МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
ім. Ю.М. ПОТЕБНІ

Кафедра електричної інженерії та кіберфізичних систем
(повна назва кафедри)

Кваліфікаційна робота (проєкт)

другого (магістерського) рівня освіти
(рівень вищої освіти)

на тему «Дослідження втрат потужності в електроприводах насосних станцій»

Виконав: студент 2 курсу, групи 8.1414
спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка, електромеханіка
освітньої програми Електроенергетика, електротехніка, електромеханіка

Ухань Є.В.
(ініціали та прізвище)

Керівник __к.т.н., доцент Єрофєєва А.А._____
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)
Рецензент ___проф. Саблін О.І._____

Запоріжжя 2025

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
ім. Ю. М. ПОТЕБНІ

Кафедра електричної інженерії та кіберфізичних систем_____
Рівень вищої освіти _____другий (магістерський)_____
(другий (магістерський) рівень)
Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка, електромеханіка
_____ _____
(код та назва)
Освітня програма Електроенергетика, електротехніка, електромеханіка
_____
(назва)
Спеціалізація _____
(код та назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри _____
«____» _____2025 року

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ (ПРОЄКТ) СТУДЕНТОВІ
Уханю Євгенію В'ячеславовичу
(прізвище, ім'я, по батьков)

1. Тема роботи (проєкту) «Дослідження втрат потужності в електроприводах насосних станцій»

керівник роботи Єрофєєва А.А., к.т.н., доцент
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом ЗНУ від від «27» лютого 2025 року № 313-с
2. Строк подання студентом роботи «03» грудня 2025 р.
3. Вихідні дані до роботи: схема групового пускового пристрою із ТПН, схеми високовольтних пускових пристроїв; технічні дані асинхронних двигунів; лінійна схема розташування насосних станцій.
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити 1. Підвищення енергоефективності потужних турбомеханізмів. 2. Дослідження енергоефективності насосного обладнання в існуючих зрошувальних системах. 3. Аналіз енергоефективності застосування пускових пристроїв для насосних агрегатів зрошувальних систем.
5. Перелік графічного матеріалу
1). Основні завдання магістерської роботи. 2) Схема електропостачання головної насосної станції зрошувальної системи.3) Імітаційна модель прямого пуску

асинхронного двигуна від мережі 4) Результати моделювання для прямого пуску асинхронного двигуна від мережі 5) Запропоновані схеми електропостачання з повільним пуском насосних агрегатів. 6) Результати моделювання пуску асинхронного двигуна від тиристорного перетворювача напруги. 7) Імітаційна модель пуску асинхронного двигуна від перетворювача частоти.8) Результати моделювання пуску асинхронного двигуна від перетворювача частоти. 9) Втрати енергії при різних засобах пуску. 10)Техніко-економічні показники від впровадження пускових пристроїв.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1	Єрофєєва А.А, доц., к.т.н.		
2	Єрофєєва А.А, доц., к.т.н.		
3	Єрофєєва А.А, доц., к.т.н.		

7. Дата видачі завдання 23.06.2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Підвищення енергоефективності потужних турбомеханізмів	30.09.2025	
2	Дослідження енергоефективності насосного обладнання в існуючих зрошувальних системах	15.10.2025	
3	Аналіз енергоефективності застосування пускових пристроїв для насосних агрегатів зрошувальних систем	23.11.2025	

Студент _____ Є.В.Ухань

Керівник роботи _____ А.А.Єрофєєва

Нормоконтроль пройдено

Нормоконтролер _____ С.В. Башлій

АНОТАЦІЯ

Є.В. Ухань. Дослідження втрат потужності в електроприводах насосних станцій.

Кваліфікаційна випускна робота на здобуття ступеня вищої освіти магістра за спеціальністю 141 Електроенергетика, електротехніка, електромеханіка, науковий керівник А.А. Єрофєєва. Запорізький національний університет. Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю.М. Потебні. Кафедра електричної інженерії та кіберфізичних систем, 2025.

Магістерська кваліфікаційна робота присвячена дослідженню втрат потужності в електроприводах насосних станцій.

У роботі систематизовано чинники, що призводять до виходу з ладу високовольтних насосних агрегатів, та визначено стратегії оптимізації їхньої надійності й енергетичної ефективності. Шляхом комп'ютерного моделювання у програмному комплексі MATLAB створено адекватні імітаційні моделі насосних установок із високовольтними асинхронними двигунами. На основі розроблених моделей проведено порівняльне дослідження динамічних електромагнітних процесів і супутніх втрат потужності за різних режимів пуску: прямого, з використанням пристрою м'якого пуску (тиристорного регулятора напруги) та частотно-регульованого.

Ключові слова: електропривод, насосна станція, комп'ютерне моделювання, імітаційна модель, потужність, високовольтний привод, зрошувальна система, асинхронний двигун, перетворювач частоти.

ABSTRACT

Y.V. Ukhan. Research on power losses in electric drives of pumping stations.

Qualification thesis for the degree of Master of Science in the specialty 141 Electric Power Engineering, Electrical Engineering, Electromechanics, scientific

advisor A.A. Yerofieieva. Zaporizhzhia National University. Y.M. Potebnya Engineering and Scientific Institute. Department of Electrical Engineering and Cyber-Physical Systems, 2025.

The master's thesis is devoted to the study of power losses in electric drives of pumping stations.

This thesis systematizes the factors leading to the failure of high-voltage pump units and identifies strategies for optimizing their reliability and energy efficiency. Using computer modeling in the MATLAB software package, adequate simulation models of pumping units with high-voltage induction motors were created. Based on the developed models, a comparative study was conducted of dynamic electromagnetic processes and associated power losses under various starting modes: direct start, soft start (using a thyristor voltage regulator), and frequency-controlled start.

Keywords: electric drive, pumping station, computer simulation, simulation model, power, high-voltage drive, irrigation system, induction motor, frequency converter.

ЗМІСТ

ВСТУП.....7
1. Підвищення енергоефективності потужних турбомеханізмів 9
1.1 Аналіз шляхів підвищення енергоефективності потужних турбомеханізмів.....9
1.2 Системи електроприводів змінного струму для потужних двигунів.....13
1.3. Пристрої для плавного пуску потужних двигунів змінного струму.....27
1.4. Частотно-регульований привід.....29
2. Дослідження енергоефективності насосного обладнання в існуючих зрошувальних системах.....35
2.1. Аналіз структури споживання електроенергії на головній насосній станції зрошувальної системи 35
2.2. Імітаційна модель прямого пуску насосного агрегату.....39
2.3. Аналіз енергоспоживання насосних агрегатів без пускових пристроїв (базовий варіант).....44
3. Аналіз енергоефективності застосування пускових пристроїв для насосних агрегатів зрошувальних систем.....48
3.1. Імітаційна модель пуску насосного агрегату з використанням тиристорного перетворювача напруги.....48
3.2. Імітаційна модель пуску насосного агрегату з використанням перетворювача частоти.....54
3.3. Розрахунок оптимального по мінімуму втрат електроенергії часу частотного пуску асинхронного двигуна.....60
3.4. Розрахунок техніко-економічних показників від впровадження пускових пристроїв для насосних агрегатів зрошувальних систем.....64
ВИСНОВКИ.....74
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....75

ВСТУП

Актуальність. Електроприводи насосних станцій відіграють ключову роль у забезпеченні функціонування систем водопостачання, водовідведення, теплопостачання, зрошення та багатьох промислових технологічних процесів. У структурі споживання електричної енергії як промислових, так і комунальних об’єктів насосні станції займають значну частку, що зумовлює підвищену увагу до питань їх енергоефективності та раціонального використання електроенергії.

В умовах постійного зростання вартості енергоресурсів, необхідності зниження експлуатаційних витрат та впровадження принципів сталого розвитку особливої актуальності набуває проблема втрат потужності в електроприводах насосних установок. Значні втрати електричної та механічної потужності виникають унаслідок неузгодженості режимів роботи насосів і електродвигунів, використання застарілих або неправильно підібраних електроприводів, недостатньо ефективних систем керування, а також через вплив експлуатаційних факторів.

Електроприводи насосних станцій характеризуються тривалою роботою в змінних режимах навантаження, що призводить до зниження коефіцієнта корисної дії та збільшення втрат у двигунах, перетворювачах частоти, пускорегулювальній апаратурі та механічних елементах приводу. Водночас потенціал енергозбереження у цій сфері залишається значним і може бути реалізований шляхом детального аналізу структури втрат потужності та впровадження сучасних технічних рішень.

