні вимоги:

а) висока надійність у роботі;

б) можлива простота;

в) невисока вартість.

Крім того, необхідність регулювання напруги та забезпечення стійкої роботи синхронних машин накладає на системи збудження ряд додаткових вимог.

Обраний нами збуджувач серії ВТЕ-315-11 призначений для живлення обмотки збудження, управління і регулювання струму збудження при прямому і реакторному пуску, синхронній роботі та аварійних режимах синхронних двигунів потужністю до 12500 кВт з струмами збудження до 320 А

Тиристорне збудження і управління даного збуджувача здійснює такі функції:

- збудження електродвигуна у всіх нормальних режимах роботи з ручним і автоматичним регулюванням струму збудження, пристрій забезпечує перехід з автоматичного регулювання на ручне;

- автоматичний пуск СД з подачею збудження у функції ЕРС (напруги) в обмотці збудження;

- обмеження кута затримки силових тиристорів по мінімуму і по максимуму, обмеження струму збудження до номінального з витримкою часу, а також обмеження струму форсування до 1,4 $T_н$ без витримки часу;

- автоматичний регулятор збудження забезпечує регулювання струму збудження при підтримці напруги мережі зі статизмом ± 10% або кутом φ.

Також у збуджувачі ВТЕ-315 - 11 передбачено:

- автоматичне перемикання з витримкою часу на аварійний режим при втраті збудження;

- автоматичне резервування оперативної напруги;

- сигналізація замикання на "землю" роторного ланцюга збуджувача;

- сигналізація включення схеми автоматичного перемикання на аварійний режим при втраті збудження.

У збуджувач встановлені прилади для вимірювання параметрів системи управління.

Застосування керованих вентилів - тиристорів дозволяє виконувати швидкодіючі і надійні системи з високими техніко-економічними показниками. Регулювання потужності в десятки і сотні кіловат може бути здійснено керуючою потужністю в одиниці Вт і частки Вта, що робить можливим знизити вагу і габарити пристрою управління тиристорного збуджувального пристрою синхронного двигуна СД, який містить елементи живлення, управління, регулювання та їх функціональні зв'язки.

На сучасних бурових установках для управління буровими насосами повинні бути передбачені: пуск і зупинка в автоматичному режимі за заданою програмою, при отриманні команди з пульта бурильника; місцеве управління насосами вручну безпосередньо на місці їх установки.

2.3.4 Можливість роботи синхронного двигуна у складі частотно-регульованого електроприводу бурових насосів

Робочий діапазон регулювання частоти обертання синхронних двигунів при спільній роботі з перетворювачем частоти в більшості випадків складає 50 (60) - 100% від номінальної частоти обертання.

На рис. 2.1 наведені результати розрахункової оцінки допустимої потужності на валу електродвигуна типу СДБМ 99/46-8УХЛ2 у вказаному робочому діапазоні частот обертання при спільній роботі з перетворювачем частоти. Оцінка проводилася за умовою допустимого нагріву обмоток статора і ротора електродвигуна з урахуванням погіршення умов охолодження електродвигуна при зниженні частоти обертання, а також додаткових втрат в електродвигуні від вищих гармонік несинусоїдального струму на виході перетворювача частоти. Облік впливу додаткових втрат, зумовлених спільною роботою з перетворювачем частоти, очевидний для номінальної частоти обертання електродвигуна, для якої допустима тривала потужність на валу електродвигуна становить близько 70-80% номінальної потужності. Критичні частоти обертання електродвигуна складають: 265 і 294 рад/с. Тривала робота електродвигуна поблизу вказаних частот обертання (в межах ±50 $хв^{-1}$) недопустима.

Управління установкою струму зрушення електродвигунів в режимах частотного пуску і регулювання частоти обертання повинен здійснювати перетворювач частоти, для чого потрібне доопрацювання існуючих базових статичних тиристорних збудників типу ВТЕ - 315 (ВТЕ - 320) в частині коригування їх АРЗ (автоматичного регулювання збудження).

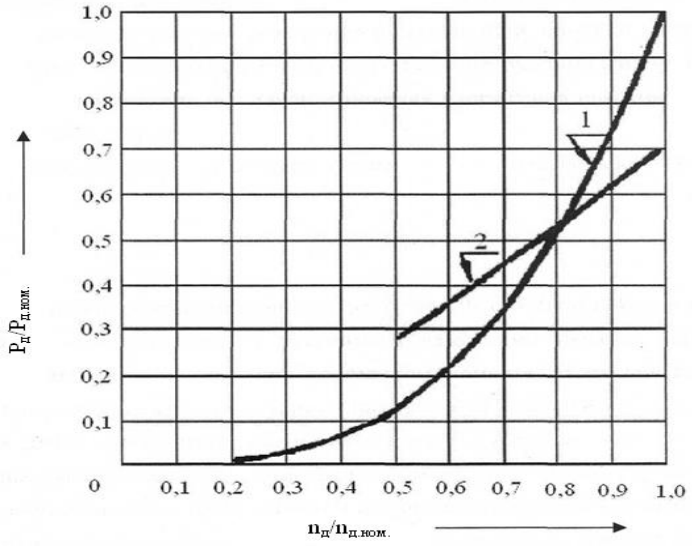


Рисунок 2.1– Залежність потужності на валу електродвигуна типу СДБМ 99/46-8УХЛ2 від частоти обертання

На рисунку 1 - крива обмеження потужності на валу електродвигуна зміні навантаження (при квадратичній залежності моменту опору приведеного механізму від частоти обертання);

2 - крива обмеження потужності на валу електродвигуна при спільній роботі з перетворювачем частоти за умови допустимого нагріву обмоток статора і ротора електродвигуна в діапазоні частот обертання (0,5 - 1,0) $M_{д.ном}$.

З урахуванням того, що при номінальній роботі електродвигун типу типу СДБМ 99/46-8УХЛ2 завантажений не повністю, а лише на 75-80% від максимальної продуктивності насоса, можна зробити висновок про можливість роботи його в складі частотно-регульованого електропривода.

Для кращого використання електродвигуна та отримання високих енергетичних показників його роботи - коефіцієнтів потужності, корисної дії, перевантажувальної здатності - одночасно з частотою необхідно змінювати і напругу, що підводиться до двигуна.

2.4 Вибір обладнання

В даній роботі в якості можливого варіанту регулювання частоти СД бурового насоса розглядаються:

- перетворювач частоти фірми ЗАТ «Енергокомплект» типу EK-AV6, реалізований на силових IGBT-транзисторах з багаторівневою широтно-іспульсною модуляцією (ШІМ);

- високовольтний тиристорний перетворювач частоти ПЧСВ.

Перетворювачі частоти на тиристорах в даний час займають домінуюче положення у високовольтному приводі в діапазоні потужностей від сотень кіловатів і до десятків мегават з вихідною напругою 3 - 10 кВ і вище. Однак їх вартість на один кВт вихідної потужності досить велика в класі високовольтних перетворювачів.

До недавнього минулого перетворювачі частоти на GTO становили основну частку й у низьковольтному частотно-регульованому приводі. Але з появою IGBT транзисторів відбувся "природний відбір" і сьогодні

перетворювачі на їх базі – загальновизнані лідери в області низьковольтного частотно-регульованого приводу.

Тиристор є напівкерованим приладом: для його включення досить подати короткий імпульс на керуючий вивід, але для вимикання необхідно або прикласти до нього зворотну напругу, або знизити комутований струм до нуля. Для цього в тиристорному перетворювачі частоти потрібна складна і громіздка система управління.

Біполярні транзистори з ізольованим затвором IGBT відрізняють від тиристорів повна керованість, проста неенергоємна система управління, найвища робоча частота.

Внаслідок цього перетворювачі частоти на IGBT дозволяють розширити діапазон керування швидкості обертання двигуна, підвищити швидкодію приводу в цілому.

Застосування IGBT з більш високою частотою перемикання в сукупності з мікропроцесорною системою управління в перетворювачах частоти знижує рівень вищих гармонік, характерних для тиристорних перетворювачів. Як наслідок менші додаткові втрати в обмотках і магнітопроводі електродвигуна, зменшення нагрівання електричної машини, зниження пульсацій моменту й виключення так званого «крокування» ротора в області малих частот. Знижуються втрати в трансформаторах, конденсаторних батареях, збільшується їх термін служби та ізоляції проводів, зменшуються кількість помилкових спрацьовувань пристроїв захисту й погрішності індукційних вимірювальних приладів.

Перетворювачі на транзисторах IGBT в порівнянні з тиристорними перетворювачами при однаковій вихідної потужності відрізняються меншими габаритами, масою, підвищеною надійністю в силу модульного виконання електронних ключів, кращого тепловідведення з поверхні модуля і меншої кількості конструктивних елементів.

Вони дозволяють реалізувати більш повний захист від кидків струму і від перенапруги, що істотно знижує ймовірність відмов і пошкоджень електроприводу.

Головною перешкодою на шляху їх використання у високовольтному приводі із прямим перетворенням частоти при потужностях вище 1 - 2 МВт на даний момент є технологічні обмеження. Збільшення комутованої напруги і робочого струму приводить до збільшення розмірів транзисторного модуля, а також вимагає більш ефективного відведення тепла від кремнієвого кристала.

Нові технології виробництва біполярних транзисторів спрямовані на подолання цих обмежень, і перспективність застосування IGBT дуже висока також і у високовольтному приводі. В даний час IGBT транзистори застосовуються у високовольтних перетворювачах у вигляді послідовно з'єднаних декількох одиничних модулів.

У зв'язку з вищевказаним в кваліфікаційній роботі перевага віддається перетворювачу частоти типу ЕК-AV6, який забезпечить:

- плавне регулювання швидкості в широкому діапазоні;
- плавний пуск і зупинку двигуна;
- високу точність підтримки технологічного параметра;
- легкість перенастроювання параметрів під конкретні умови експлуатації;
- значне зниження шуму і вібрації двигуна;
- можливість роботи під управлінням АСУТП верхнього рівня при використанні протоколів ModBus RTU, Profibus DP.

При використанні перетворювача частоти ЕК-AV6-1.6-SF-УХЛ4:

- відсутні значні гармонійні перешкоди в мережі живлення;
- не потрібні силові фільтри в ланцюзі ПЧ;
- довжина кабелів від ПЧ до двигуна може досягати 2 км;
- коефіцієнт корисної дії становить не менше 0,97 при частоті обертання близької до номінальної;
- можливе динамічне гальмування двигуна (подача постійного струму на обмотку статора) і гальмування вільним вибігом;

- не вимагається підбір спеціальних двигунів з підвищеним класом ізоляції, нагрівання двигуна не виходить за рамки звичайного;

- можливе відновлення працездатності ПЧ в короткий термін без використання спеціального інструменту (заміна комірки можлива менш ніж за 30 хвилин).

Для поліпшення якості вихідної напруги ПЧ EK-AV6 містить ряд широтно-імпульсних перетворювачів (комірок) малої потужності. Кожна силова комірка має власний трифазний випрямляч, приєднаний до вторинної обмотки вхідного трансформатора з напругою 690 В. При напрузі живлення бурового насоса 6 кВ у ПЧ використовується 15 комірок по 690 В, з'єднаних по п'ять у фазі послідовно, фази з'єднуються в зірку.

Кожна комірка розрахована на повний вихідний струм, але працює тільки на 1/5 вихідної напруги. Перетворювачі частоти на 3 та 10 кВ містять відповідно три і вісім комірок у фазі. Таким чином можна налаштувати даний ПЧ практично на будь-яку напругу.

Конструктивно EK-AV6-1.6-SF-УХЛ4 складається з окремих шаф, кожна з яких включає в себе по п'ять силових комірок, охолодження повітряне примусове або водяне. Система управління (СУ) перетворювача частоти (ПЧ) встановлена в окремій шафі управління і пов'язана з комірками по волоконно-оптичному каналу.

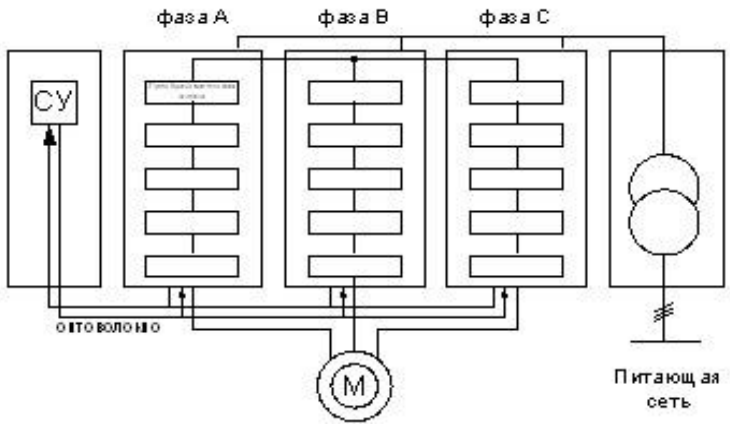


Рисунок 2.2 – Структурна схема перетворювача частоти серії EK-AV6

Перетворювач частоти EK-AV6-1.6-SF-УХЛ4 має повністю модульну структуру. Пошкоджений модуль може бути легко і швидко замінений.

Вийшовши з ладу, комірка автоматично відключається без втручання оператора, при цьому віддана потужність приводу падає на 10% (для ПЧ на 6кВ – у нашому випадку).

Силові модулі мають підвищену надійність, оскільки в ланцюзі постійного струму використовуються поліпропіленові конденсатори, які мають до 100000 годин напрацювання на відмову (10-12 років, при цьому електролітичні конденсатори розраховані на 5-7 років роботи).

Кожна силова комірка має три датчика температури, які виводять інформацію про температуру всіх модулів в реальному масштабі часу і відключають будь-який з них при перевищенні робочої температури вище встановленої, а також оптимізують роботу системи охолодження, тим самим, продовжуючи ресурс вентиляторів. Таким чином, будь-який з модулів може бути виключений із загального ряду формування фазної напруги з пониженням навантаження приводу не більше 10%. Інформація про струми, напруги, формовану потужність комірки і дані про температуру передаються контролером управління модуля по оптоволоконному кабелю в шафу управління.

У кожному силовому модулі є всі необхідні захисти, що функціонують незалежно від основної системи управління частотно-регульованого електроприводу (ЧРЕП), навіть при обриві оптоволоконного зв'язку.

Система управління ЕК-AV6 розміщується в окремій шафі і на підставі сигналів, одержуваних від силових комірок, реалізує алгоритм управління двигуном, алгоритм керування силовими комірками (включаючи рівномірний розподіл потужності) і необхідний захист силового трансформатора і ЧР в цілому.

Сигналом, що контролює роботу бурового насоса, є сигнал від датчику тиску. В якості такого датчику було обрано інтелектуальний датчик тиску серії 415 (модель 5XX7).

Основні характеристики датчику:

– надлишковий тиск вимірювання 0,1 кПа – 250 МПа;

– абсолютний тиск вимірювання 25 кПа – 16 Мпа (0,25 – 160 ТА);

– основна похибка 0,5 %;

– вихідний аналоговий сигнал – 0- 20 mA;

– вихідний цифровий сигнал на базі інтерфейса RS –485.

Сигнал від датчику подається в мікропроцесорну систему управління, де обробляється у відповідності із закладеною програмою. У шафі управління одночасно формуються керуючі сигнали на всі IGBT-ключі всіх 15 силових модулів, і обробляється інформація від кожної комірки в обсязі більше 120 сигналів одночасно. Вся інформація докладно виводиться на сенсорну панель, при цьому в системі управління повністю відсутні неякісні резистори і конденсатори, що підвищує її надійність.

Застосування сенсорної панелі дозволяє істотно зменшити кількість органів управління на шафі управління і зробити роботу з насосом зручною і доступною. Сенсорна панель дозволяє здійснювати багаторівневий доступ для оперативних служб та інженерного складу, таким чином, забезпечується надійність в роботі і зручність в обслуговуванні ЧРЕП, що істотно знижує вимоги до кваліфікації обслуговуючого персоналу.