У зв’язку з цим дослідження втрат потужності в електроприводах насосних станцій є важливим науково-технічним завданням, спрямованим на підвищення енергоефективності, надійності та економічності роботи насосних систем. Отримані результати можуть бути використані для обґрунтування заходів з модернізації електроприводів, оптимізації режимів їх роботи, а також

впровадження автоматизованих систем керування з метою зменшення енергоспоживання.

Об'єкт дослідження – втрати електричної енергії на насосних станціях.

Предмет дослідження – техніко-економічні показники насосного обладнання зрошувальних систем з повільним пуском асинхронних двигунів.

Мета роботи - підвищення енергоефективності й надійності насосно-силового встаткування зрошувальних систем шляхом використання пристроїв плавного пуску.

Основні завдання магістерської роботи:

1. Аналіз існуючого стану і шляхи підвищення показників надійності електроприводів насосів для зрошувальних систем.

2. Аналіз втрат електричної енергії на існуючих насосних станціях зрошувальних систем.

3. Розробка імітаційних (комп'ютерних) моделей асинхронних електроприводів насосів з різними засобами повільного пуску: прямий від мережі, від тиристорного перетворювача напруги (ТПН) або від перетворювача частоти (ПЧ).

4. Дослідження втрат електричної енергії на насосних станціях зрошувальних систем, які використовують повільні пуски (від ТПН та ПЧ) двигунів.

5. Техніко-економічне зрівняння застосування для насосних станцій зрошувальних систем повільного пуску двигунів від ТПН та ПЧ.

Методи дослідження: математичний аналіз, імітаційне моделювання.

1 ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ПОТУЖНИХ ТУРБОМЕХАНІЗМІВ

1.1. Аналіз шляхів підвищення енергоефективності потужних турбомеханізмів

Гідротранспортні системи (ГТС) являють собою складний взаємозалежний технологічний комплекс різного роду встаткування (електромеханічного, насосного, трубопровідного), призначений для цілеспрямованого переміщення робочого продукту в потрібному об'ємі із заданим тиском по гідравлічних магістралях споживачеві (промисловому об'єкту, житловому комплексу й т.п.).

Аналіз особливостей функціонування насосних комплексів (НК) різного призначення показав, що турбомашини є енергоємними споживачами:

- з низькою керованістю технологічними параметрами;
- у більшості випадків - із груповим характером навантаження й нерегульованим електроприводом насосів;
- великими діапазонами зміни витрат; значними встановленими потужностями електромеханічного встаткування, що працює, як правило, у недовантажених режимах.

ГТС характеризуються складними перехідними процесами й несталими режимами роботи: у період запуску-зупинки насосних агрегатів (НА) і при регулюванні технологічних параметрів; при виникненні аварійних ситуацій, обумовлених раптовим відключенням електроживлення НА; пусками гідромашин найчастіше з порушенням технології запуску; недотриманням темпу керування трубопровідними арматурами й т.п.

У цей час у турбомеханізмах зростає роль пристроїв для плавного запуску електричних двигунів, що забезпечують зниження екстремальних моментів і струмів, тобто - прямо й побічно сприятливому підвищенню ресурсу працездатності як електроприводів, так і технологічних механізмів. Досвід і дослідження показують, що в окремих випадках застосування

пускових систем підвищує час наробітку на відмову асинхронних двигунів у кілька разів, робочих коліс відцентрових насосів - на 15-75% [1].

Однією з умов, що забезпечують можливість зниження енерговитрат, є керованість об'єкта по технологічному параметру або керованість електромеханічних систем, що забезпечують вплив на технологічний об'єкт із метою формування діаграми споживання енергії. Під керованістю тут розуміється властивість об'єкта змінювати свої вихідні характеристики при зміні керуючих впливів.

Керований по пуску електропривод дозволяє вирішити по суті два завдання: мінімізацію енергетичних витрат і збереження працездатності електромеханічного встаткування. Ці два завдання на практиці дуже важливі. Збереження працездатності електроустаткування забезпечує, у першу чергу, ресурсозбереження. Підвищення працездатності зберігає матеріальні ресурси: ізоляцію, мідь, конструкційні матеріали, що йдуть на ремонт електричних машин; металеві конструкції й деталі самого механізму по виробництву продукції (стисненого повітря).

Керований по пуску електропривод - це система нерегульованого ЕП у сукупності з технічними системами, що забезпечують регулювання струмових і моментних характеристик двигуна в період пуску з метою одержання якісних показників пускового режиму, що відповідають технічним вимогам електроустаткування або технологічним - виконавчого органа робочої машини. Необхідність плавного пуску для потужних турбомеханізмів обумовлена наступним:

– при запуску потужних двигунів пускові струми викликають зниження напруги на шинах підстанцій, небажане або зачасту неприпустиме за умовами експлуатації інших споживачів;

– динамічні складові моменту при пуску, викликані формуванням обертового магнітного поля, викликають динамічні зусилля, що впливають на всі механічні зв'язки, порушуючи центрування агрегату й викликаючи ріст вібрацій при роботі;

– пускові струми, що багаторазово перевищують номінальний струм, викликають електромагнітні сили в обмотках (особливо в лобових частинах), що приводять до старіння й механічних руйнувань ізоляційних матеріалів;

– термічні перевантаження, викликані пусковими струмами як у статорних обмотках, так і в роторних, приводять до термічного зношування ізоляції;

– затяжні пуски двигунів, викликані підвищеним моментом опору при їхньому рушанні, приводять до необхідності декількох повторних пусків, і, як наслідок, до негативних впливів струмів, моментів, зусиль на кінематичні ланки (підшипники, муфти, фундаментні кріплення й т.п.), а також на ізоляційні матеріали й електротехнічну сталь.

Пускові системи можуть виконувати роль пристроїв, що поліпшують параметри пускових характеристик. Пускові системи повинні знижувати, або по можливості, виключати динамічні складові моменту, що приводять до прискореного зношування електричних машин.

У теорії електроприводу досить часто використовується спрощена залежність для моменту опору від швидкості обертання турбомеханізму наступного виду [3]:

$$M_C(\omega) = M_o + a \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_{ном}} \right)^2, \qquad (1.1)$$

де a – постійний коефіцієнт, що враховує особливості режиму роботи механізму;·

M_o – момент опору зупиненого турбомеханізму (тобто при рушанні).

На рисунку 1.1 наведено механічні характеристики турбомеханізму.

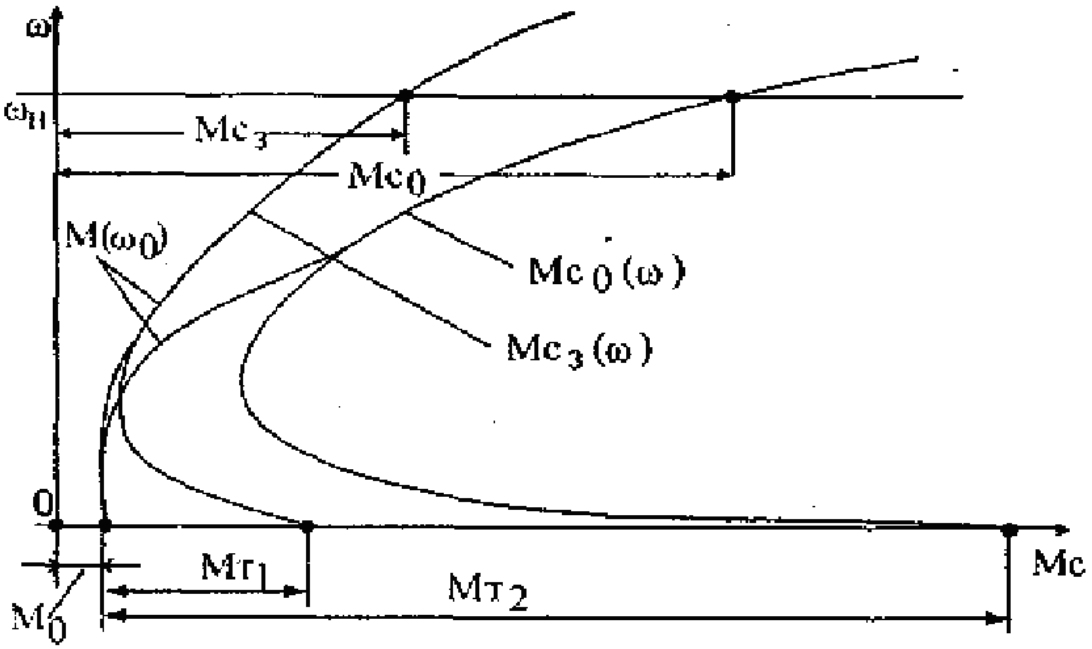


Рисунок 1.1 - Механічні характеристики турбомеханізму

При рушанні механізмів, особливо на самому початку руху, процеси в кінематичних парах описуються фізичними залежностями, що враховують характер контактуючих поверхонь, в'язкість змащення й т.п. Ці процеси в якійсь мірі відповідають процесам при русі рідин. У випадку ньютонівських рідин момент $M_т = M_о$, з урахуванням зазначених процесів $M_т = M_{т1}$ або $M_т = M_{т2}$ (рис. 1.1), причому $M_т \le M_{т1,2}$.

У сучасній промисловості помітна тенденція до розширення області застосування асинхронних двигунів (АД), особливо для середніх і великих потужностей турбомеханізмів. Застосування таких двигунів, хоча й забезпечує досить високі техніко-економічні показники режиму роботи електропривода й живильної електромережі, однак вимагає застосування нових технічних рішень для їхнього пуску (оскільки використання традиційних способів пов'язане з істотним погіршенням пускових режимів АД або неможливо взагалі) [1].

Керований запуск асинхронного двигуна найчастіше здійснюється за допомогою тиристорного перетворювача напруги ТПН. Ця система використовується для запуску потужних асинхронних двигунів турбомеханізмів. При цьому забезпечується плавний розгін АД й обмеження

пускового струму. Використання подібного пускового пристрою дозволяє здійснювати практично необмежене число пусків АД. При цьому, відмітимо, що у реальних умовах експлуатації турбомеханізмів допускається лише один його прямий запуск від мережі на інтервалі часу, рівних 500 годин [3]. Причому один несанкціонований запуск знижує моторесурс на 50 годин, що викликано підвищеними механічними впливами (ударами) на двигун і кінематичні передачі. Реалізація такого пускового пристрою переважно для групи електроприводів, дозволяє зменшити споживання потужності в період максимуму навантаження, виключати роботу в холосту й т.д.

Схема пускового пристрою для асинхронних короткозамкнених двигунів найчастіше реалізується з використанням згаданих тиристорних перетворювачів (регуляторів) напруги (ТПН). Ефект, що досягається, при цьому: зниження пускового моменту (і, особливо, його знакозмінної складової); зниження амплітуди пускового струму (і, як наслідок, просадок напруги при пуску; формування пускового моменту для досягнення певних технологічних вимог.

1.2. Системи електроприводів змінного струму для потужних двигунів

У наш час існують різні схемні рішення для здійснення пуску високовольтних двигунів, що реалізують наступні найбільш доцільні способи пуску:

- прямого пуску;
- пуску за допомогою допоміжних машин і механізмів;
- пуску з використанням засобів, що змінюють параметри електроенергії (джерела живлення).

Для перерахованого класу систем електроприводів можуть бути розроблені комплексні й багатофункціональні системи запуску потужних високовольтних електродвигунів. Властивостями пускової системи може володіти й сама система електроприводу, коли можливість плавного запуску потужного АД або СД закладена в схемному рішенні. До таких систем

відносяться системи вентильних електроприводів постійного і змінного струму. Для інших систем електроприводу пускова система буде окремим елементом, що працює тільки під час запуску. В окремих випадках властивості пускової системи можуть бути функціонально розширені (наприклад, для випробування захисту системи електропостачання). Класифікаційна структура систем електропривода змінного струму, якій характерні властивості пускових систем, наведена на рис. 1.2 [1].



Рисунок 1.2 - Класифікаційна структура систем електропривода змінного струму із властивостями пускових систем

До асинхронного пуску електродвигунів пред'являються суперечливі вимоги: з одного боку, забезпечення необхідної величини пускового моменту, а з іншого боку - зниження пускового струму до припустимої величини. Відомими дослідженнями встановлено [4], що перегріви в обмотках статора й ротора не перевищують припустимих значень тільки в тому випадку, якщо при пуску напруга на двигуні становить 30-40% від номінальної. При зниженні статорної напруги відповідно зменшується й величина пускового моменту двигуна, що стає недостатнім для розвороту агрегату. Момент, що

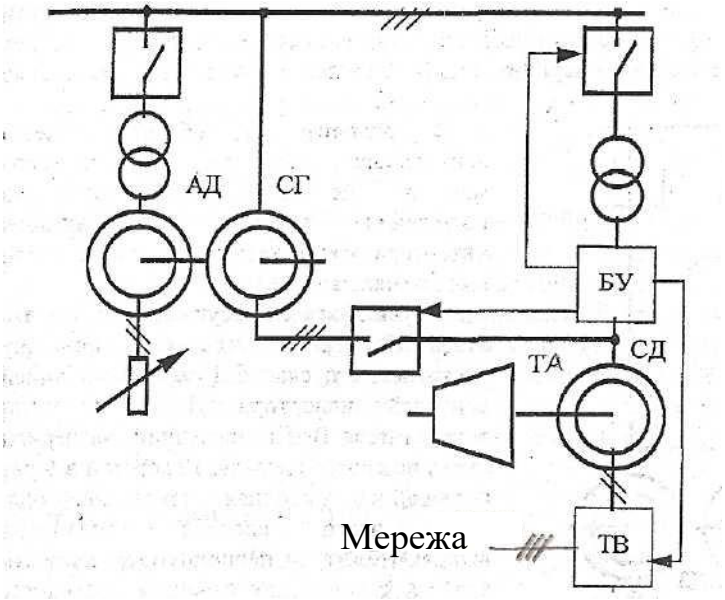
розвивається двигуном при пуску у всьому діапазоні швидкостей від нуля до номінальної повинен, принаймні, перевершувати на 10% момент навантаження, а пусковий момент (при швидкості, рівної нулю) - становити не менш 20% від номінального значення.

З метою виключення впливу надпотужних синхронних двигунів на рівень напруги живильної мережі в періоди їхнього асинхронного пуску в загальному випадку застосовують пуск при зниженій напрузі через: некерований або керований дросель, автотрансформатор або блок «трансформатор-двигун». Відносна простота схеми пуску з використанням блоку « трансформатор-двигун» не тільки значно підвищує вартість установки й збільшує потужність втрат, але й зводить нанівець головну перевагу синхронних двигунів. А саме, стає на практиці неможливо їх використовувати як компенсуючі пристрої в системі заводського електропостачання. При розгоні механізмів з великими маховими масами й моментом опору на валу (рівним 15-20% або більше від номінального значення) зниження напруги викликає більший перегрів пускової клітки двигуна, чим при пуску від повної напруги, внаслідок збільшення часу пуску.

Одним з найпоширеніших способів пуску СД і АД є частотний - за допомогою електромашинного перетворювача частоти. Даний спосіб пуску в наш час досить докладно й всебічно досліджений як теоретично, так і експериментально.

Електромашинний перетворювач частоти, як правило, складається із приводного асинхронного двигуна з фазним ротором, керованого рідинним реостатом, і синхронного генератора (рис. 1.3). Частота обертання генератора змінюється за допомогою реостата в ланцюзі ротора асинхронного двигуна. Для забезпечення безударного включення й синхронізації з мережею застосовують підвищувальний редуктор з передаточним числом 1:1.1, за допомогою якого з'єднуються фазний двигун і синхронний генератор з більшим, ніж у двигуна з фазним ротором, числом пара полюсів, або ж синхронізують асинхронний двигун. Сумарна встановлена потужність обох

машин перетворювального агрегату становить 38-54% від потужності електродвигуна й визначається величиною моменту опору на валу при пуску.



ТА - технологічний агрегат; ТЗ - тиристорний збудник, БК - блок керування

Рисунок 1.3 - Електромашинний перетворювач частоти

Основною перевагою частотного способу пуску за допомогою електромашинного перетворювача є виключення кидків моменту й зниження пускових втрат потужності у двигуні.