Застосування мікропроцесорної системи управління з сенсорною панеллю та оптоволоконного зв'язку, а так само застосування силових модулів низької напруги дозволяє виготовити ЧРП відповідно високому технічному рівню, забезпечити підвищену надійність і зручне обслуговування.

2.5 Розроблення схеми керування електроприводом бурового насоса

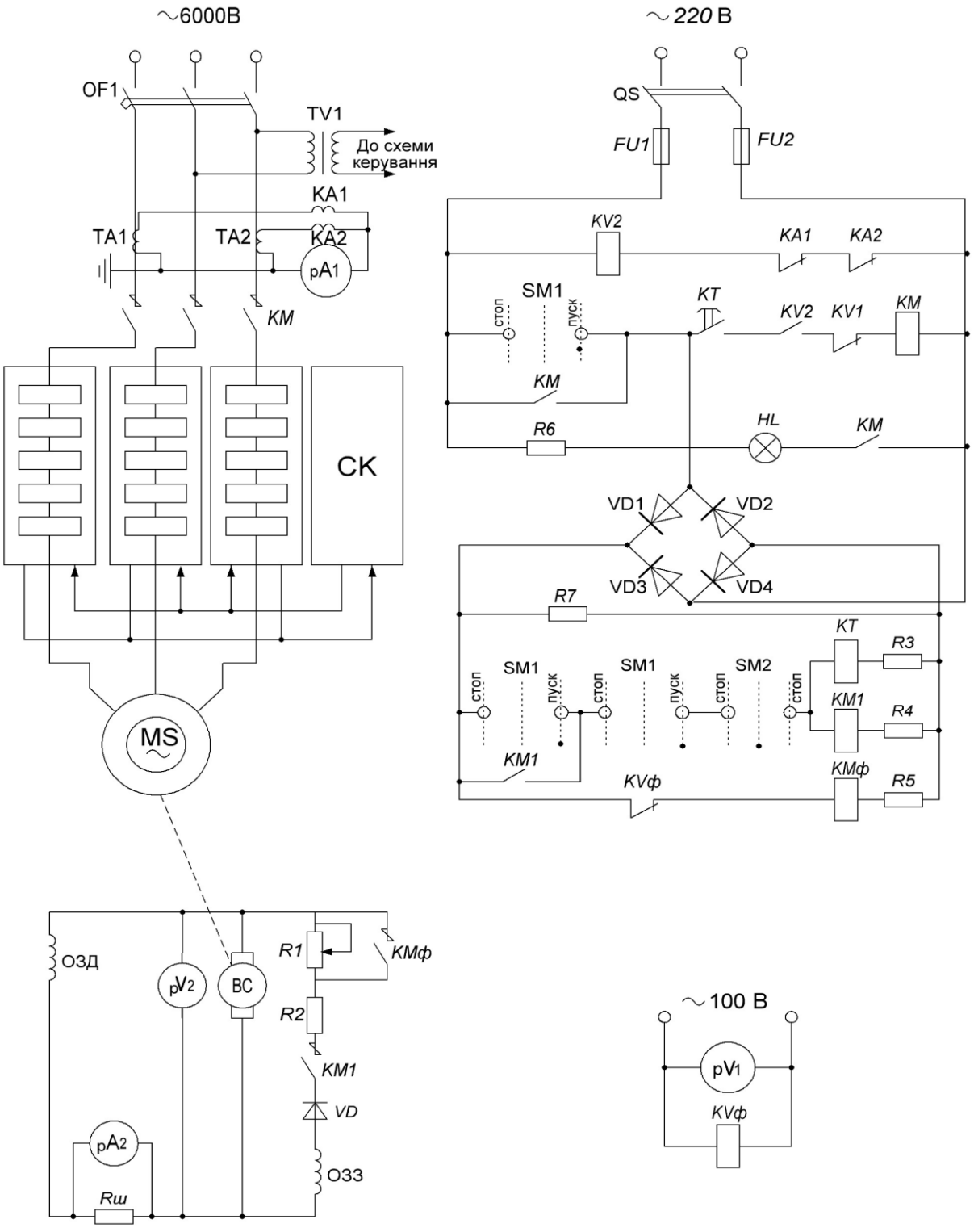


Рисунок 2.3 – Схема керування електроприводом бурового насоса

Тут MS – синхронний двигун; QF – автоматичний вимикач;

TA1, TA2 – трансформатори струму, вони служать для підключення вимірювальних приладів і обмоток реле струму;

KA – реле струму; KM – силовий контактор;

SM1 – універсальний перемикач, який знаходиться біля насосного блоку;

SM2 – універсальний перемикач, який розміщений дистанційно, за його допомогою можна вимкнути двигун;

KT – реле часу; KM1 - контактор увімкнення збуджувача;

$KM_ф$ – контактор форсування збудження; $KV_ф$ – реле форсування збудження;

BC – збуджувач; ОЗЗ – обмотка збудження збуджувача;

ОЗД – обмотка збудження синхронного двигуна.

Схема працює наступним чином. Керування пуском і зупинкою двигуна MS може здійснюватися як безпосередньо – за допомогою перемикача SM1, встановленого біля насоса, так і дистанційно – перемикачем SM2. Поворот ручки SM1 в праве положення викликає ввімкнення реле часу KT і контактора KM1. Контактор замикає ланцюг обмотки збудження ОЗЗ збуджувача BC на його якір і вмикає свою котушку KM1 на самоблокування, а реле KT замикає ланцюг живлення контактора високої напруги KM.

Цей контактор своїми головними контактами подає живлення на обмотку статора двигуна, а допоміжними контактами KM здійснює самоблокування. Починається асинхронний пуск синхронного двигуна; напруга збуджувача BC у міру розгону двигуна зростає, і, як слідує, зростає струм збудження. При досягненні підсинхронної частоти обертання ротор двигуна під дією вхідного моменту втягується в синхронізм. Регулювання струму збудження двигуна відбувається шляхом зміни опору реостата R1, встановленого на пульті.

Для підвищення стійкості двигуна насоса при зниженні напруги живлення передбачено форсування збудження двигуна. Контроль напруги здійснює реле $KV_ф$, яке при зниженні напруги на 15% і більше відпускає якір і замикає свій

контакт у ланцюгу контактора форсування $KM_ф$. Останній своїм контактом закорочує частину реостата R1, напруга збуджувача піднімається, зростає струм в обмотці збудження ОЗД двигуна, а значить, збільшується та його максимальний момент. Після відновлення напруги мережі до номінального значення реле $KV_ф$ знову відключається і форсування автоматично знімається.

Для зупинки двигуна необхідно повернути або рукоятку SM1 в ліве положення, або SM2 в ліве чи праве положення. Це призводить до одночасного розриву ланцюгів контактора КМ1 і реле часу КТ. КМ1 розриває ланцюг обмотки збудження збуджувача ОЗЗ, забезпечуючи гасіння поля двигуна. Реле КТ із витримкою часу біля 1,5 с розриває ланцюг котушки контактора КМ і вимикає обмотку статора від живлення. Така послідовність операцій знижує перенапругу в обмотці статора й на контактах контактора КМ при його відключенні.

Захист двигуна від перевантажень і від асинхронного режиму здійснюється за допомогою реле струму КА1 та КА2, які з витримкою часу розмикають свої контакти в ланцюзі котушки реле захисту К2, яке відключає контактор КМ. Реле К1 (його котушка на схемі не показана) спрацьовує, якщо відсутня напруга 6 кВ у ланцюзі живлення двигуна.

У схемі передбачені вимірювальні прилади pA_1, pA_2, pV_1, pV_2, а також кремнієвий діод VD5 для виключення перемагнічування збуджувача при пуску двигуна. Опори R3-R6 встановлені для узгодження по напрузі параметрів відповідних реле та сигнальної лампи HL.

2.6 Вибір апаратури

Автоматичний вимикач, що використовується для захисту синхронного двигуна за номінальним струмом так, щоб виконувалася умова:

$$I_{а.ном} \geq I_{дв.ном},$$

де $I_{дв.ном}$ – номінальний струм двигуна, А.

Номінальний струм двигуна бурового насоса розраховую за формулою:

$$I_{дв.ном} = \frac{P_H \cdot 1000}{\sqrt{3} U_H \eta_H \cos\varphi_H} = \frac{630 \cdot 1000}{\sqrt{3} \cdot 6000 \cdot 0{,}947 \cdot 0{,}88} = 72{,}75A,$$

де $P_H, U_H, \eta_H, \cos\varphi_H$ - номінальна потужність, напруга, ККД та $\cos\varphi$ обраного двигуна.

Вибираємо вимикачі типу ВА 88-32 на 80А, 3 полюсне виконання.

Для підключення струмових реле необхідно обрати трансформатори струму. Вибираємо трансформатори типу ТТИ-А 100/5А потужністю 10ВА, класс 0,5 IEK.

Струмові реле застосовують для двигунів тривалого режиму роботи, щоб захистити їх від довгочасних перевантажень. В якості реле контролю струму (ТА1 і ТА2) вибираємо реле типу IEK ORI 0,5-5A 24-240В АС.

Для подачі зниженої напруги у схему керування необхідно встановити понижувальний однофазний трансформатор (TV1). Вибираємо трансформатор типу ОМП-2,5 кВА 6/0,23кВ.

Проміжні реле (KV2 та KVф) вибираємо типу РП-311 на номінальні напруги 220 та 100 В.

Для організації часової затримки необхідно обрати реле часу (КТ). Вибираємо реле типу РВ-4 на напругу 127 В з діапазоном витримки часу 0,1-20 с.

Контактор (КМ) вибираємо на номінальну напругу котушки 220 В. Вибираємо модульний контактор типу A9C20884 iCT, 100 A, 4NO (4 нормально розімкнених контакта), напруга котушки 220-240В.

3. МОДЕЛЮВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ ПЧ-СД

3.1 Перетворення синхронної машини

При вивченні сталих симетричних режимів розглядається не вся машина в цілому, а лише процес в одній фазі при дії результуючого магнітного поля, створюваного всіма фазами. Цей прийом звичайний і в традиційному курсі електричних машин, коли розглядаються схеми заміщення і будуються векторні діаграми для однієї фази перетворювачів.

Якщо число фаз машини m дорівнює двом або більше двох, то струми в фазах створюють обертові магнітні поля. При числі фаз m = 2 число електричних контурів машини менше, ніж при числі фаз m > 2, і отже, зручно скористатися моделлю двигуна, де трифазна обмотка статора замінена двома, нерухомими відносно обертової системи координат *d-q*.

У цьому випадку вектор потокозчеплення $\overline{\Psi}$ визначається складовими (проекціями) на взаємно перпендикулярні осі фаз еквівалентної двофазної машини. Вектор, що зображує геометричну суму косинусоїдальної функції (або синусоїдальної) з однаковим періодом, називається зображуючим вектором. Маючи зображуючий вектор потокозчеплення статора $\overline{\Psi}^s$, можна говорити про еквівалентні фази двофазної машини a^s и b^s. Як правило, в якості осі однієї з фаз еквівалентної машини приймається вісь однієї з фаз реальної машини.

У багатофазних машинах при перетвореннях зберігаються постійними повна потужність або потужність кожної фази. У класичній теорії при аналізі, наприклад, асинхронних машин прийнято розглядати тільки одну фазу. Це може бути зроблено і в математичній моделі. Тому зручно зберігати потужність кожної фази інваріантною. Однак, для тих випадків, коли в рівняння входять моменти інерції і обертаючі моменти, що відносяться до всієї машині, доцільно зберегти інваріантну потужність всієї машини.

При перетворенні повинні бути інваріантними:

- МДС фази обмотки; потоки Φ і потокозчеплення Ψ;
- число полюсів і синхронна частота обертання;
- втрати;

- момент;

- електромагнітна потужність, потужність на валу і інші енергетичні показники.

Розглянемо просторові трифазну і двофазну обмотки (рис. 3.1, 3.2)

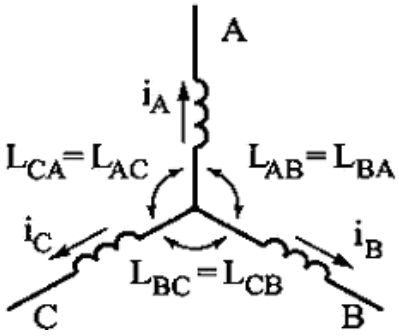


Рисунок 3.1 – Трифазна схема заміщення обмоток двигуна

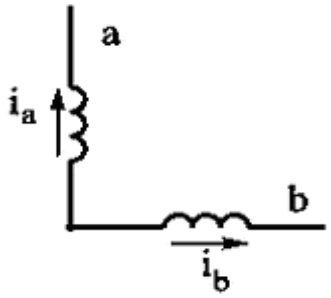


Рисунок 3.2 – Двофазна схема заміщення обмоток двигуна

Симетрична система струмів трифазної обмотки

$$\begin{aligned} i_A &= I_m \cdot \cos \omega t, \\ i_B &= I_m \cdot \cos(\omega t - 2\pi/3), \\ i_C &= I_m \cdot \cos(\omega t - 4\pi/3), \end{aligned} \qquad (3.1)$$

створює потокозчеплення взаємної індукції трьох фаз, які можуть бути зображені у вигляді векторів $\overline{\Psi}_A$, $\overline{\Psi}_B$, $\overline{\Psi}_C$ у напрямках осей фаз.

При заміні трифазної машини еквівалентної двофазної необхідно, щоб дві фази a и b створювали те саме результуюче потокощеплення взаємоіндукції, що і дійсна трифазна машина.

Можна визначити струми в обмотках a и b двофазної машини, що створюють обертове магнітне поле з постійною швидкістю та постійною амплітудою:

$$i_a = I_m \cdot \cos \omega t;$$
$$i_b = I_m \cdot \cos(\omega t - \pi/2). \quad (3.2)$$

Прості геометричні міркування дозволяють отримати формули переходу від трифазної системи до еквівалентної двофазної: складові вектора $\overline{\Psi}$ по нових осях a и b прирівнюються до суми проекцій складових цього вектора за старих осей, тобто:

$$\Psi_a = \frac{2}{3}\left(\Psi_A \cdot \cos 0^\circ - \Psi_B \cdot \cos 60^\circ - \Psi_C \cdot \cos 60^\circ\right) = \frac{2}{3}\left[\Psi_A - (\Psi_B + \Psi_C)/2\right], \quad (3.3)$$

$$\Psi_b = \frac{2}{3}\left(\Psi_A \cdot \cos 90^\circ - \Psi_B \cdot \cos 30^\circ - \Psi_C \cdot \cos 30^\circ\right) = \frac{2}{3}\frac{\sqrt{3}}{2}(\Psi_B + \Psi_C).$$

(3.5)

До цих двох рівняннях необхідно додати ще одне для потокозчеплення нульової послідовності:

$$\Psi_0 = (\Psi_A + \Psi_B + \Psi_C)/3. \quad (3.6)$$

Струми еквівалентної двофазної машини, виражені через струми фаз вихідної трифазної системи:

$$i_a = \frac{2}{3}\left(i_A - \frac{i_B + i_C}{2}\right), \quad (3.7)$$

$$i_a = \frac{\sqrt{3}}{3}(i_B - i_C), \quad (3.8)$$

$$i_0 = \frac{1}{3}(i_A + i_B + i_C). \quad (3.9)$$

Перетворення ABC→ab0 для струмів в матричній формі може бути записано таким чином:

$$\begin{vmatrix} i_a \\ i_b \\ i_0 \end{vmatrix} = \frac{2}{3}\begin{vmatrix} \cos 0^\circ & -\cos 60^\circ & -\cos 60^\circ \\ \cos 90^\circ & \cos 30^\circ & -\cos 30^\circ \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{vmatrix}. \quad (3.10)$$

Потокозчеплення або струми трифазної машини, виражені через потокозчеплення або струми еквівалентної двофазної машини, можуть бути отримані або при знаходженні проекцій відповідних векторів Ψ_a, Ψ_b (i_a, i_b) на

вісі ABC, або за рівнянням (3.10). В обох випадках при відсутності струму i_0 струм фази а рівний струму i_A. Рішення завдання, пов'язаного з аналізом електромеханічних процесів, виконане один раз для двофазної машини, може бути поширене на будь-яку багатофазну машину.

Представлені рівняння і пояснення до них справедливі при перетворенні до двофазної системі як статорних, так і роторних величин.

3.2 Рівняння синхронної машини в осях dq

При розробці математичної моделі для уникнення занадто громіздких і складних описів застосовані наступні припущення:

- відсутні втрати в сталі;
- повітряний зазор рівномірний, магнітна провідність однакова і розподіл магнітного поля в повітряному зазорі синусоїдально;
- відсутній вплив ємностей всередині та між обмотками;
- активний опір не залежить від температури;
- статор і ротор мають трифазні симетричні обмотки.

Зазвичай в каталогах на синхронні машини параметри даються у відносних одиницях. Тому доцільно при розгляді математичного опису електромагнітних процесів в синхронному двигуні також перейти до відносних одиниць, тобто унормувати рівняння, що входять до його математичного опису. Базові значення, до яких виконується нормування, повинні бути вибрані так, щоб максимально спростити вихідні рівняння при збереженні їх відповідності фізичним процесам, що відбуваються в двигуні.

В якості базисної напруги приймається номінальна фазна напруга

$$U_б = U_{nom.}; \quad (3.11)$$

базисний струм

$$I_б = I_{nom.}; \quad (3.12)$$

базисна потужність

$$P_б = S_{nom.}; \quad (3.13)$$

базисний опір

$$R_б = X_б = Z_б = \frac{U_б}{I_б}; \quad (3.14)$$

базисна частота обертання

$$\omega_б = \omega_0 = 2 \cdot \pi \cdot f = 314 \ \text{рад/с}; \quad (3.15)$$

де f=50 Гц – частота живильної мережі;

синхронна частота обертання, (в.о.): $\omega_0 = 1$;

базисний час

$$t_б = \frac{1}{\omega_0}; \quad (3.16)$$

час у відносних одиницях (в.о.)

$$t = \frac{t_{(с)}}{t_б} = t_{(с)} \cdot \omega_0 = 314 \cdot t, \quad (с),$$

тобто 1с відповідає 314 в.о. часу;

базисна одиниця для індуктивності:

$$L_б = \frac{X_б}{\omega_б} = \frac{U_б}{I_б \cdot \omega_0}. \quad (3.17)$$

Як видно з (3.17) при синхронній швидкості ($\omega_0 = 1$) індуктивність і індуктивний опір у відносних одиницях чисельно рівні.

Базисна одиниця для потокозчеплення:

$$\psi_б = \frac{U_б}{\omega_0}; \quad (3.18)$$

базисна одиниця для моменту:

$$m_б = P_б \frac{1}{\omega_0}.$$

При аналізі режимів роботи і перехідних процесів, що відбуваються в СД, замість напруг, струмів і потокозчеплень окремих фаз розглядається узагальнений вектор напруги, струму і потокозчеплення, що характеризує результуючу дію симетричної трифазної системи. При обертанні узагальненого вектора в ту ж

сторону, що і системи трьох векторів чергування осей часу фаз необхідно прийняти протилежним чергуванню векторів фазних величин.

Узагальнений вектор напруги симетричної трифазної системи можна виразити через фазні значення:

$$\dot{U} = \frac{2}{3}(u_a + \alpha u_b + \alpha^2 u_c), \tag{3.19}$$

де $\alpha = e^{j120}$ – множник; u_a, u_b, u_c – фазні напруги.

Для того, щоб уникнути періодичних коефіцієнтів, які залежать від кутового положення ротора, диференціальні рівняння синхронного генератора записуються в осях *d, q*, жорстко пов'язаних з його ротором.

Електромагнітні процеси, що відбуваються в СД описуються рівняннями Парка-Горєва. Таким чином, диференційні рівняння, що описують поведінку СД з багатоконтурним ротором (*i*=1,2,...,*k*), спираючись на [20], можна представити таким чином:

$$\left.\begin{aligned}
p\psi_{Sd} &= u_{Sd} - \alpha_S \cdot \psi_{Sd} + \alpha_S \cdot \psi_{ad} + \omega \cdot p \cdot \psi_{Sq} \\
p\psi_{Sq} &= u_{Sq} - \alpha_S \cdot \psi_{Sq} + \alpha_S \cdot \psi_{aq} - \omega \cdot p \cdot \psi_{Sd} \\
p\psi_{Rd}^{(i)} &= -\alpha_{Rd}^{(i)} \cdot (\psi_{Rd}^{(i)} - \psi_{ad}) \\
p\psi_{Rq}^{(i)} &= -\alpha_{Rq}^{(i)} \cdot (\psi_{Rq}^{(i)} - \psi_{aq}) \\
p\psi_f &= u_f - \alpha_f \cdot (\psi_f - \psi_{ad}) \\
p\omega &= \frac{1}{T_m} \cdot (m_e - m_c) \\
p\gamma &= \omega \\
m_e &= \overrightarrow{\psi_S} \times \overrightarrow{i_S}
\end{aligned}\right\}, \tag{3.20}$$

де $p = \frac{d}{dt}$ – оператор диференціювання;

u_{Sd}, u_{Sq} – напруга на виводах СД по осях d і q;

$\psi_{Sd}, \psi_{Rd}^{(i)}, \psi_{Sq}, \psi_{Rq}^{(i)}, \psi_f$ – потокозчеплення статора, і-ого роторного контуру СД по осях d, q і потокозчеплення обмотки збудження відповідно;

$p\psi_{Sd}, p\psi_{Rd}^{(i)}, p\psi_{Sq}, p\psi_{Rq}^{(i)}, p\psi_f$ – похідні потокозчеплень статора, і-ого роторного контуру СД по осях d, q і похідна потокозчеплення обмотки збудження синхронного двигуна відповідно;

u_f – напруга обмотки збудження;

ω – частота обертання ротора СД;

$T_m = \frac{J \cdot \omega_б^2}{m_б}$ – механічна постійна часу,

J – сумарний момент інерції;

m_c, m_e – момент опору механізму і крутний момент двигуна;

$\vec{i_S}, \vec{\psi_S}$ – результуючі вектори струму статора і його потокозчеплення;

γ – кут повороту ротора, тобто кут між віссю d та електричною віссю обмотки фази *a*;

$\alpha_S, \alpha_{Rd}^{(i)}, \alpha_{Rq}^{(i)}, \alpha_f$ – коефіцієнти затухання контуру статора, і-ого роторного контуру по осі d, і-ого роторного контуру по осі q і обмотки збудження:

$$\alpha_S = \frac{R_S}{L_{\sigma S}}, \alpha_{Rd}^{(i)} = \frac{R_{Rd}^{(i)}}{L_{\sigma Rd}^{(i)}}, \alpha_{Rq}^{(i)} = \frac{R_{Rq}^{(i)}}{L_{\sigma Rq}^{(i)}}, \alpha_f = \frac{R_f}{L_{\sigma f}}, \qquad (3.21)$$

де $R_S, R_{Rd}^{(i)}, R_{Rq}^{(i)}, R_f$ – активний опір обмотки статора, і-ого роторного контуру по осі d, і-ого роторного контуру по осі q і обмотки збудження;

$L_S, L_{Rd}^{(i)}, L_{Rq}^{(i)}, L_f$ – індуктивність розсіювання обмотки статора, і-ого роторного контуру по осі d, і-ого роторного контуру по осі q і обмотки збудження.

Потокозчеплення гілки намагнічування по поздовжній і поперечній осі:

$$\psi_{ad} = a_{Sd} \cdot \psi_{Sd} + a_f \cdot \psi_f + \sum_{i=1}^{k} a_{Rd}^{(i)} \cdot \psi_{Rd}^{(i)};$$

$$\psi_{aq} = a_{Sq} \cdot \psi_{Sq} + \sum_{i=1}^{k} a_{Rq}^{(i)} \cdot \psi_{Rq}^{(i)},$$

де $a_{Sd}, a_{Sq}, a_{Rq}^{(i)}, a_{Rd}^{(i)}, a_f$ – коефіцієнти розподілу потокозчеплень статора, і-ого роторного контуру по осях d, q, та обмотки збудження відповідно, які визначаються як:

$$a_{Sd} = \frac{L_{SRd}}{L_{\sigma S}}, a_{Sq} = \frac{L_{SRq}}{L_{\sigma S}}, a_{Rd}^{(i)} = \frac{L_{SRd}}{L_{\sigma Rd}^{(i)}}, a_{Rq}^{(i)} = \frac{L_{SRq}}{L_{\sigma Rq}^{(i)}}, a_f = \frac{L_{SRd}}{L_{\sigma f}}, \qquad (3.22)$$

де $$L_{SRq} = \left[\frac{1}{L_{\sigma S}} + \frac{1}{L_{aq}} + \sum_{i=1}^{k} \frac{1}{L_{\sigma Rq}^{(i)}} \right]^{-1};$$

$$L_{SRd} = \left[\frac{1}{L_{\sigma S}} + \frac{1}{L_{ad}} + \frac{1}{L_{\sigma f}} + \sum_{i=1}^{k} \frac{1}{L_{\sigma Rd}^{(i)}} \right]^{-1},$$

де L_{ad}, L_{aq} – індуктивність гілки намагнічування по осях d і q.

Опори схеми заміщення, постійні часу обмоток по поздовжньої і поперечної осі для неявнополюсного двигуна рівні.

Струми статора, обмотки збудження і і-ого роторного контуру визначаються з наступних співвідношень:

$$i_{Sd} = \frac{\psi_{Sd} - \psi_{ad}}{L_{\sigma S}}, i_{Sq} = \frac{\psi_{Sq} - \psi_{aq}}{L_{\sigma S}}, i_{Rd}^{(i)} = \frac{\psi_{Rd}^{(i)} - \psi_{ad}}{L_{\sigma Rd}^{(i)}},$$
$$i_{Rq}^{(i)} = \frac{\psi_{Rq}^{(i)} - \psi_{aq}}{L_{\sigma Rq}^{(i)}}, i_f = \frac{\psi_f - \psi_{ad}}{L_{\sigma f}}. \qquad (3.23)$$

Рівняння для визначення напруги збудження, що враховують тип збудника і АРВ, є частиною математичної моделі СД. З урахуванням дії форсування збудження, рівняння для визначення напруги збудження двигуна з системою самозбудження представлено як:

$$u_f = k_f \frac{u_{fном} \cdot u_S}{u_{Sном}}, \qquad (3.24)$$

де $u_{fном}$ – номінальне значення напруги збудження;

$u_{Sном}$ – номінальна напруга статора;

u_S – діюче значення напруги статора;

k_f – кратність форсування збудження.

3.3 Моделювання системи

Для моделювання такої системи найкраще підходить математичний комплекс MatLab (Matrix Laboratory), а саме його розширення Simulink, в якому вже є майже всі необхідні для моделювання блоки. Математична модель (система рівнянь), що характеризує роботу синхронного двигуна, складена з блоків Simulink, приведена на рис. 3.3 .

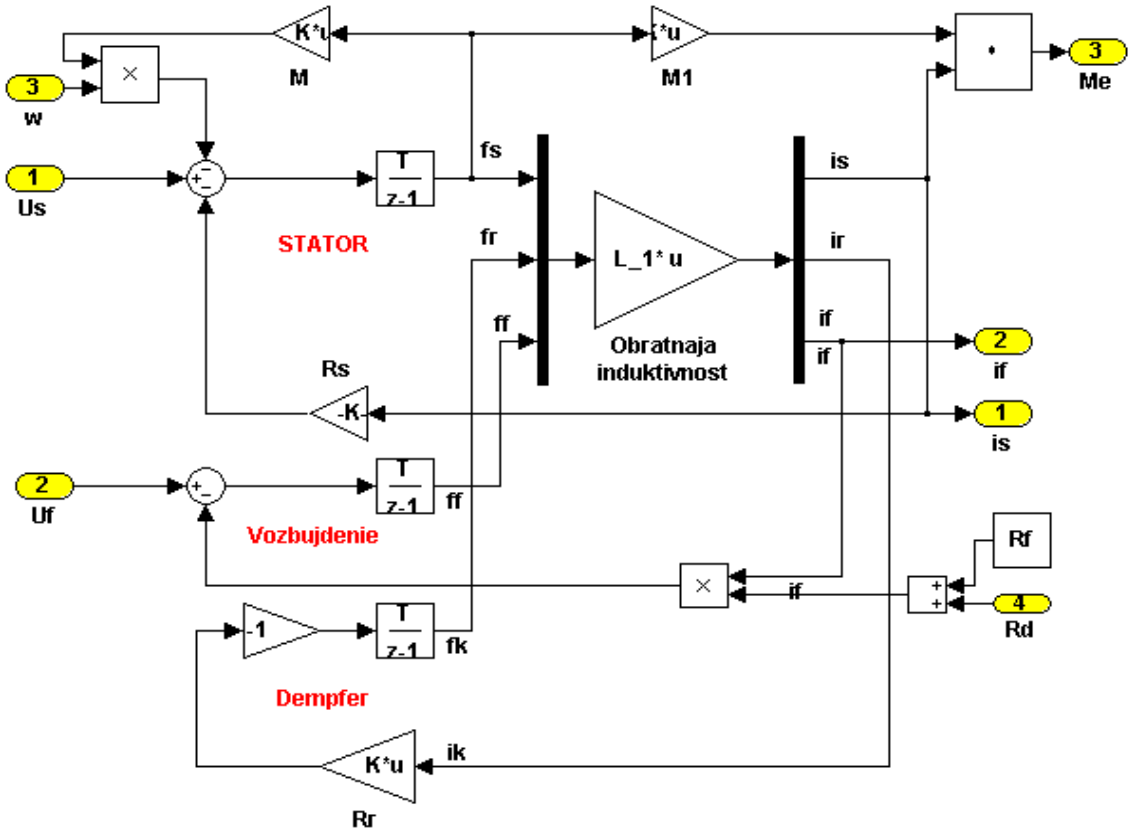


Рисунок 3.3 – Математична модель синхронного двигуна з блоків Simulink

Додаємо в моделювання елементи механічної системи. Модель синхронного двигуна разом з механічною системою електропривода представлена на рис. 3.4.

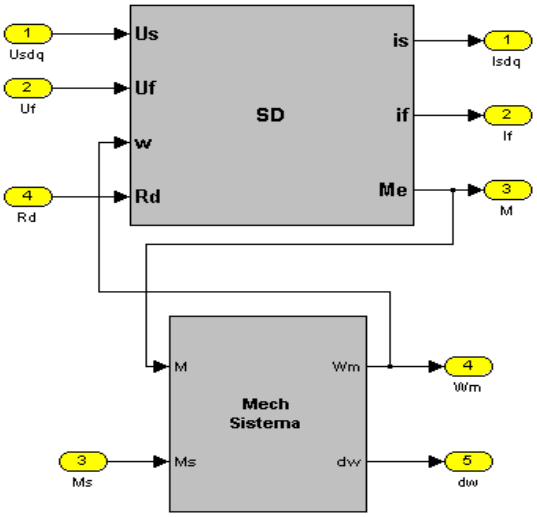


Рисунок 3.4 – Модель СД з механічною системою електропривода

Необхідно також додати в модель рівняння руху електроприводу:

$$J\frac{d\omega}{dt} = M - M_C. \qquad (3.25)$$

Відтепер підключимо до входів моделі блоки перетворення ABC → dq (система dq пов'язана з ротором) (рис. 3.5).