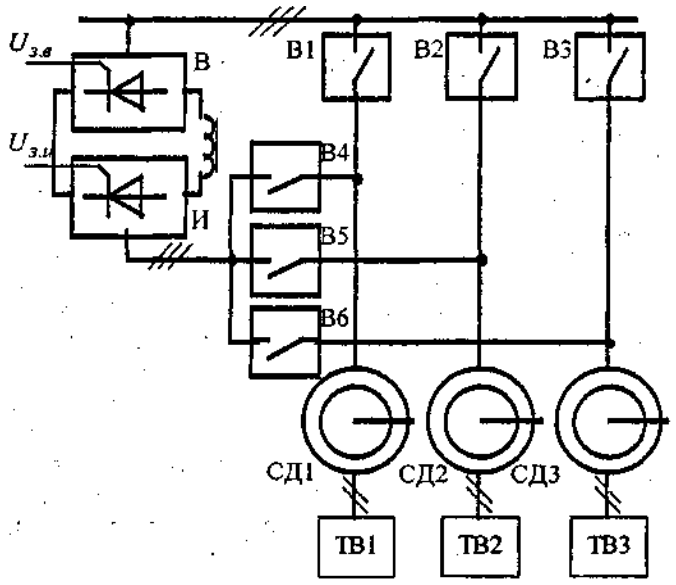
До числа недоліків даного способу варто віднести: по-перше, необхідність мати дві електричні машини, що входять до складу пускового пристрою, сумарною потужністю (залежно від величини моменту опору на валу), рівної 60-90% від потужності двигуна, що пускається; валооборотний пристрій; по-друге, необхідність регулювання опору в ланцюзі ротора асинхронного генератора за певним законом у функції частоти обертання магнітного поля ротора. Слід зазначити, що створення регульованого опору в ланцюзі ротора асинхронного двигуна великої потужності є також проблемою. Частотний спосіб пуску за допомогою електромашинного перетворювача економічно виправдує себе тільки в установках із числом агрегатів більше двох [5].

Асинхронно-частотний [1] пуск є однією з модифікацій варіантів відомого звичайного форсованого пуску. Відмінною рисою такого пуску є те, що з'єднані один з одним машини збуджуються в нерухливому стані, тобто при швидкості, рівної нулю. Цей спосіб має свої недоліки. По-перше, потрібне стороннє джерело постійного струму для збудження обох машин, що перебувають у нерухливому стані. Необхідно враховувати й ту обставину, що перший оборот ротора може бути зроблений у протилежному напрямку й привести до ушкодження ексцентричних сегментів підшипників. Крім того, на низькій частоті обертання не представляється можливим забезпечити стабільність обертання ротора двигуна.

Вище згадані недоліки відсутні в системі з асинхронно-частотним пуском, при якому обидві машини в початковий період пуску залишаються незбудженими. Генератор збуджується тільки при досягненні початкової частоти обертання, рівної 20-40% від номінальної швидкості. Початкова частота обертання генератора повинна бути підібрана таким чином, щоб отримане при цьому значення струму збудження було достатнім для створення необхідної величини обертаючого моменту. При досягненні номінальної частоти обертання двигун відключається від генератора й методом синхронізації включається в мережу. Таким чином, асинхронно-частотний пуск являє собою комбінацію асинхронного й синхронного пуску. Енергія, що виділяється в роторі двигуна під час асинхронного обертання при асинхронно-частотному пуску, значно менше, ніж при нормальному асинхронному пуску.

Асинхронно-частотний пуск, з одного боку, володіє тією перевагою, що не вимагає спеціального пускового пристрою, не створює теплових перевантажень двигуна й не порушує режиму роботи енергосистеми, але з іншого боку, здається відносно просте схемне рішення має й істотні недоліки. По-перше, відбувається досить складне керування цим процесом, оскільки сприятливий пуск залежить від багатьох величин і здійснимий тільки при строгому виконанні певних умов у процесі пуску. По-друге, включення двигуна на мережу викликає ударні струми й моменти, величини яких значно перевищують їх номінальні значення.

Схема для групового запуску синхронних двигунів за допомогою перетворювача частоти з ланкою постійного струму представлена на рис. 1.4. Випрямляч В та інвертор І з'єднують із мережею кожної із трьох вентильних двигунів СД 1-СД3 на період пуску. Комутаційний варіант пускової системи реалізується за допомогою вимикачів В1-В6.



СД 1-СД3 - синхронні двигуни; ТВ 1-ТВ3 - тиристорні збудники; В - випрямляч; І - інвертор, ведений мережею

Рисунок 1.4 - Схема для групового запуску синхронних двигунів за допомогою перетворювача частоти з ланкою постійного струму

На відміну від звичайної схеми вентильного двигуна електричні машини не забезпечуються датчиками положення ротора. Синхронізація інвертора здійснюється по напрузі на затисках двигуна [5].

Запуск двигуна здійснюється у два етапи. На першому етапі - за принципом частотного пуску СД із комутацією вентилів інвертора І за допомогою випрямляча В. На другому етапі дотримується безперервний режим керування випрямлячем, а комутація вентилів інвертора відбувається за рахунок ЕРС, індуційована в обмотках статора СД.

Потужність пускового агрегату завжди менше потужності найбільш потужного із групи синхронного двигуна. А саме, тому що турбомашини запускаються при відключеному нагнітальному патрубку, то статичний момент двигуна, з достатнім ступенем точності, може бути прийнятий рівним:

$$M_c(\omega) = (0{,}25 \div 0{,}3) \cdot M_{сн} \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_н}\right)^2. \qquad (1.2)$$

Таким чином, якщо розгін здійснюється в режимі незначних динамічних моментів, то як орієнтир при виборі пускового агрегату варто прийняти статичний момент. Якщо в період розгону $M_{дв} = \text{const} = (0{,}25 \div 0{,}3)M_{сн}$, то потужність пускового агрегату буде дорівнювати:

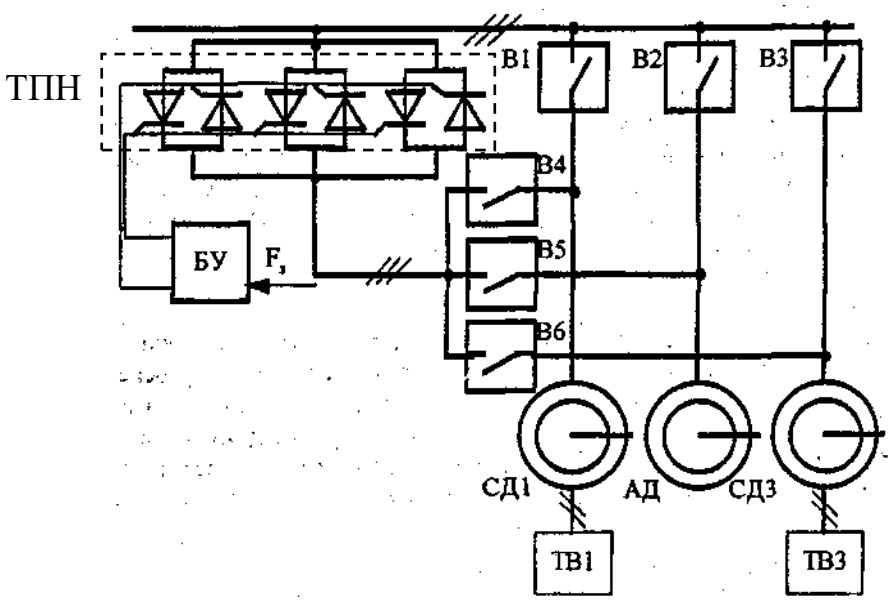
$$P_{ПА} = 0{,}3 \cdot P_{н.СД}. \qquad (1.3)$$

А залежність швидкості двигуна і його струму при пуску:

$$\omega(t) = A \cdot t,\ I(t) = \text{const} = I_{пн}. \qquad (1.4)$$

Схема групового пускового пристрою з тиристорним перетворювачем напруги (ТПН) представлена на рис. 1.5.

Особливістю її є те, що в ній, на відміну від попередньої схеми, можливий запуск як асинхронних, так і синхронних двигунів.



БК- блок керування; ТВ1, ТВ3 - тиристорні збудники; СД1, СД3 - синхронні двигуни; АД - асинхронний двигун

Рисунок 1.5 - Схема групового пускового пристрою із ТПН

При цьому можливі наступні варіанти роботи пристроїв керування схеми:

– безперервного фазового керування вентилями тиристорного перетворювача;

– фазово-частотного (квазічастотного) керування, при якому фаза керуючого сигналу змінюється в часі із заданою частотою. При цьому вихідна напруга ТПН модулюється відповідно до сумарного задаючого сигналу, що включає постійну складову й змінюється в часі;

– фазо-частотного керування перетворювачем від датчика положення ротора.