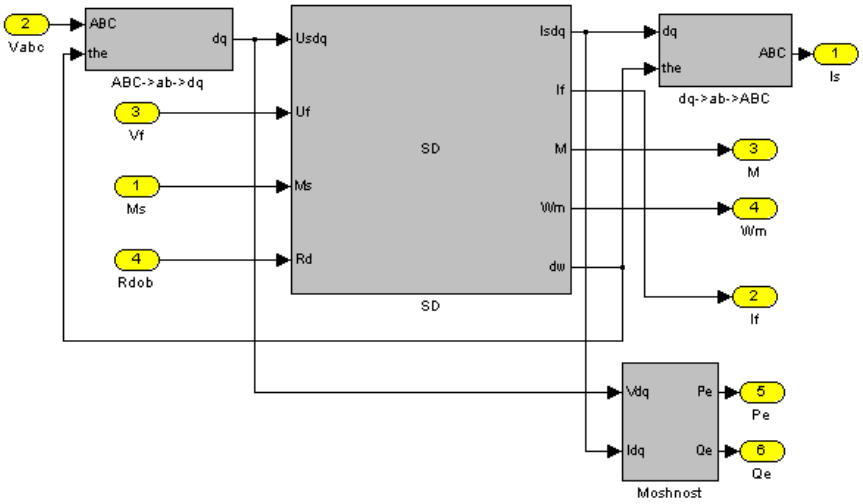


Рисунок 3.5 – Перетворення ABC→dq

Для того, щоб скористатися вже наявними в Simulink електротехнічними блоками, необхідно підключити до входів моделі вольтметри і керовані джерела струму за запропонованою схемою. Це дозволить змоделювати синхронну машину як електричну модель – потужність у ній може передаватися в обидві сторони (тут звичайні, неелектричні блоки Simulink односпрямовані) (рис. 3.6).

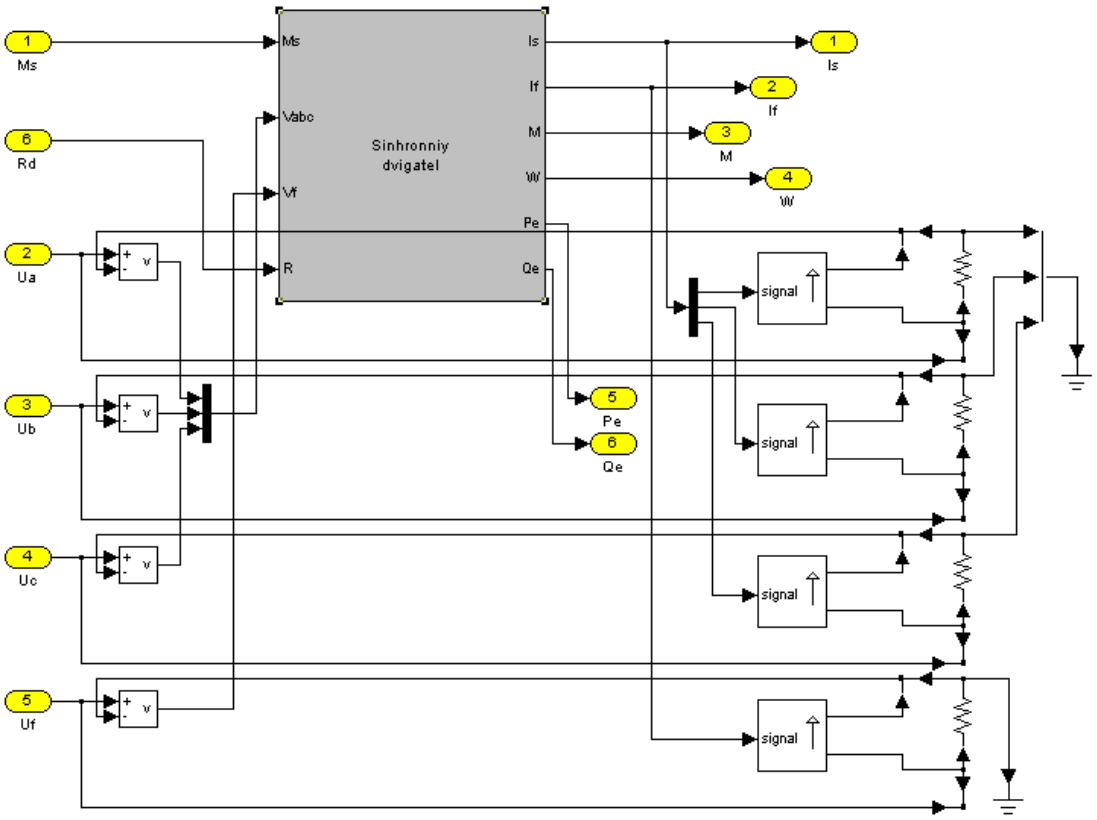


Рисунок 3.6 – Електрична модель синхронного двигуна

Для моделювання перетворювача частоти доцільніше використовувати вже наявні в Simulink діодні мости і мости з IGBT транзисторами. На вхід блоку ШІМ інвертора подається завдання швидкості і глибина модуляції, які перетворюються в трифазну систему напруги і подаються на нуль орган (Discrete PWM Generator), який, у свою чергу, генерує керуючі імпульси для IGBT інвертора (рис. 3.7).

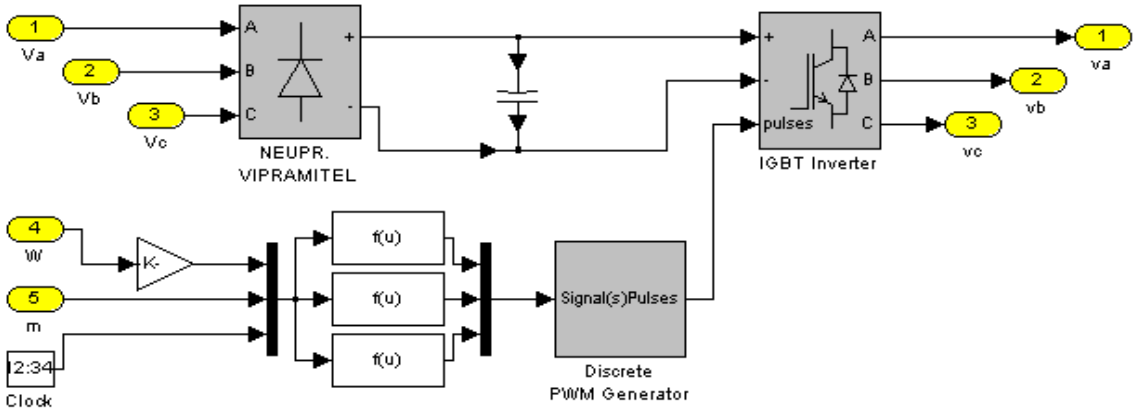


Рисунок 3.7 – Модель ШІМ інвертора

Підключаємо буровий насос (Nasos), модель якого представлена його навантажувальної характеристикою. Таким чином, була отримана модель ПЧ-СД (рис. 3.8).

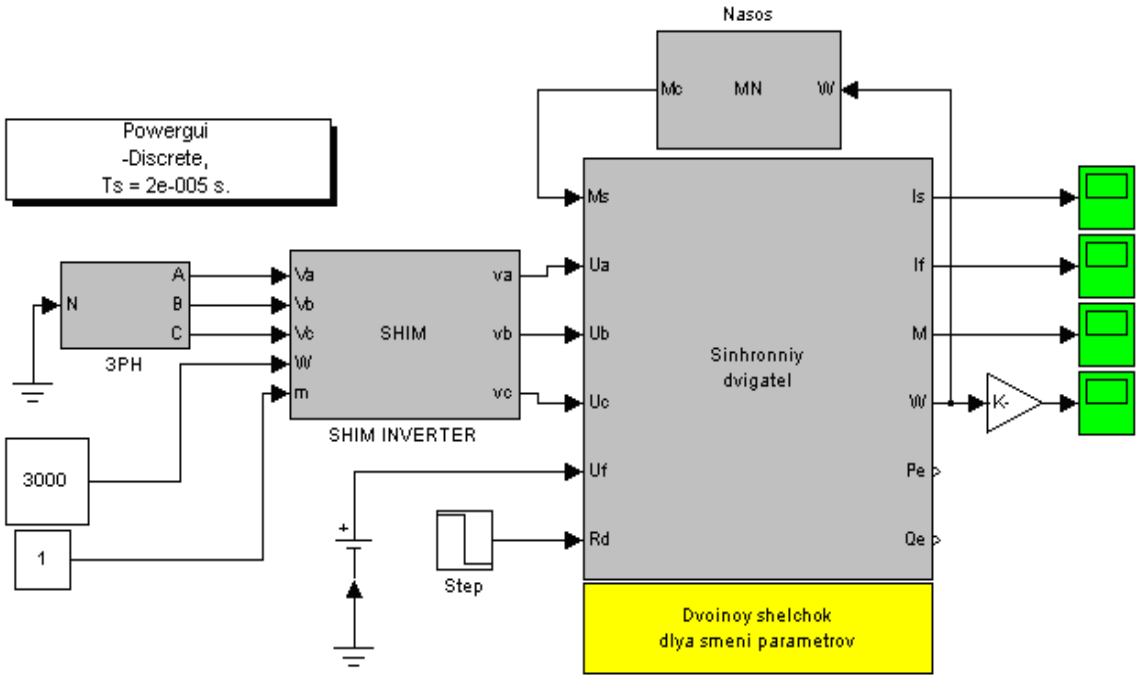


Рисунок 3.8 – Модель електроприводу

Характеристики, отримані на основі наведеної вище моделі, приведені на рис. 3.9 – 3.15.

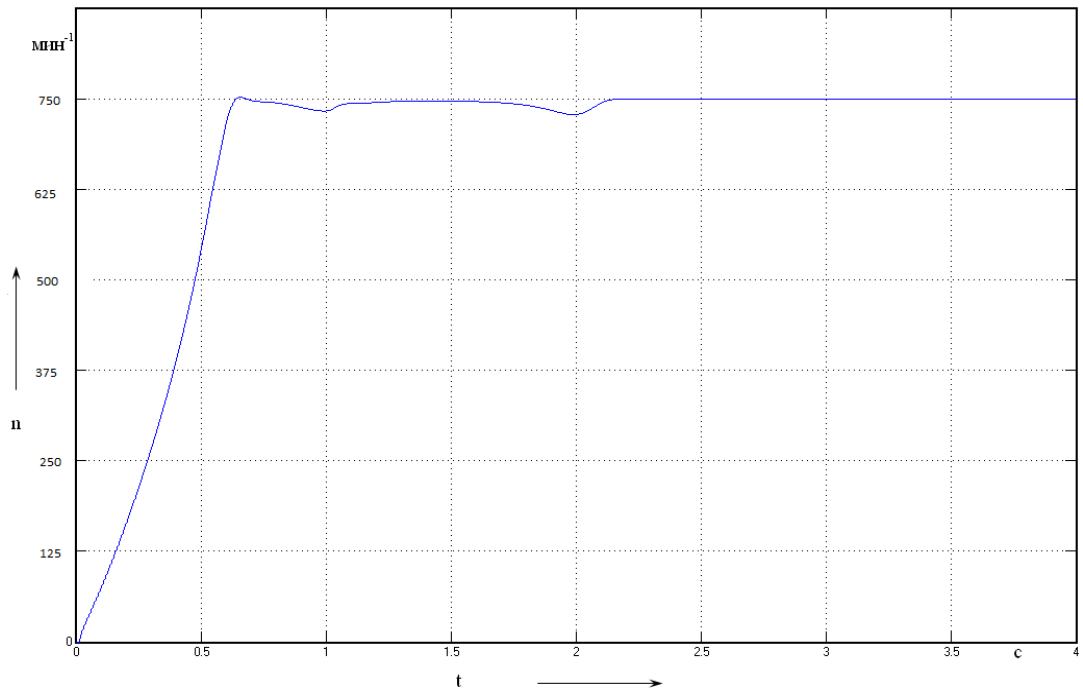


Рисунок 3.9 – Крива розгону електродвигуна

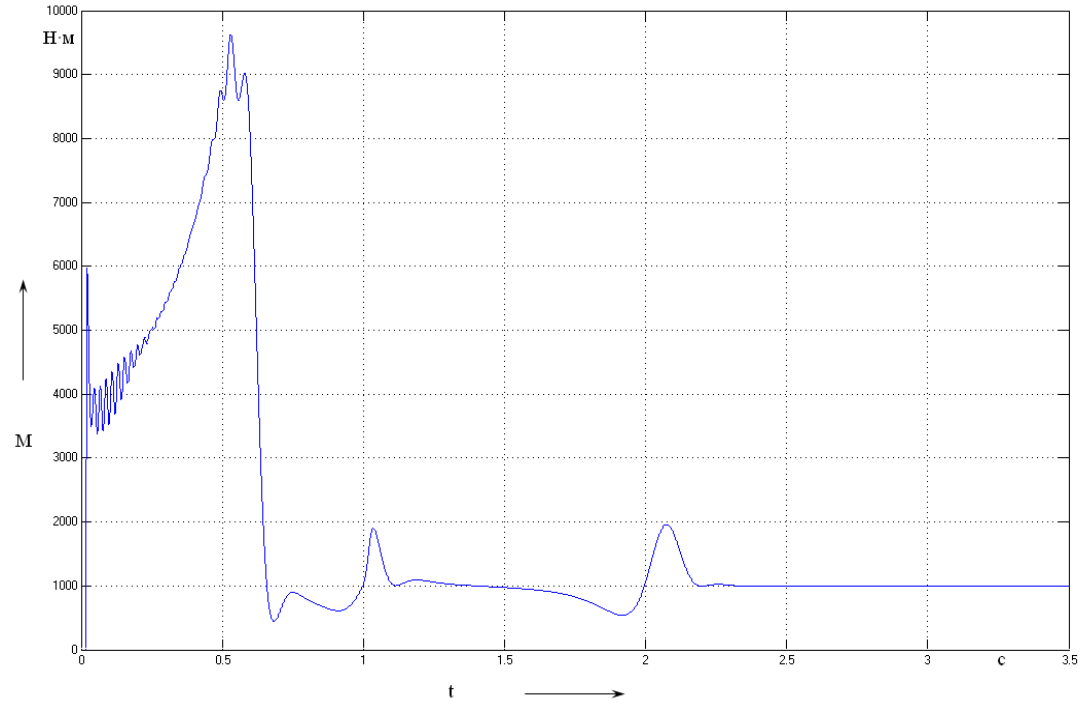


Рисунок 3.10 – Момент на валу електродвигуна під час пуску

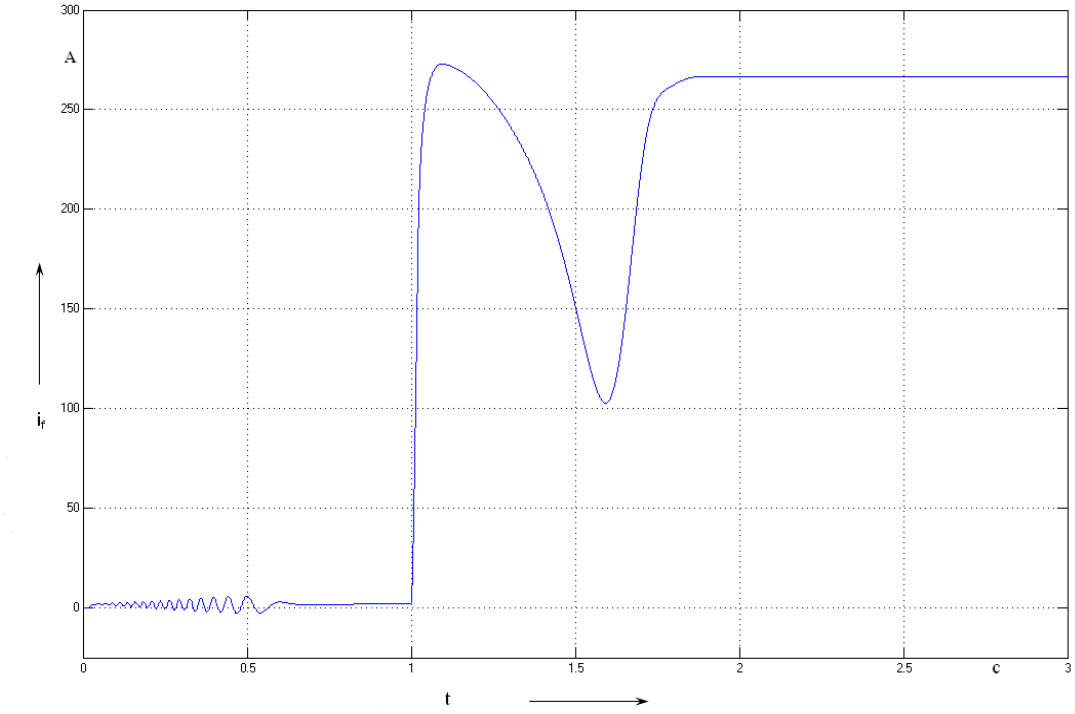


Рисунок 3.11 – Струм збудження електродвигуна під час пуску

Дані характеристики (рис. 3.9 –3.11) показують, що під час пуску двигун виходить на номінальний режим за час близько 2 секунд, що цілком задовольняє умові надійного пуску бурового насоса та технологічному процесові [15].

Далі за допомогою розробленої моделі було проведене дослідження динаміки системи при регулювання швидкості обертання двигуна.

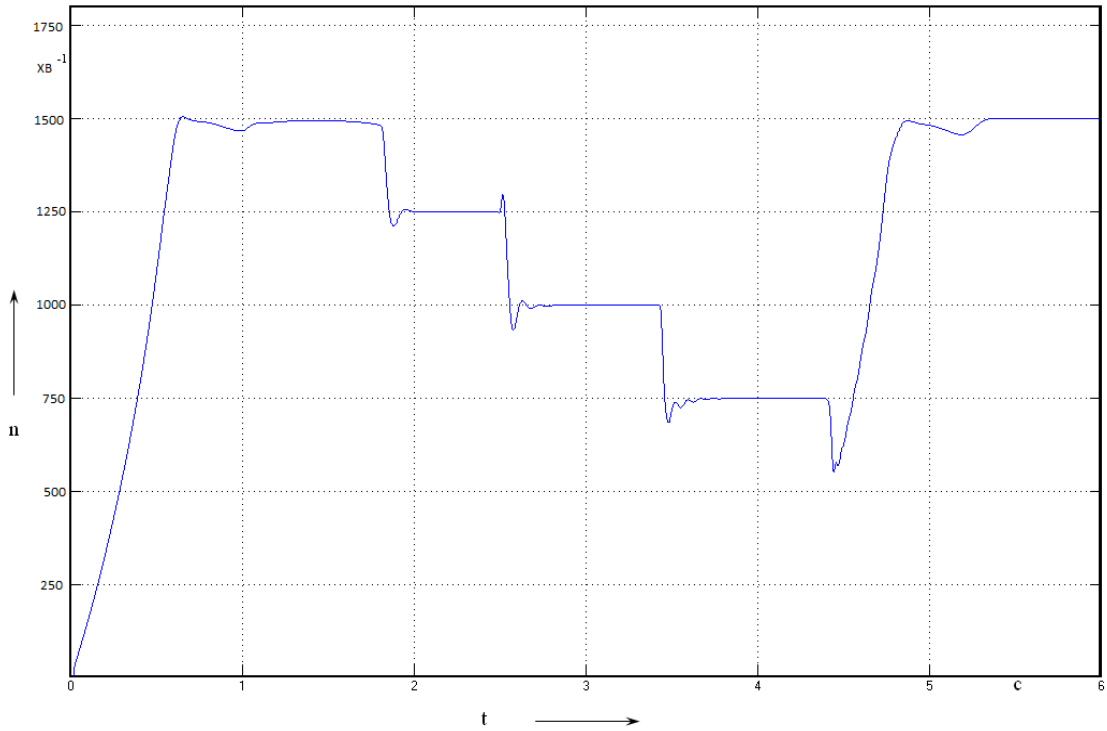


Рисунок 3.12 – Регулювання швидкості обертання

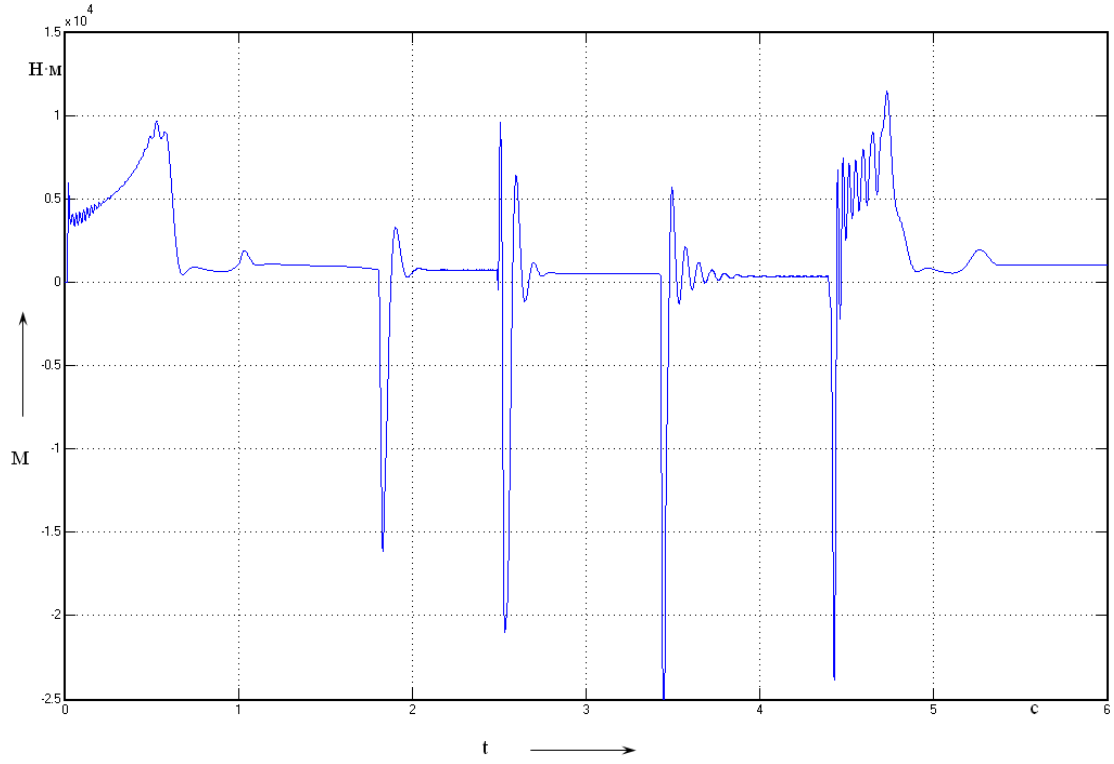


Рисунок 3.13 – Електричний момент двигуна при регулюванні швидкості обертання

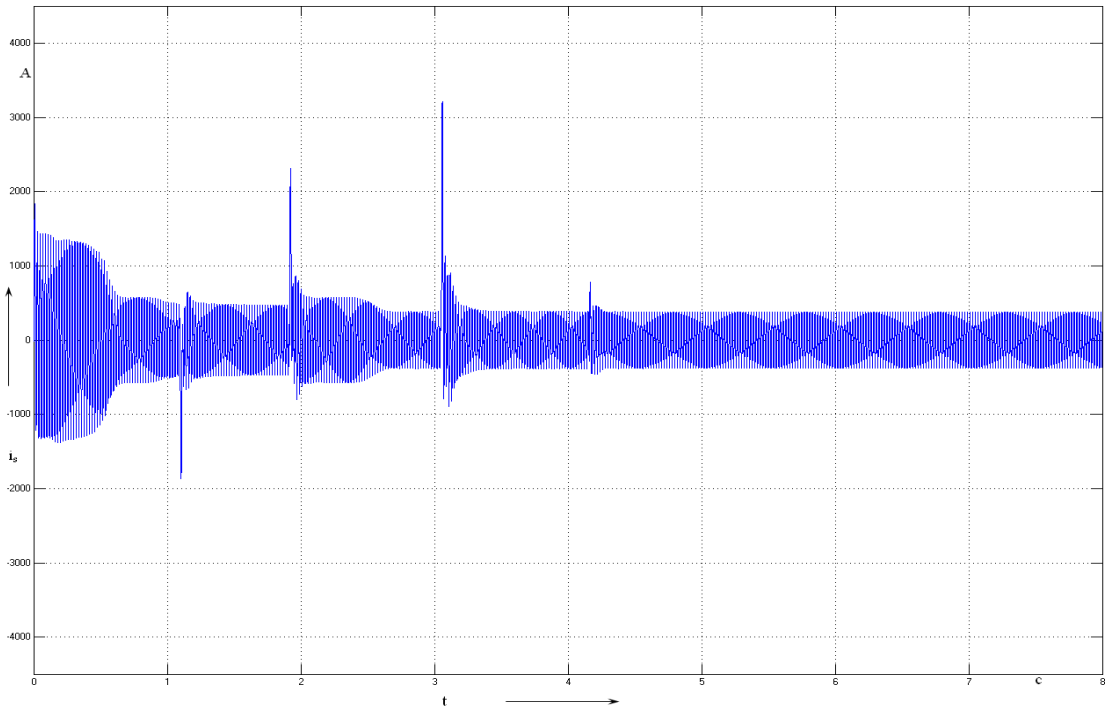


Рисунок 3.14 – Струм статора (фаза А) при регулюванні швидкості (фази В, С – аналогічно)

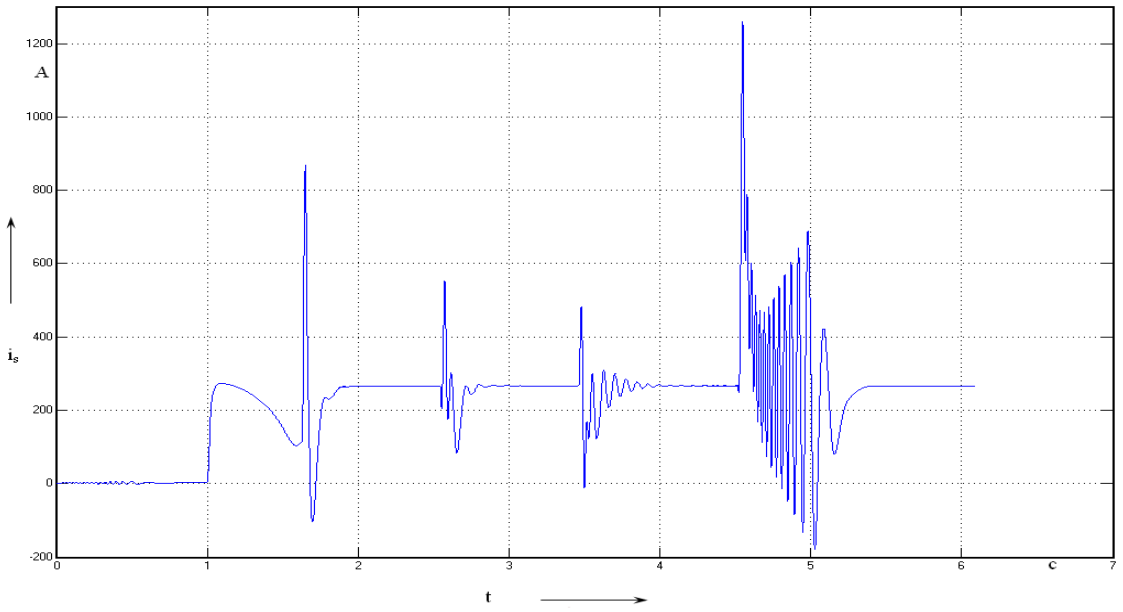


Рисунок 3.15 – Струм збудження при регулюванні швидкості обертання

На підставі даних результатів досліджень (рис. 3.12 – 3.15) можна стверджувати наступне: створена система працездатна, всі характеристики лежать у межах норми, в перехідних режимах при регулюванні швидкості відбувається швидке встановлення основних параметрів роботи бурового насоса, що відповідає завданню.

ВИСНОВКИ

В даній роботі була проведена модернізація електроприводу бурового насоса типу „УНБ-600”. Проаналізовані переваги та недоліки електроприводу, що існує, зроблено висновок про необхідність вдосконалення приводу.

Проведений перерахунок потужності двигуна, старий двигун замінений на більш сучасний з кращими характеристиками, також проведена перевірка обраного двигуна на перевантаження.

Проведена модернізація електроприводу бурового насоса, при цьому електрично нерегульована система електроприводу замінена на більш сучасну систему «Тиристорний перетворювач – синхронний двигун», яка дає можливість здійснювати регулювання швидкості не вимикаючи двигун, що значно покращує енергетичні та технологічні показники роботи насоса.

Проведене математичне моделювання роботи електроприводу, за допомогою якого були досліджені характеристики системи під час пуску. Дослідження показали, що під час пуску двигун виходить на номінальний режим за час близько 2 секунд, що цілком задовольняє умові надійного пуску бурового насоса та технологічному процесові.

Також були проведені дослідження системи під час регулювання швидкості, які довели, що створена система працездатна, всі характеристики лежать у межах норми, в перехідних режимах при регулюванні швидкості відбувається швидке встановлення основних параметрів роботи бурового насоса, що відповідає завданню.

ВИКОРИСТАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Н.В. Єрмілова. Навчальний посібник до самостійного вивчення матеріалу «Електрообладнання та електропостачання об’єктів нафтогазової промисловості» з дисципліни «Електротехніка та електропостачання» для студентів спеціальності 185 «Нафтогазова інженерія та технології». – Полтава: Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», 2021. – 76 с.
2. И.И.Алиев. Справочник по электротехнике и электрооборудованию. – М.: Высш.шк., 2002.– 255 с.
3. Забродин Ю.С. “Промышленная электроника”.– М.: Высшая школа, 1982.– 496с.
4. Руденко В.С., Сенько В.Н., Трифонюк В.В., Юдин Е.Е. “Промышленная электроника”.– К.: Техника, 1979.– 499 с.
5. Триполитов С.В., Ермилов А.В. “Микросхемы, диоды, транзисторы” (справочник.).– М.: Машиностроение, 1994. – 261 с.
6. “Справочник по проектированию автоматизированного электропривода и систем управления технологическими процессами” под редакцией В.И. Круповича, Ю.Г.Барыбина, М.Л.Самовера. – Москва: Энергоатомиздат, 1982. – 416 с.
7. “Примеры расчётов автоматизированного электропривода” А.В.Башарин, Ф.Н.Голубев, А.М.Кепперман. – Москва: Энергия, 1971. – 440 с.
8. Гусев И.Т. и др. “Устройства числового программного управления: Учеб. пособие для технических Вузов”. – М.: Высш. шк., 1980. – 197 с.
9. Ильин О.П. и др. Системы программного управления производственными установками и роботехническими комплексами: Учеб. пособие для вузов. – Минск.: Высш. шк., 1988. – 258 с.
10. “Установка буровая «Уралмаш – 4Е». Электрооборудование. Техническое описание и инструкция по експлуатации: Часть 1” 44.63320 – 1 ТО. – 1989. – 26с.