При безперервному керуванні ТПН напруга на фазах двигуна змінюється практично пропорційно:

$$U_A = U_B = U_C = U_c \cdot \cos\alpha\,. \qquad (1.5)$$

Момент двигуна при цьому дорівнює:

$$M_д(s) \approx M(s) \cdot \cos^2\alpha\,, \qquad (1.6)$$

де $M(s)$ – залежність моменту двигуна від ковзання S при номінальній статорній напрузі ($U = U_н$);

α - кут керування тиристорами ТПН.

Особливість розглянутого варіанта полягає в тому, що можливо ефективне керування пусковим струмом і моментом у бік їхнього зменшення. Квадратична залежність моменту від напруги не дозволяє: створити пускові моменти, що перевищують номінальний пусковий момент при одночасному зниженні пускового струму до прийнятних величин; забезпечити тривалу роботу агрегату на зниженій швидкості для технологічного обкатування агрегату (наприклад, прогріву турбокомпресора).

У частотно-імпульсній пусковій системі живлення СД здійснюється від ТПН, керованого датчиком положення ротора (ДПР) (рис. 1.6).

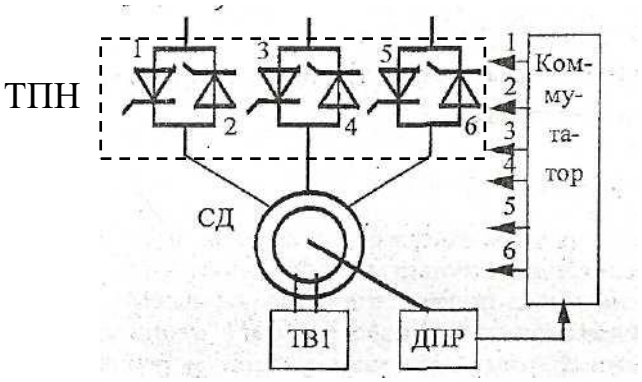


Рисунок 1.6 - Частотно-імпульсна пускова система з живленням СД від ТПН, керованого датчиком положення ротора (ДПР)

Відкриваючі імпульси (які формуються комутатором залежно від вихідного сигналу датчика положення ротора) подаються окремо для кожного тиристора ТПН. Запирання тиристорів здійснюється природним шляхом впливу різниці напруги мережі й ЕРС двигуна. Основним недоліком частотно-імпульсної пускової системи є наявність ДПР, через який утрудняється її технічна реалізація для загальнопромислових механізмів, що використовують двигун з одним (робочим) вихідним кінцем вала.

Одночасно з підвищенням технологічної надійності електроустаткування, пускові системи дозволяють [4]:

– мінімізувати втрати енергії в пускових режимах (при нелімітованому часі запуску) для системи полегшеного запуску синхронних двигунів електроприводів за схемою Г-Д (забезпечуючи економію електроенергії на 13-18% і підвищення технічної надійності СД в 2-3 рази), системи плавного запуску групи синхронних двигунів потужністю по 3,5 МВт турбокомпресорів, насосів, вентиляторів за схемою ТПН-СД (забезпечуючи підвищення надійності електричних машин в 1,3-1,8 разу, турбомеханізмів в 1,4 рази й зниження плати за електроенергію до 23%);

– підвищити надійність систем електропостачання (настроювання протиаварійної автоматики без урахування пускових струмів, зниження

робочого перетину ліній і кабельних трас, забезпечення можливості роботи більшого числа споживачів на одному фідері);

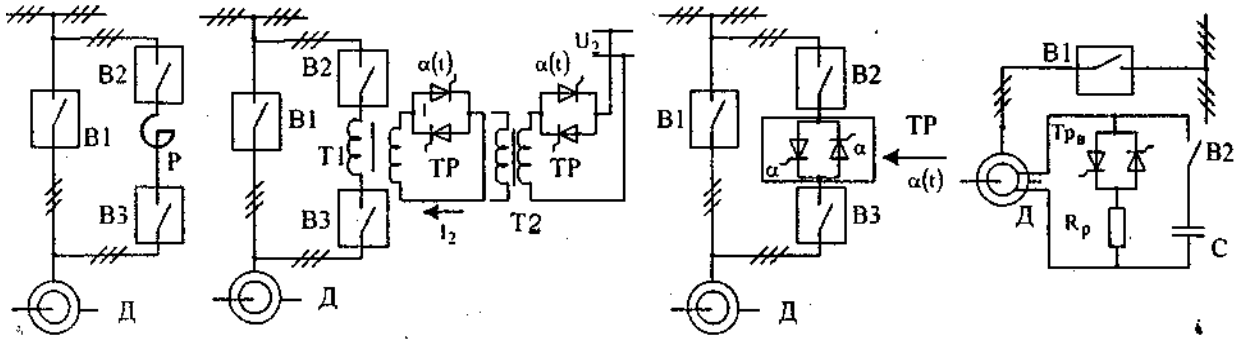
– знизити непродуктивні втрати електроенергії (виключення тривалого холостого режиму електродвигуна);

– здійснити передпускове випробування й діагностику електроустаткування;

– формувати графіки навантаження в періоди максимуму енергосистеми;

– використовувати в комплексі з автономними джерелами живлення.

Основні пускові пристрої для синхронних і асинхронних двигунів характеризуються схемами, представленими на рис. 1.7 [1, 2].



а) б) в) г)

а) схема реакторного пускового пристрою; б) трансформаторна система;

в) схема тиристорного пускового пристрою з регулятором ТР;

г) схема пускового пристрою з пусковою ємністю в ланцюзі збудження

Рисунок 1.7 - Варіанти схем високовольтних пускових пристроїв

Класична схема реакторного пускового пристрою, показаного на рис. 1.7,а, дозволяє досить просто здійснити зниження пускових струмів і потужності, а також отримати полегшений запуск і знизити прискорення при розгоні.

Трансформаторна система пуску, показана на рис. 1.7,б, застосовується значно рідше, характеризується більшою складністю; однак при використанні

ТПН на стороні зниженої напруги забезпечує плавне регулювання напруги на статорі двигуна Д. Якщо вторинний ланцюг трансформатора ТР з'єднати з живильною мережею, то може бути реалізований режим підвищення напруги на затисках статора. Таким чином, розглянутий варіант дозволяє здійснити рушання двигуна, що запускається, з підвищеним пусковим моментом.

На рис. 1.7,в представлена схема тиристорного пускового пристрою з регулятором ТР, широко використовуваного в техніці. Регулювання кута керування $\alpha(t)$ дозволяє управляти напругою на затисках статора двигуна, формувати пускові характеристики двигуна (струмові й механічні) зі зменшенням їхньої твердості в порівнянні із природною характеристикою двигуна. Спеціальні режими: одержання знижених швидкостей, рівних $(0{,}05 \div 0{,}1)\cdot \omega_{ном}$, формування пускових характеристик з підвищеним пусковим моментом, - можливо при використанні режиму квазічастотного керування. Негативна сторона такого керування - підвищені струмові навантаження й генерування в мережу широкого спектра гармонік струму, що обмежує можливість використання цих режимів у мережах 6кВ для запуску потужних двигунів.

Заслуговує на певну увагу схема пускового пристрою з пусковою ємністю в ланцюзі збудження (рис. 1.7,г). При відповідному значенні пускової ємності можна одержати збільшення пускового моменту двигуна за рахунок росту активної складової струму роторної обмотки при пуску. Можливе збільшення пускового моменту становить 25-30%.

В останні роки стало широко застосовуватися для керування асинхронними й синхронними двигунами частотне керування [15]. Розглянемо властиві цьому керуванню основні математичні залежності.

З урахуванням зразкової пропорційності швидкості двигуна змінного струму від частоти f статорної напруги, представимо максимальний (критичний) момент статичний на валу двигуна турбомеханізму у формі:

$$M_c(\omega) = k_з \cdot k_c \cdot \left(\frac{\omega_x}{\omega_н}\right)^2 \approx k_з \cdot k_c \cdot {f_x}^2, \qquad (1.7)$$

де $f_x=f/f_н$ – відносне значення частоти; $f_н$ – номінальна частота, рівна 50 Гц.