11. “Установка буровая «Уралмаш – 4Е». Электрооборудование. Техническое описание и инструкция по експлуатации: Часть 3 Электропривод бурових насосов”. 44.63320 – 1 ТО2. – 1989. – 27 с.
12. “Правила улаштування електроустановок”. – Харків.: «ІНДУСТРІЯ», 2008р. – 424 с.
13. А. А. Ильинский В. М. Касьянов В. С. Порошин. Буровые машины, механизмы и сооружения. – Москва: Недра, 1967.
14. Г. В. Алексеевский. Буровые установки Уралмашзавода - Москва: Недра, 1981.
15. Галай М.В. “Лінійні неперервні системи автоматичного керування”.– Полтава: ПДТУ, 2001.– 140с.
16. “Правила безпеки у нафтогазовидобувній промисловості України”. – Київ.: Техніка – 2004. - 126 с.
17. Галай М.В. “Теорія автоматичного керування: Навчальний посібник”. – Полтава: “Полтава”, 1988.– 470 с.
18. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием: учеб. пособие. – М.: Академия, 2006. с. 57 – 70.
19. Шефер О.В., Єрмілова Н.В., Кислиця С.Г. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи бакалавра студентів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» – Полтава: НУ «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», 2021. – 14 с.
20. Правила улаштування електроустановок. Україна, вид. 5-е, перероб. і доп.: Видавництво «Мінпаливенерго»,– 2017. – 736 с.

ДОДАТКИ

Додаток А

1. TECHNOLOGICAL PART

1.1 Application and classification of drilling rigs

Drilling rigs are used for drilling shallow (up to 25 meters) ditches of small diameter (76-219 mm) in seismic exploration and engineering surveys, as well as:

- drilling of wells of medium depth (up to 600 m) - structural and exploratory wells for solid minerals;

- drilling of deep (up to 6000 m) exploration and production wells for oil and gas;

- overhaul and testing of oil and gas wells;

- drilling of wells for water;

- drilling of explosive wells in open pit workings and in mines.

By type of work drilling rigs are distributed:

- for operational works;

- for reconnaissance work;

- for technical wells.

According to the method of drilling, the following drilling rigs are distinguished:

- rotary drilling;

- rotary - impact drilling;

- impact drilling;

- fire jet drilling;

- discharge-pulse drilling;

By type of drive drilling rigs are divided into:

- electric (AC / DC) drilling rigs;

- electrohydraulic drilling rigs;

- diesel-electric drilling rigs;

- diesel drilling rigs.

The oil and gas industry, and especially electric drilling, are very energy-intensive industries, with the bulk of electricity consumed by the drive of drilling pumps and winches. Significant increases in the cost of electricity from centralized power sources and the cost of transmission lines, as well as the emerging trend towards autonomous energy supply with limited installed capacity sources, bring energy saving tasks to the fore. When drilling in the oil and gas industry, these problems are successfully solved by using an adjustable electric drive.

In the coming years, the main volume of implementation of regulated electric drives at oil and gas companies of our country will be associated with their reconstruction. At the same time, together with the replacement of worn-out or obsolete equipment, it is possible to modernize electric drives by completing existing electric machines and control systems with thyristor converters and other components of the regulated electric drive. At the same time, the expected energy savings due to the introduction of an adjustable electric drive can be up to 40% of the expected savings for the whole set of measures.

The practical non-alternative nature of the adjustable electric drive for heavy and extreme operating conditions makes it especially important to create such electric drives for technical means of development of the continental shelf.

The main directions of electric drive development of technological installations of oil and gas industry coincide with the general trend of electric drive development and at the present stage is characterized by increasing use of adjustable electric drive and computer automation in creating new and upgrading existing technological equipment. It should also be noted the specific for the oil and gas industry direction

of further improvement of the electric drive - increasing the reliability and explosion protection.

1.2 Technical characteristics of the drilling rig type Uralmash-4E

The Uralmash-4E drilling rig is designed for drilling oil and gas wells in electrified areas to a depth of 5,000 meters.

The conditional drilling depth of a well with a mass of one meter of a drill string of 30 kilograms is 5000 meters. The load on the hook in the process of conducting and fastening the well in 2250 kN is allowed. The maximum speed of lifting the hook is 5.8 meters per second, the minimum - 0.19. The maximum speed of the rotor table is 232 revolutions per minute, the minimum is 20. The power supply of the drilling rig is carried out from the AC network of 6000 V, 50 Hz.

The electrical equipment of the drilling rig consists of a number of independent control systems for the drives of the main and auxiliary mechanisms of the drilling rig:

- electrical equipment for power supply and distribution of electricity with a voltage of 6000 V;

- electrical equipment for power supply and distribution of electricity with a voltage of 380/220 V;

- electrical equipment of the drilling winch;

- electrical equipment of drilling pumps;

- electrical equipment of low pressure compressors;

- electrical equipment of high pressure compressors;

- electrical equipment of the auxiliary winch;

- electrical lighting equipment;

- electrical equipment of the circulation system.

1.3 Characteristics and equipment of drilling pumps

The drilling pump is designed to inject drilling mud into the drill string and create circulation of drilling mud in the well during drilling. Drilling pumps are the main consumers of electricity, they account for 70-80% of the installed power of the engines of the entire drilling rig. The power of modern drilling pumps ranges from

300 to 3000 kW. For each class of rig, the pump must have a certain power, supply and pressure.

The pumps can operate at an ambient temperature of ±50°C. The temperature of the drilling mud varies from -1 to 80 ° C. The drilling pump must be adapted to a step change of feed during drilling 2-3 times. In addition, it must be able to briefly develop the necessary pressure to push the particles of drilled rock, which settle in the annulus.

Pump operating time - from 30 minutes to 200 hours and more depending on the term of operation of a bit. The period of periodic technological stops can be 3-15 minutes to build a drill string, about 10 hours when lowering and lifting the bit from great depths.

Analysis of the design features of different types of pumps shows that the requirements of the pressure technology are most satisfied by reciprocating horizontal pumps. Piston pumps have a capacity of 32, 50, 80, 125, 190, 235, 300, 345, 475, 600, 750, 950, 1180, 1840 kW at a maximum supply of 40-50 l / s of drilling mud and develop a maximum pressure of 90-105 MPa at minimum feeds. At the beginning of well drilling, the pressure created by the pump is small. As the well deepens, due to the increase in hydraulic resistance of the pipes increases and the pressure at the pump outlet. Therefore, starting from a certain depth, the pump supply must be limited. With an unregulated electric drive, the pump flow control from 5–20 l / s to the maximum is regulated by step-by-step replacement of pistons and bushings of different diameters. In modern circuits, smooth flow control is carried out by adjusting the speed of the motors using powerful frequency converters. Powerful synchronous and asynchronous motors with short-circuited and phase rotor, which are powered by 6000 V, are used as drive motors.

At rotary drilling with continuous circulation of solution piston pumps with various structural schemes are applied:

- direct,

- drive.

Despite the more complex design and uneven flow, reciprocating drive pumps are the most common in drilling rigs because they are much more economical than reciprocating direct-acting pumps.

Among reciprocating drive pumps, two-piston double-acting pumps and three-piston single-acting pumps are mainly used. As practice has shown, a further increase in the number of pistons is irrational due to the increase in wear parts and complexity in operation. Significant pulsation of the instantaneous supply in reciprocating drive

pumps is the result of the conversion of rotational motion into reciprocating motion, which is carried out by the crank mechanism. To reduce the harmful effects of the supply pulsation, compensators have been introduced into the design of these pumps, which dampen the fluctuations of the drilling fluid supply. Attempts to use two-piston double-acting pumps, in which the supply is much more uniform than in two-piston, did not give satisfactory results. With the advent of more advanced diaphragm compensators, which provide high uniformity of supply, complex three-piston pumps of double action have lost their advantages.

Attempts have been made to use multi-plunger pumps to improve feed uniformity, but they have also not yielded positive results when pumping drilling fluids, as the plungers and seals did not work well at high pressures and were difficult to replace. Attempts to replace the plunger on the piston in the six-plunger reciprocating drilling pump proved to be more effective. Advantages of this pump - rather high uniformity of giving (fluctuations of instant giving - 15%), possibility of easy replacement of pistons, valves and plugs and absence of epiploon rods. The need to have two such pumps on the rig with a large number of wear parts has led to the fact that these pumps are not used. Currently, two-piston double-acting pumps with a double stroke per minute of 35-90 and a stroke length of up to 0.5 m, as well as single-piston pumps with a double stroke per minute of 35-180 and a stroke length of up to 0.3 m in diameter are mostly used. cylinder bushings 120–200 mm.

The output pulsations of the three-piston pump of unilateral action are smaller, than pulsations of the two-piston pump of bilateral action. The efficiency of various structural schemes of pumps is determined by the simplicity of construction, manufacturability, the number of wear parts, the probability of trouble-free operation, weight, efficiency, etc.

In the drilling rig "Uralmash-4E" the two-piston pump of bilateral action like UNB-600 is applied. It is intended for giving of washing liquid on a face at drilling of wells up to 5000 m deep. At rotary drilling the washing liquid moves by the drilling pump UNB-600 through a column of drill pipes on a face for cooling and removal of the rock destroyed by a bit, and also for energy transfer of a turbodrill and associated bit. Water or clay solution with the presence of oil, alkali, soda and other components is used as a washing liquid.

A very important requirement for the drive of the drilling pump is the need to have an adjustable speed of the motor, which must be adjusted when drilling at least 20-30% down from the nominal and up to 50-60% - when restoring the circulation of the solution. In addition, it is necessary to take into account the fact that when moving from one layer of soil to another, there may be shock loads, which can lead to both locking the drive and its failure.

The second requirement is related to the peculiarities of the loading mode of the drive motor. It is known that the load on the engine is constantly changing: as the well deepens - increases, and with decreasing engine speed - decreases, but in all cases it changes gradually. In addition, both when changing the bushings and when building a column during drilling, the motor must be disconnected from the mains, or the pump shaft must be disconnected from the motor shaft. Thus, the second requirement is that the drilling pump motor must operate for a long time with a relatively quiet load, but with frequent starts and stops, and therefore to drive the drilling pump are used or asynchronous motor with a phase rotor, which has low starting currents and withstands frequent starts, or an electromagnetic clutch is installed between the motor and the pump for quick control. In this case, you can use other types of motors, and the most common are synchronous motors.

In the case of clogging the bit with drilled rock to restore the circulation of the flushing fluid at the pump outlet for a short time creates increased pressure. Therefore, the motor of the drilling pump must have a sufficiently high overload capacity, especially when drilling in difficult conditions.

In serial electrified drilling rigs such as BU-80 BrE, BU-2500 BrE, Uralmash 125 BE, Uralmash 4E, Uralmash 4000 BE, Uralmash 125E and Uralmash 160E, synchronous motors with plug-in excitation are used to drive drilling pumps.

Synchronous electric drives do not involve frequent switching on and off, so to quickly disconnect the motor shaft from the drill pump shaft, a pulley is installed between them, in which a tire-pneumatic coupling is mounted. The main advantages of such engines are:

- the ability of the SD to give reactive power to the network, which is the simplest and most effective way to increase the power factor. Under these conditions, electrical networks are discharged from reactive currents consumed by induction motors, transformers and other devices, resulting in reduced losses in the networks;

- static overload capacity of synchronous electric motors without

the consideration of the open polarity depends on the mains voltage linearly, not

quadratically, as in induction motors;

- forcing the excitation at voltage drops below 0.8 of the nominal. Therefore, with large reductions in mains voltage, the operation of a loaded synchronous motor is more stable than an asynchronous one.

- the possibility of using excitation systems with ARV, ensuring the stability of static and dynamic overload when changing modes of operation.

But there are significant drawbacks:

- Synchronous motors do not involve frequent switching on and off, although this is compensated by the use of magnetic powder couplings. Practice has shown that the use of magnetic powder couplings justifies itself only in the transmission of relatively small moments;

- to use this drive it is necessary to adjust the pump flow by changing the cylinder liners, so to obtain high quality control it is necessary to have a large number of bushings, which, in turn, leads to increased installation costs and reduced efficiency. In addition, a lot of time will be spent on replacing the bushings (while the engine does not turn off).

- the efficiency of the engine in this way does not exceed 60-80% (the specified percentage depends on the number of replaceable bushings).

1.4 Setting tasks for qualifying work

In this work it is necessary to upgrade the electric drive of the drilling pump, namely:

- to recalculate the power of the electric motor;

- replace the engine with a more modern one, check the choice of engine for overload;

- replace unregulated motor drive with adjustable, ie develop a system of automatic control of the electric drive of the pump that can ensure compliance with the nominal pressure fluctuations and pump output costs, which are due to the design features of piston pumps, as well as its most economical operation.