Момент двигуна при частотному керуванні дорівнює:

$$M_д(\omega) = 2 \cdot \lambda_м \cdot \frac{u_x^2}{f_x^2}. \quad (1.8)$$

де $U_x=U/U_н$ – відносна напруга;

$U_н$ – номінальна напруга;

$\lambda_м=M_к/M_н$ – перевантажувальна здатність двигуна по моменту.

Якщо частота живлення відома з технологічних умов, то рівень напруги живлення, при якому максимальне значення моменту двигуна дорівнює статичному моменту перебуває зі співвідношення:

$$u_x = \sqrt{\frac{k_з \cdot k_c \cdot f_x^2}{2 \cdot \lambda_м}}. \quad (1.9)$$

При відомому мінімальному відносному значенні напруги $U_{x\,min}$ можливе значення частоти розраховується у вигляді:

$$f_x = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda_м \cdot U_{x\,min}^2}{k_з \cdot k_c}}. \quad (1.10)$$

При частотному керуванні одержання спеціальних режимів, що стосуються рівня й тимчасових характеристик моменту при рушанні, має свої особливості залежно від виду електричної машини, використовуваної в системі привода. При використанні асинхронних машин режим максимального моменту при рушанні здійснюється шляхом завдання частоти напруги живлення такої, при якій пусковий момент асинхронного двигуна дорівнює

критичному. Значення критичного моменту цього двигуна визначається залежністю [1,15]:

$$M_k = \frac{m \cdot U_н^2}{2 \cdot \omega_0} \cdot u_x^2 \cdot \frac{1}{r_1 \cdot \nu + \sqrt{\left(b + c^2 \cdot \nu^2\right) \cdot \left(d^2 + e^2 \cdot \nu^2\right)}}, \qquad (1.11)$$

де коефіцієнт b, c, d, e, τ, τ_1 і τ_2 розраховуються зі співвідношень:

$$\left.\begin{aligned} b &= r_1 \cdot (1 + \tau_2); \\ c &= x_\mu \cdot \tau; \\ d &= r_1 \cdot x_\mu^{-1}; \\ e &= 1 + \tau_1; \\ \tau &= \tau_1 + \tau_2 + \tau_1 \cdot \tau_2; \\ \tau_1 &= x_1 \cdot x_\mu^{-1}; \\ \tau_2 &= x_2' \cdot x_\mu^{-1}; \end{aligned}\right\} \qquad (1.12)$$

причому: τ_1, τ_2 – коефіцієнти розсіювання статора й ротора;

r_1, x_1, x_2', x_μ – параметри схеми заміщення.

Тому що при рушанні з моментом двигуна, рівним критичному, критичне ковзання дорівнює [1, 16]:

$$\beta_k = r_2' \cdot \sqrt{\frac{d^2 + e^2}{b^2 + c^2}} \cong \frac{r_2'}{\sqrt{r_1^2 + (x_1 + x_2')^2}}. \qquad (1.13)$$

У випадку, якщо технологічний момент рушання $M_{кт}$ відомий (він повинен визначатися для конкретних виробничих умов), то необхідний рівень статорної напруги двигуна при рушанні буде дорівнювати:

$$u_x = \sqrt{\frac{2 \cdot M_{кт} \cdot \omega_0}{m \cdot U_н^2} \cdot \left(r_1 \cdot \beta_k + \sqrt{\left(b^2 + c^2 \cdot \beta_k^2\right) \cdot \left(d^2 + e^2 \cdot \beta_k^2\right)}\right)}. \qquad (1.14)$$

При асинхронному пуску синхронного двигуна параметри пускової системи вибираються такими, щоб частота відповідала критичному ковзанню β_k (яке для синхронних двигунів перебуває в межах 0,2÷0,4), внаслідок чого напруга й частота повинні бути досить великі. З іншого боку асинхронний режим синхронного двигуна через конструктивні особливості електричної машини (порівняно малого опору x_m) супроводжується статорними струмами, близькими до пускового. Обидва фактори приводять до необхідності істотного завищення параметрів перетворювача частоти. Таких недоліків позбавлений пуск двигуна в синхронному режимі, тобто - зі збудженим ротором. Формування моменту рушання синхронного двигуна, створення умов, при яких можливі фіксовані кутові переміщення, зручно розглядати з позицій взаємодії обертового або нерухливого магнітного поля статора й поля ротора при рушанні двигуна, що перебувають у спокої. Момент, що розвивається двигуном при цьому, дорівнює [15]:

$$M_т = C_м \cdot F_1 \cdot F_2 \cdot \sin \vartheta, \qquad (1.15)$$

де $C_м$ – постійний конструктивний коефіцієнт двигуна;

$\vartheta = \int_0^t \omega_0 dt$ – кут повороту магніторушійної сили (МРС) ротора.

При зазначених МРС статора F_1 і ротора F_2 розраховуються у вигляді:

$$\left.\begin{aligned} F_1 &= \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \cdot W_1 \cdot I_1 \\ F_2 &= I_в \cdot W_в \end{aligned}\right\}, \qquad (1.16)$$

де $I_1, I_в$ – струми статора й обмотки збудження;

W_1 і W_2 – число витків в обмотках статора й ротора відповідно.

Отже, при нерухливому роторі момент M_m змінюється за гармонійним законом із частотою, що при рушанні становить частки герца, при цьому керування струмом статора або ротора дозволяє управляти амплітудою знакозмінного моменту. Розгін двигуна здійснюється за допомогою збільшення частоти живлення, завдяки чому ротор двигуна починає рух убік поля статора й синхронізується з ним. Відпрацьовування фіксованих переміщень здійснюється за допомогою формування спеціальних впливів.

Визначення потужності пускових пристроїв виконується в припущенні, що відома траєкторія руху механізму при пуску, час розгону, момент інерції й статичний момент. Залежність зміни швидкості двигуна при цьому описується основними рівняннями руху електропривода [17]:

$$M_{дв}(\omega) = M_c(\omega) + J\frac{d\omega(t)}{dt}. \qquad (1.17)$$

З урахуванням знайденого значення моменту з (1.11), з відомої залежності в [17] визначаються значення статорні напруги й струми двигуна в часі (які дорівнюють напрузі й струму на виході перетворювального пристрою). Знаходження потужності пускових систем і вплив режиму рушання на їхню встановлену потужність здійснюється з урахуванням особливостей формування моменту рушання в конкретних технологічних умовах.

1.3. Пристрої для плавного пуску потужних двигунів змінного струму.

Пристрій плавного пуску (ППП) забезпечує плавний пуск асинхронних двигунів з обмеженням пускового струму й кутового прискорення, захист від механічних ударів виконавчого механізму, дозволяє регулювати час розгону й гальмування двигуна.

Діаграма зміни напруги в часі на затисках статора двигуна зображена на рис. 1.8. Первісна уставка пускової початкової напруги $U_{п1}$ може варіюватися в межах (10-60) % від номінальної напруги, що забезпечує необхідний рівень

пускового моменту АД. Якщо при пуску АД потрібно створити необхідний момент рушання, то можливо короткочасний (протягом часу $t_к$ = 0,5 с) додаток до статора імпульсу напруги з амплітудою 90 % від номінальної напруги. Тривалість пуску $t_п$ може варіюватися в межах від 0,5 до 60 з, а тривалість гальмування $t_о$ — від 0 до 240 с. Пусковий струм АД може встановлюватися в межах (2 - 5) $I_н$, а діапазон зміни кінцевої напруги ($U_к$) дорівнює (30-100 %) від номінального ($U_н$).

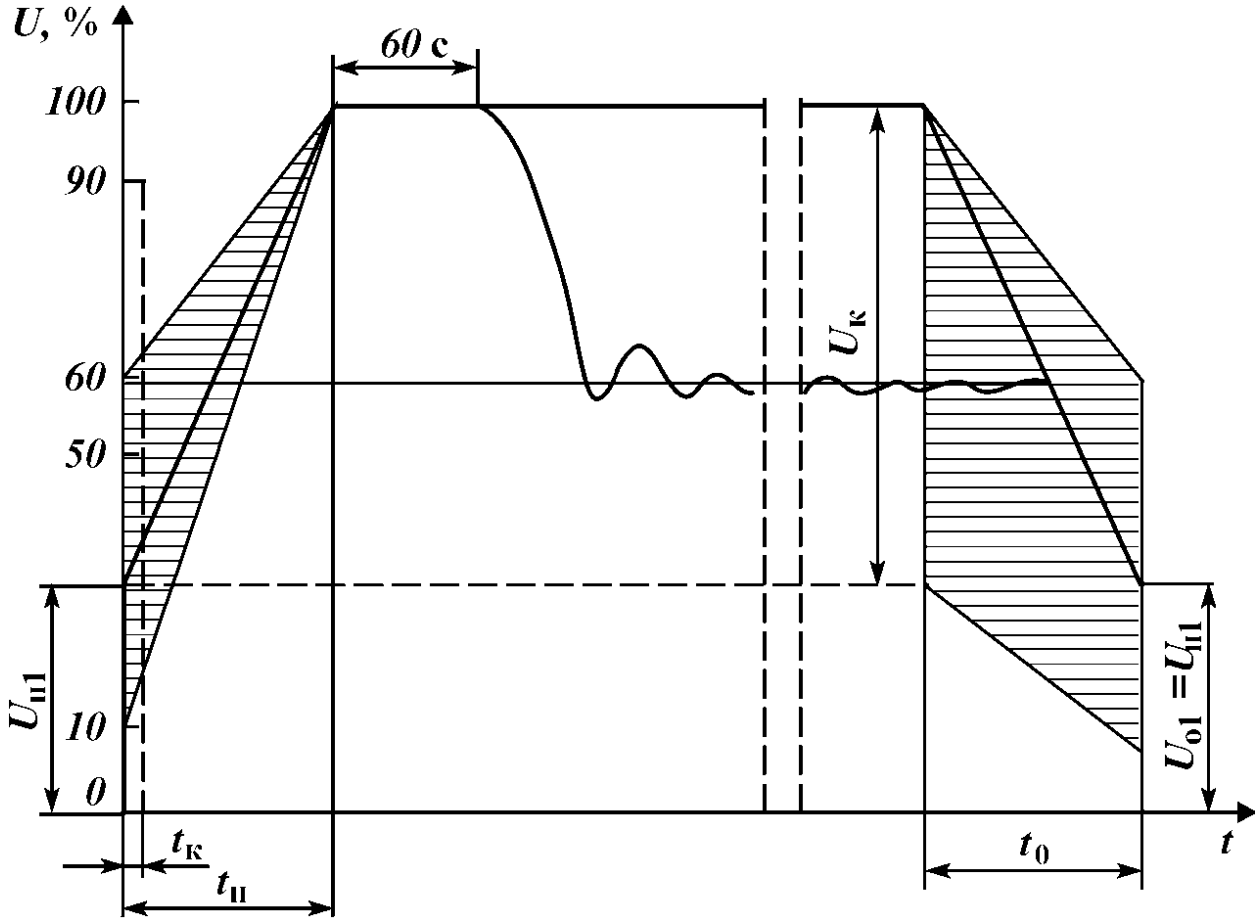


Рисунок 1.8 - Графік напруги на затисках синхронного двигуна, одержаний за допомогою ППП

При зменшенні навантаження на валу двигуна ППП автоматично знижує напругу на затисках статора до значення 0,6 від номінального, що забезпечує економію електроенергії без шкоди для працездатності привода. Однак це зниження можливо не раніше, ніж через 60 с після завершення розгону

двигуна. Регулювання напруги на виході ППП здійснюється за допомогою тиристорних модулів, якими управляє мікропроцесор.

Фірма Siemens здійснює випуск ППП типу SIMOSTART MV для пуску електродвигунів потужністю від 500 до 5000 кВт на напругу 6 і 6,6 кВ. Планується випуск цією фірмою ППП на напруги 11 кВ і 13,8 кВ.

Пристрої плавного пуску забезпечують:

- обмеження пускового моменту й струму двигуна;
- усунення гідравлічного удару, а також механічних ударів у передавальному механізмі при пуску й зупинці турбомеханізми;
- нормальний пуск електродвигуна від автономного джерела енергопостачання відповідної потужності, а також у слабких електричних мережах.

1.4. Частотно-регульований привід

Сучасний частотно-регульований електропривід складається з асинхронного або синхронного електричного двигуна й перетворювача частоти.

Перетворювач частоти керує електричним двигуном і являє собою електронний статичний пристрій. На виході перетворювача формується електрична напруга зі змінними амплітудою й частотою. При скалярному частотному керуванні за певним законом змінюють амплітуду й частоту прикладеної до двигуна напруги. Зміна частоти живлячої напруги приводить до відхилення від розрахункових значень максимального й пускового моментів двигуна, ККД і коефіцієнта потужності. Тому для підтримки необхідних робочих характеристик двигуна необхідно зі зміною частоти одночасно відповідно змінювати й амплітуду напруги.

В існуючих перетворювачах частоти при скалярному керуванні найчастіше підтримується постійним відношення максимального моменту двигуна до моменту опору на валу. Тобто при зміні частоти змінюється амплітуда напруги таким чином, що відношення максимального моменту

двигуна до поточного моменту навантаження залишається незмінним. Це відношення називається перевантажувальною здатністю двигуна. При сталості значення перевантажувальної здатності номінальні значення коефіцієнта потужності й ККД двигуна на всьому діапазоні регулювання частоти обертання практично не змінюються [16]. Важливою перевагою скалярного методу є можливість одночасного керування групою електродвигунів. Скалярне керування на практиці широко застосовується в більшості частотно-регульованих електроприводів (з діапазоном регулювання частоти обертання двигуна менш, ніж 1:40).

Векторне керування дозволяє істотно збільшити діапазон керування, точність регулювання, підвищити швидкодію електропривода. Цей спосіб керування забезпечує формування обертаючого моменту двигуна в перехідних процесах. Завдання такого керування вирішується або за допомогою виносного датчика положення ротора, або за допомогою визначення положення ротора шляхом обчислень по інших параметрах двигуна. В якості цих параметрів використовуються струми й напруги статорних обмоток. Менш дорогим є частотно-регульований електропривід з векторним керуванням без датчика швидкості. Однак векторне керування при цьому вимагає великого об'єму й високої швидкості обчислень у системі керування перетворювачем частоти.

Векторне керування з датчиком швидкості забезпечує діапазон регулювання до 1:1000 і більше, при цьому точність регулювання по швидкості може становити до сотих часток відсотка, а точність по моменту - одиниці відсотків.

У високовольтних перетворювачах частоти різних фірм виробників використовуються розглянуті нижче схемні рішення. По-перше - двохтрансформаторна схема високовольтного перетворювача частоти, показана на рис. 1.9, у якій здійснюється подвійна трансформація напруги за допомогою понижувального (Т1) і підвищувального (Т2) високовольтних трансформаторів. При цьому низьковольтний перетворювач частоти відрізняється відносною дешевиною й простотою практичної реалізації. Внаслідок цього розглянута схема найчастіше застосовується для керування

високовольтними електродвигунами в діапазоні потужностей до 1 - 1,5 МВт. При більшій потужності електропривода трансформатор Т2 вносить істотні викривлення в процес керування електродвигуном. Основними недоліками двохтрансформаторних перетворювачів є високі масогабаритні характеристики, менші стосовно інших схем значення КПД (рівним 93 - 96%) і надійність. Перетворювачі, виконані за цією схемою, мають обмежений діапазон регулювання частоти обертання двигуна як зверху, так і знизу від номінальної частоти.

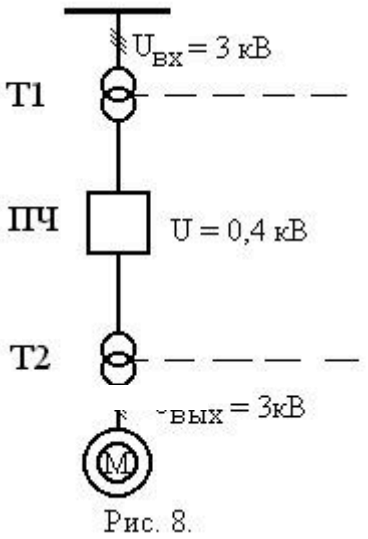


Рисунок 1.9 - Двохтрансформаторна схема високовольтного перетворювача частоти

Зокрема, при зниженні частоти на виході перетворювача збільшується насичення сердечника й порушується розрахунковий режим роботи вихідного трансформатора Т2. Тому, як показує практика, діапазон регулювання швидкості двигуна обмежений у межах: $n_{ном}>n>0,5n_{ном}$. Для розширення діапазону регулювання швидкості використовують трансформатори зі збільшеним зрізом магнітопроводу, але це збільшує їхню вартість, масу й габарити.