Загальний вигляд бурового насоса УНБ 600

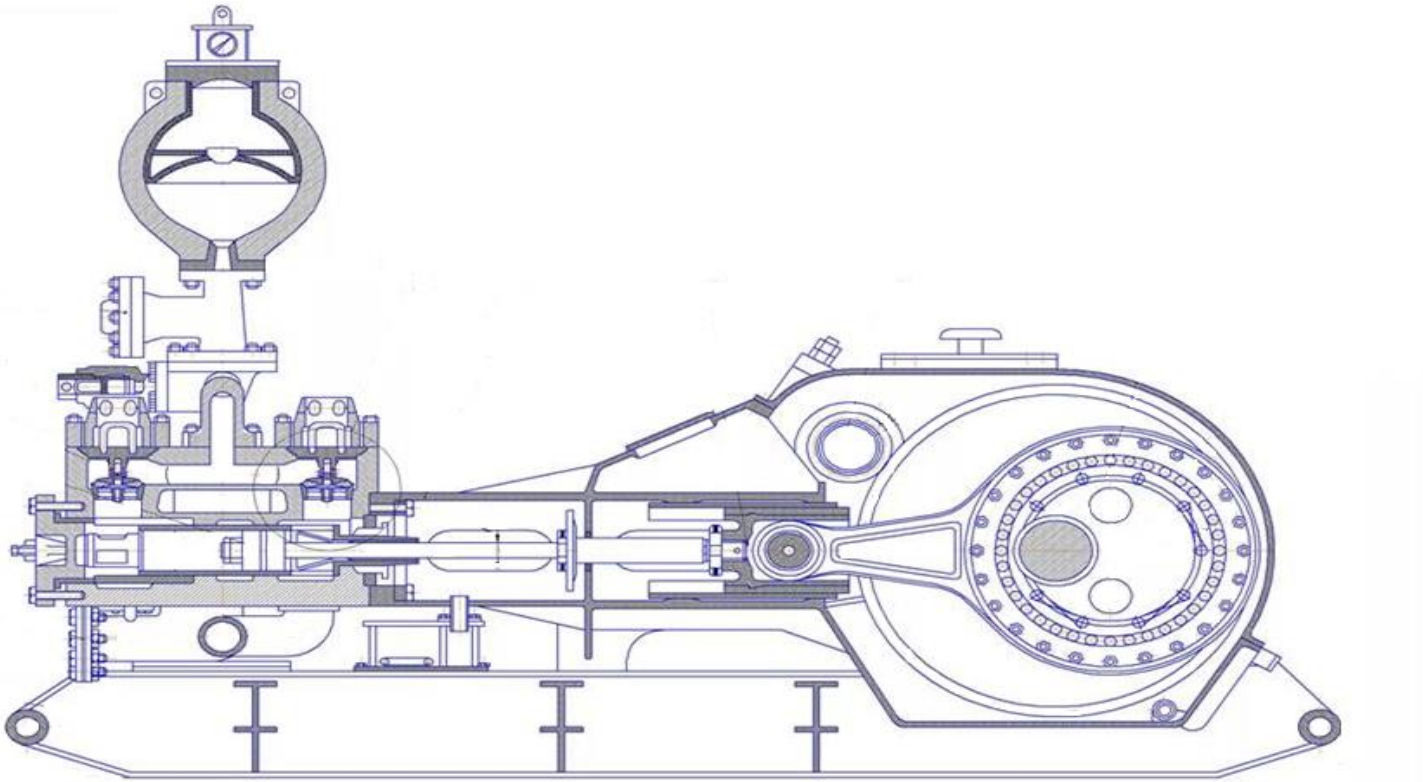
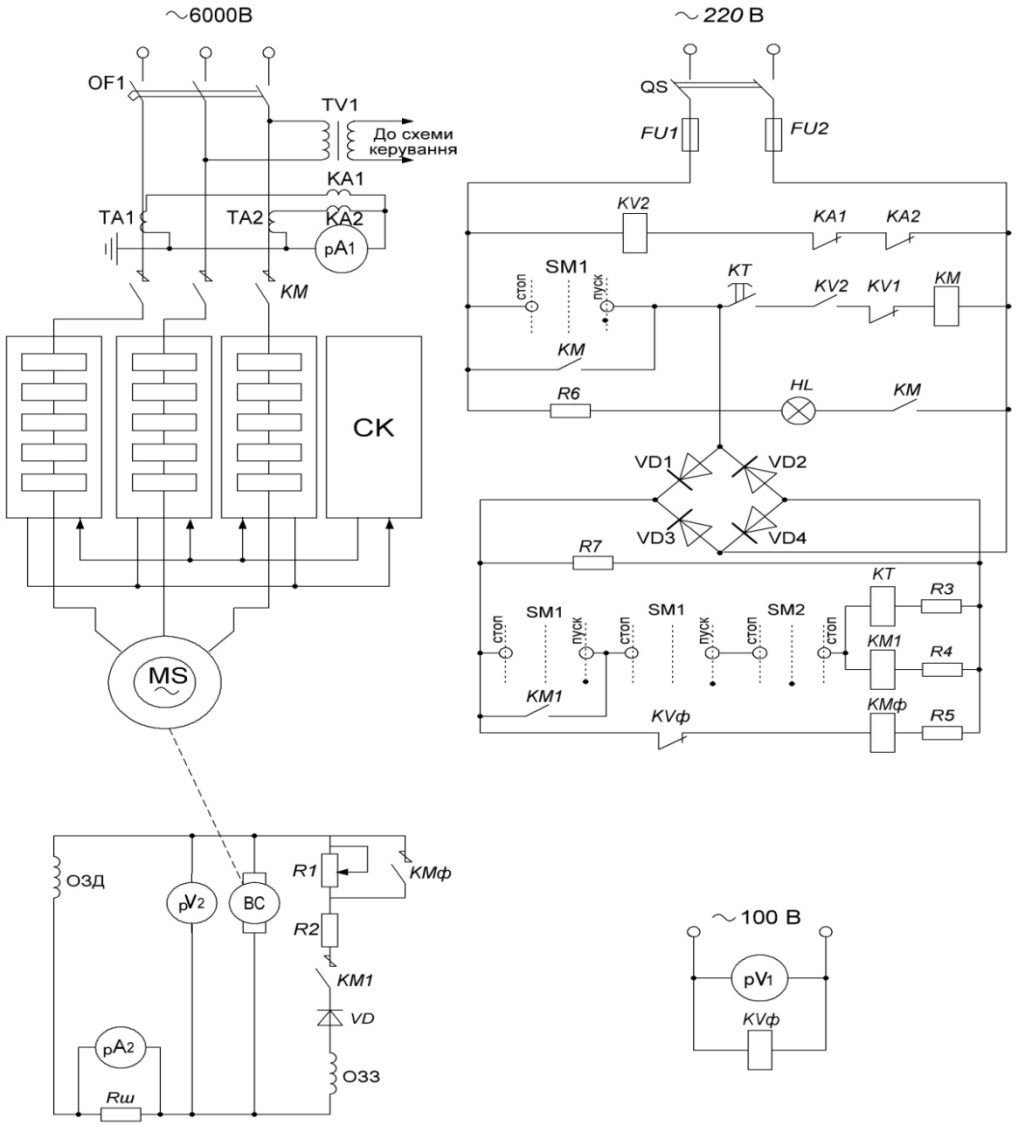
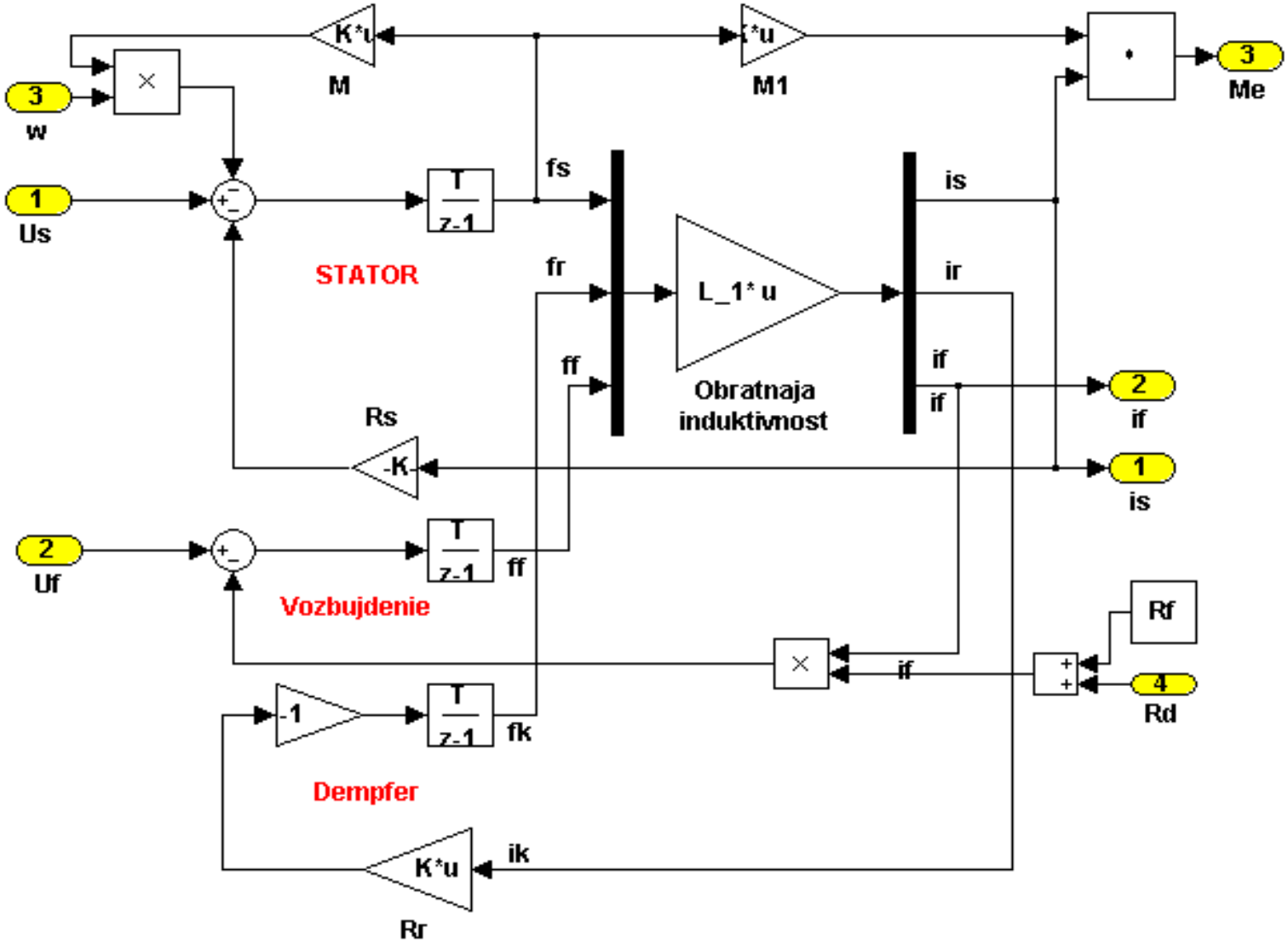


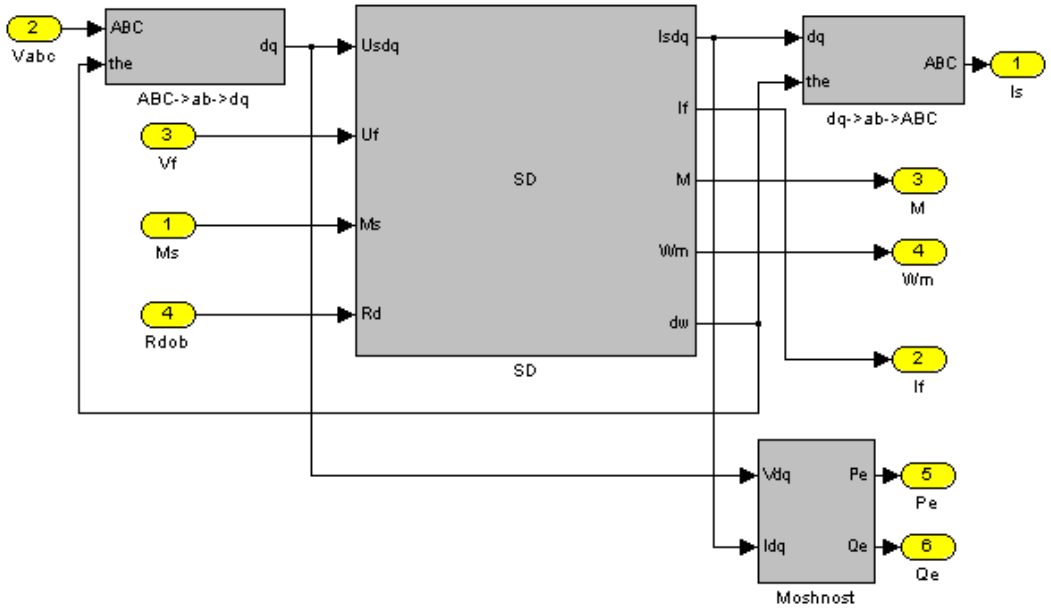
Схема керування ЕП бурового насоса



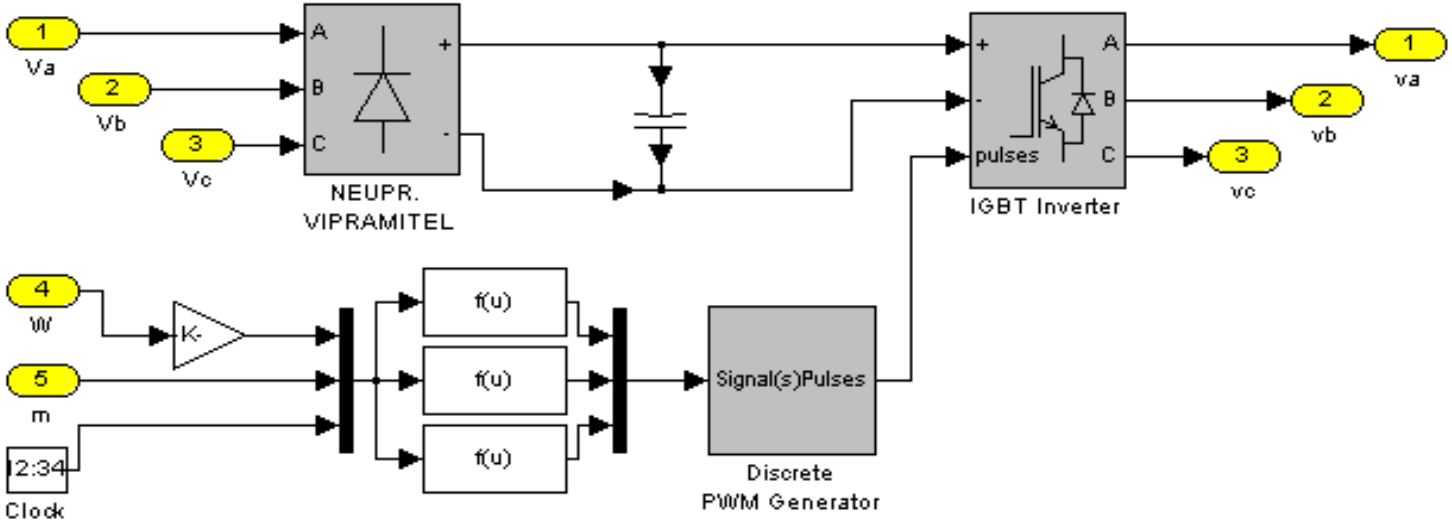
Математична модель синхронного двигуна з блоків Simulink



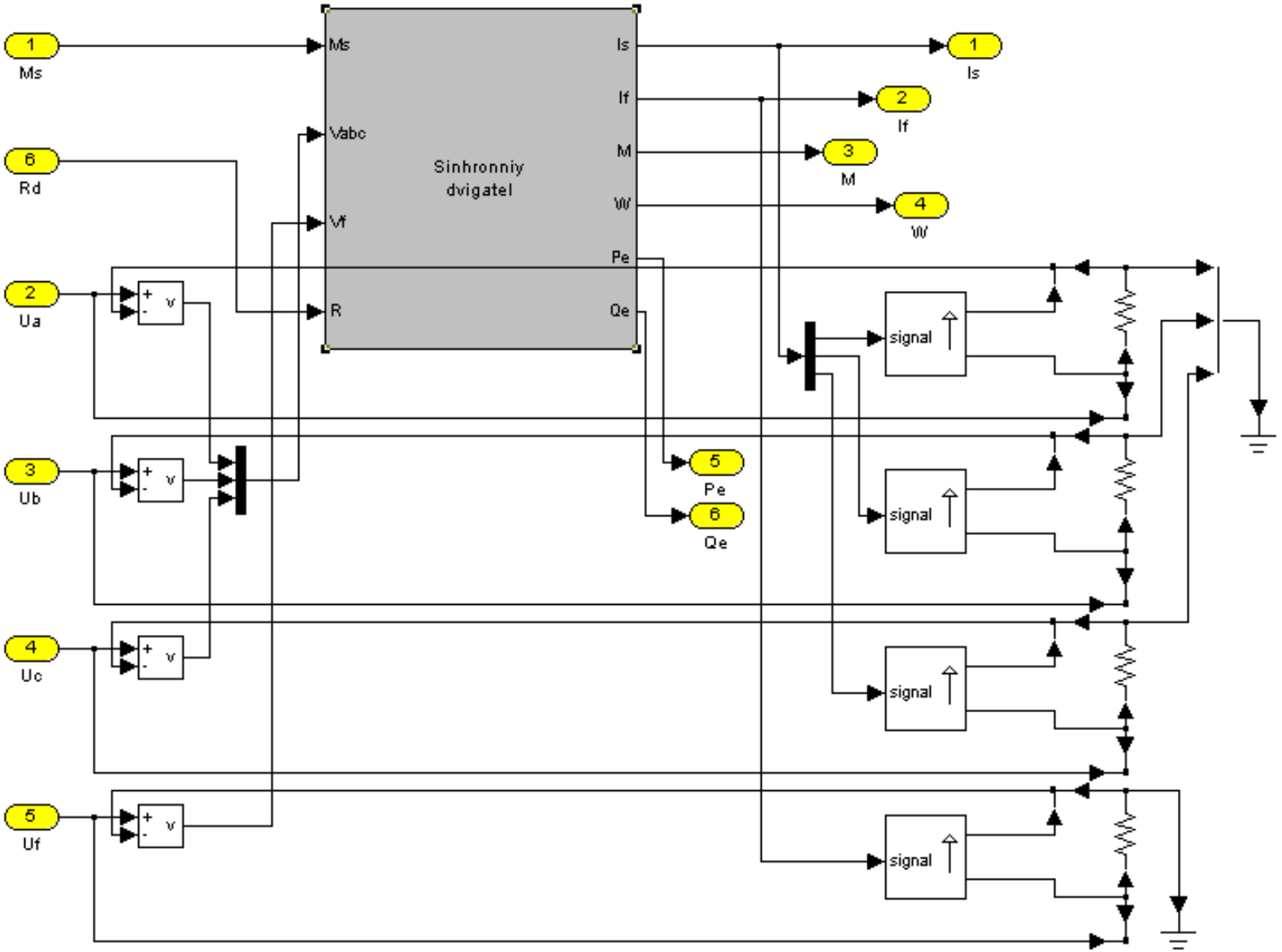
Перетворення ABC→dq



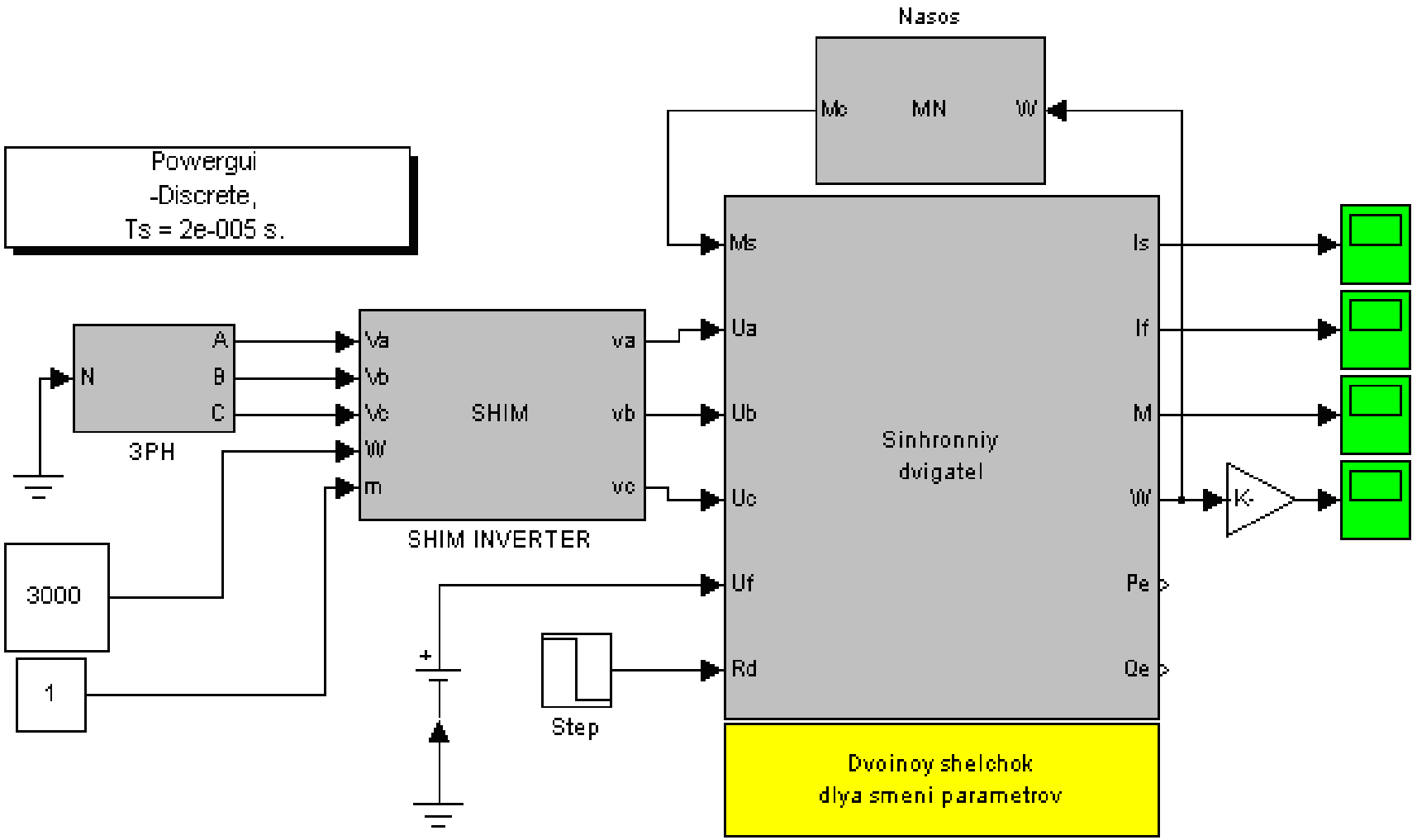
Модель ШІМ інвертора



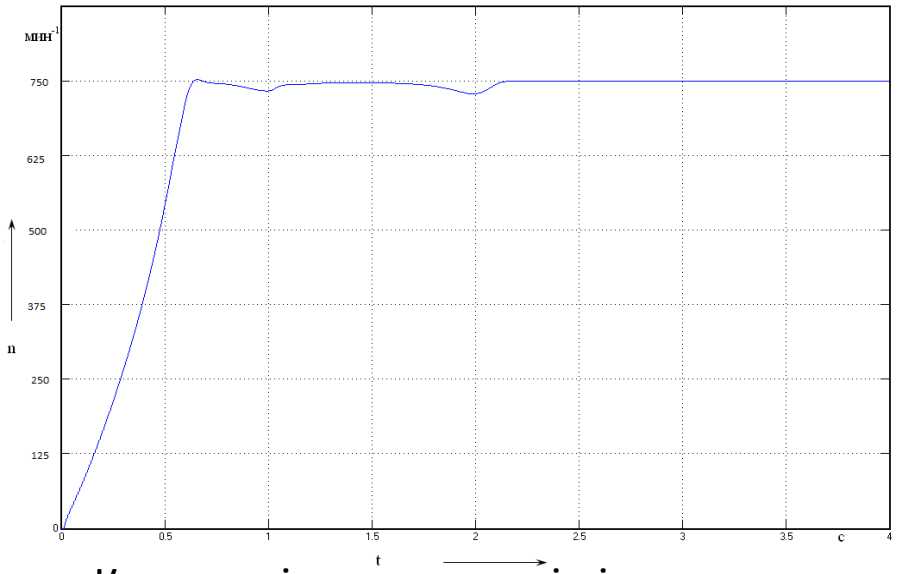
Електрична модель синхронного двигуна



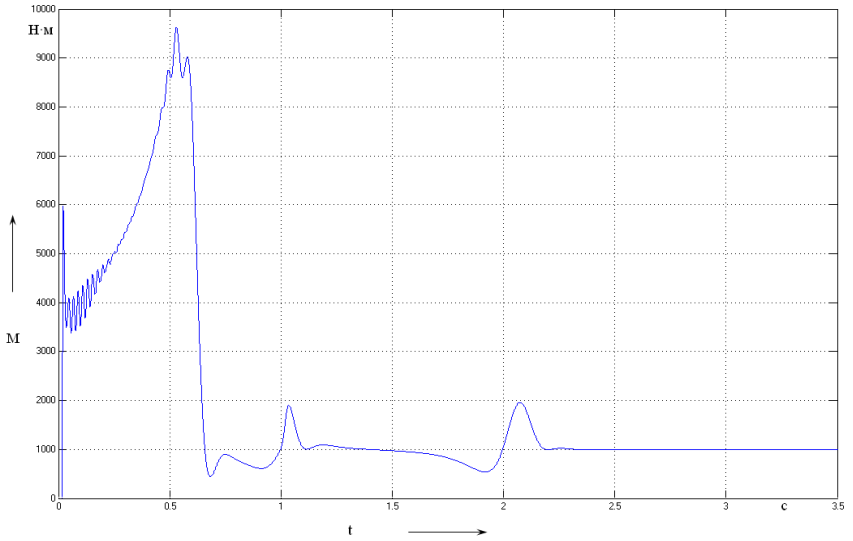
Модель електроприводу



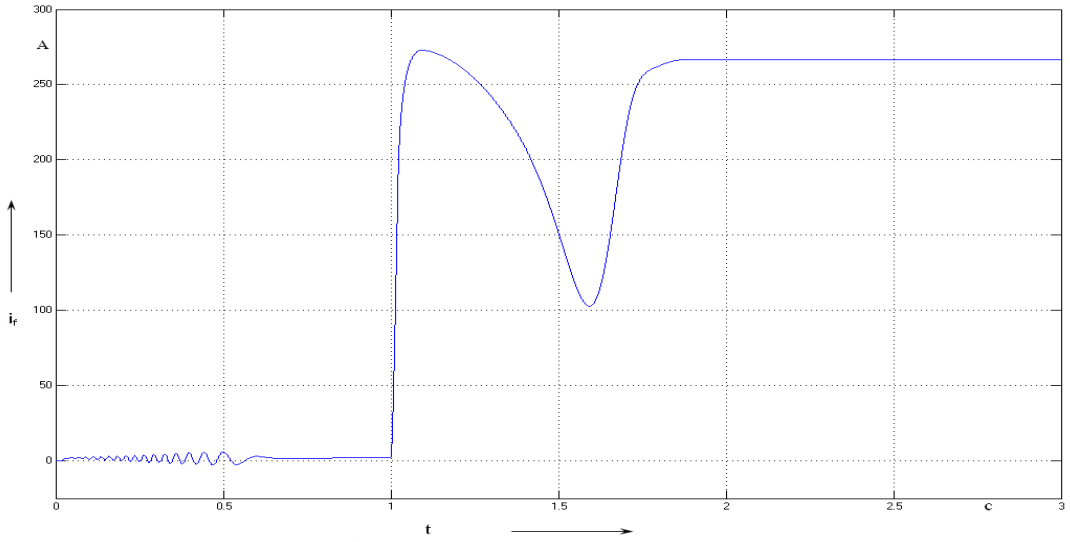
Пускові характеристики електродвигуна



Крива зміни швидкості під час пуску

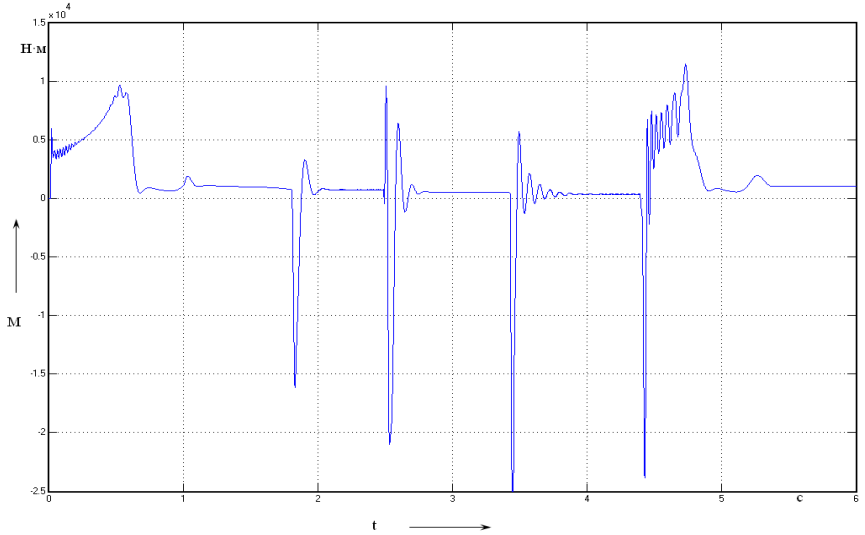


Момент на валу двигуна під час пуску

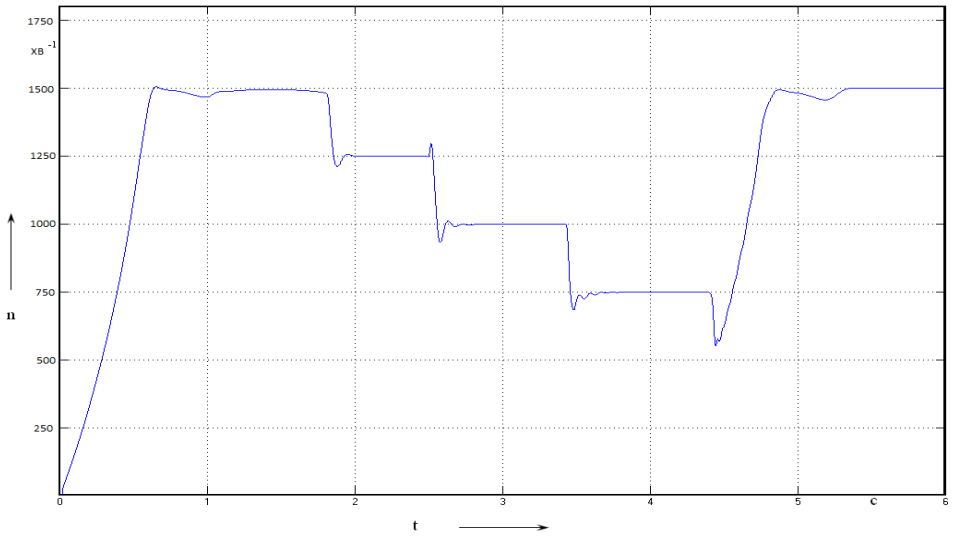


Струм збудження двигуна під час пуску

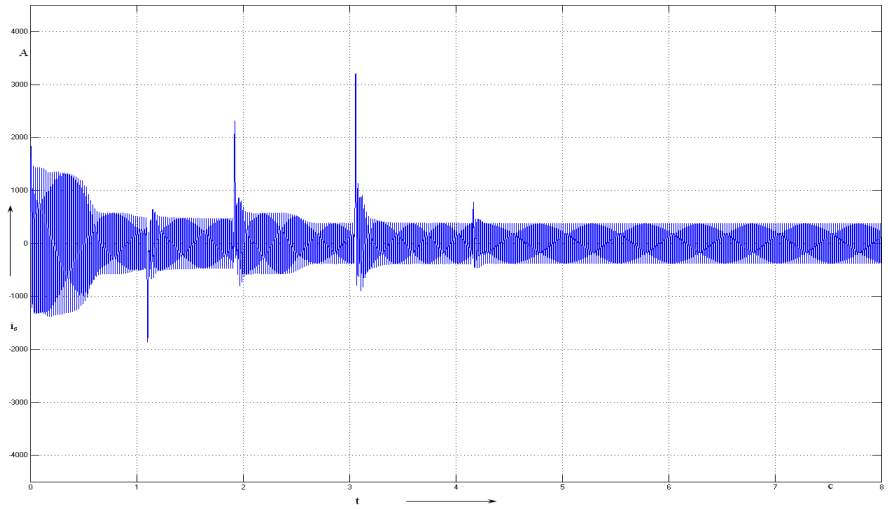
Регулювання швидкості обертання електродвигуна



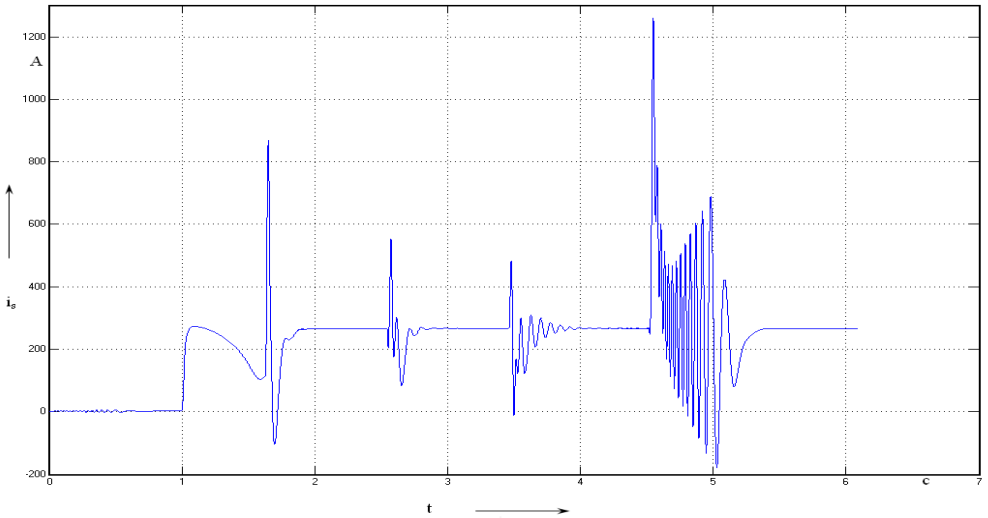
Електричний момент двигуна при регулюванні швидкості обертання



Крива зміни швидкості



Струм статора (фаза А) при регулюванні швидкості



Струм збудження при регулюванні швидкості обертання