При збільшенні вихідної частоти зростають втрати в сердечнику трансформатора Т2 на перемагнічування й вихрові струми. У приводах потужністю більше 1 Мвт і напругою низьковольтної частини, рівним 0,4 - 0,6 кВ, зріз кабелю між перетворювачем частоти й низьковольтною обмоткою трансформаторів повинен бути розрахований на струми до кілоампер, що збільшує масу перетворювача.

По-друге, відома схема безтрансформаторного перетворювача частоти (ПЧ) з послідовним включенням електронних ключів, показана на рис. 1.10. Для підвищення робочої напруги в цій схемі перетворювача частоти електронні ключі з'єднують послідовно.

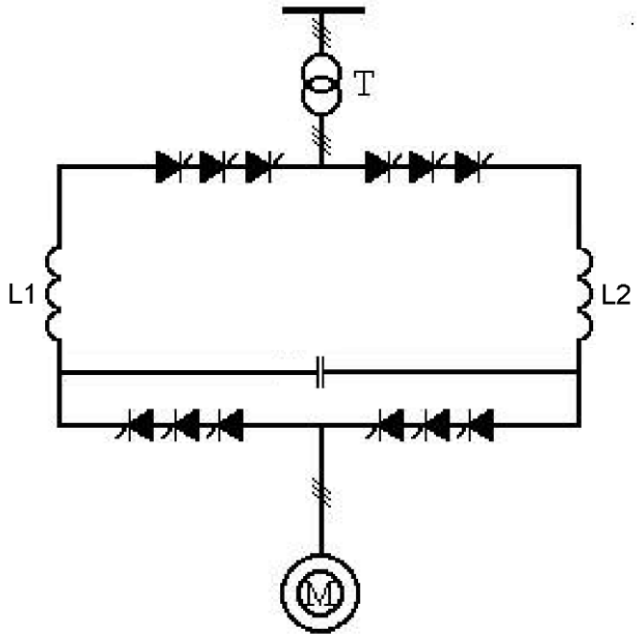


Рисунок 1.10 - Схема безтрансформаторного перетворювача з послідовним включенням електронних ключів

Число силових ключів (замкнених тиристорів) кожному плечу визначається величиною робочої напруги й типом застосовуваних ключів. Основна технічна складність для цієї схеми заключається в чіткому узгодженні (синхронізму) роботи електронних ключів. Напівпровідникові силові ключі, виготовлені навіть в одній партії, мають розкид параметрів, тому дуже гостро стоїть завдання узгодження їхньої роботи із часом. Якщо один із ключів відкриється із затримкою або закриється раніше інших, то до нього буде

прикладена повна напруга плеча, внаслідок чого він вийде з ладу. Для зниження рівня вищих гармонік і поліпшення електромагнітної сумісності використовують багатопульсі схеми перетворювачів.

На рис. 1.11 зображена шестипульсна схема із двохобмоточним узгодженим трансформатором. Дана схема є найпоширенішою для високовольтних перетворювачів великої потужності. Зазначені перетворювачі мають кращі питомі масогабаритні показники, діапазон зміни вихідної частоти від 0 до 250-300 Гц, ККД перетворювачів досягає 98,6%. На практиці існують 12-ти, 18-ти, 24-х пульсні схеми перетворювачів. Число вторинних обмоток трансформаторів у цих схемах дорівнює 2, 3, 4 відповідно.

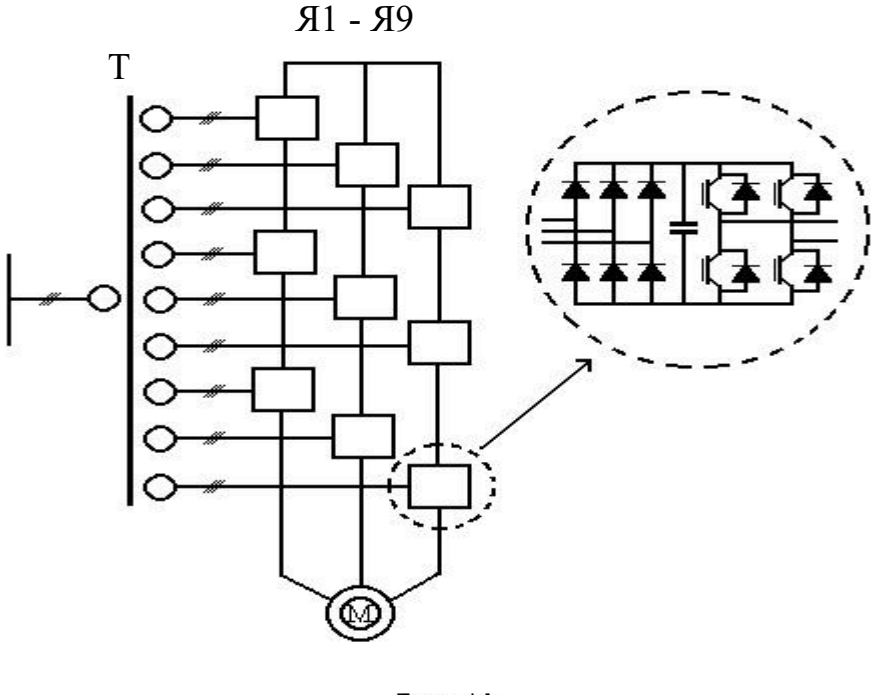


Рисунок 1.11 - Схема перетворювача із багатообмоточним трансформатором

По-третє, існує схема перетворювача частоти із багатообмоточним трансформатором, показана на рис. 1.11. Силова схема такого перетворювача складається із багатообмоточного трансформатора Т і електронних випрямильно-інверторних ячейок Я. Кількість вторинних обмоток багатообмоточного трансформатора у відомих схемах досягає 18. Вторинні обмотки цього трансформатора електрично зміщені відносно один одного.

Застосування розглянутого багатообмоточного трансформатора дозволяє використовувати низьковольтні інверторні ячейки. Ячейка виконується за

схемою: некерований трифазний випрямляч, ємнісний фільтр, однофазний інвертор на IGBT-Транзисторах. Виходи ячейок з'єднуються послідовно. У наведеному на рис. 1.11 прикладі кожна фаза живлення електродвигуна містить три ячейки.

2 ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ НАСОСНОГО ОБЛАДНАННЯ В ІСНУЮЧИХ ЗРОШУВАЛЬНИХ СИСТЕМАХ

2.1 Аналіз структури споживання електроенергії на головній насосній станції зрошувальної системи

Розглянемо ГНС на прикладі Південно-Бузької зрошувальної системи, яка зрошує площу 13146. Водозабір системи знаходиться в с. Ковалівка. До головної насосної станції від річки веде підводний канал протяжністю 300 м і шириною 30 м. Насосами вода двома ниткам напірного водоводу (довжина 2,24 км) подається на висоту 104,4м в заспокійливий басейн головного магістрального каналу. Канал діє за схемою автоматичного водорегулювання по верхньому б'єфу, що забезпечує надійний водорозподіл зверху вниз. На протязі магістрального каналу (довжина 16,6 км) розташовані насосні станції, які подають воду в трубопровід до гідрантів на поле, а з них через тимчасові зрошувальні канали − до дощувальних установок (рис. 2.1).

На головній насосній станції (ГНС) Південно-Бузької зрошувальної системи експлуатуються чотири насосні агрегати з асинхронними двигунами, технічні дані яких наведені у табл. 2.1.

Таблиця 2.1 - Технічні дані асинхронних двигунів

Тип двигуна	Потужність, кВт	Синхрона частота обертаня, об/хв	ККД, %	Коеф-т потужності	M_{max}/Mn, в.о.	Вага, кг
ДАЗОС-3000-6-1500У1	3200	1500	95,2	0.88	3,0	16900
ДАЗ 14 79-4МУХЛ4	2200	1500	96,2	0,86	2,3	8000
АЗМ-2000/6-2УХЛ4	2340	3000	96,8	0,89	2,2	6000
ДАЗО4-450У-4У1	630	1500	94.7	0.87	2,5	2900

Для аналізу водо-енергетичного функціонування ГНС приймемо за базу початкові дані, які наведені у табл. 2.2.

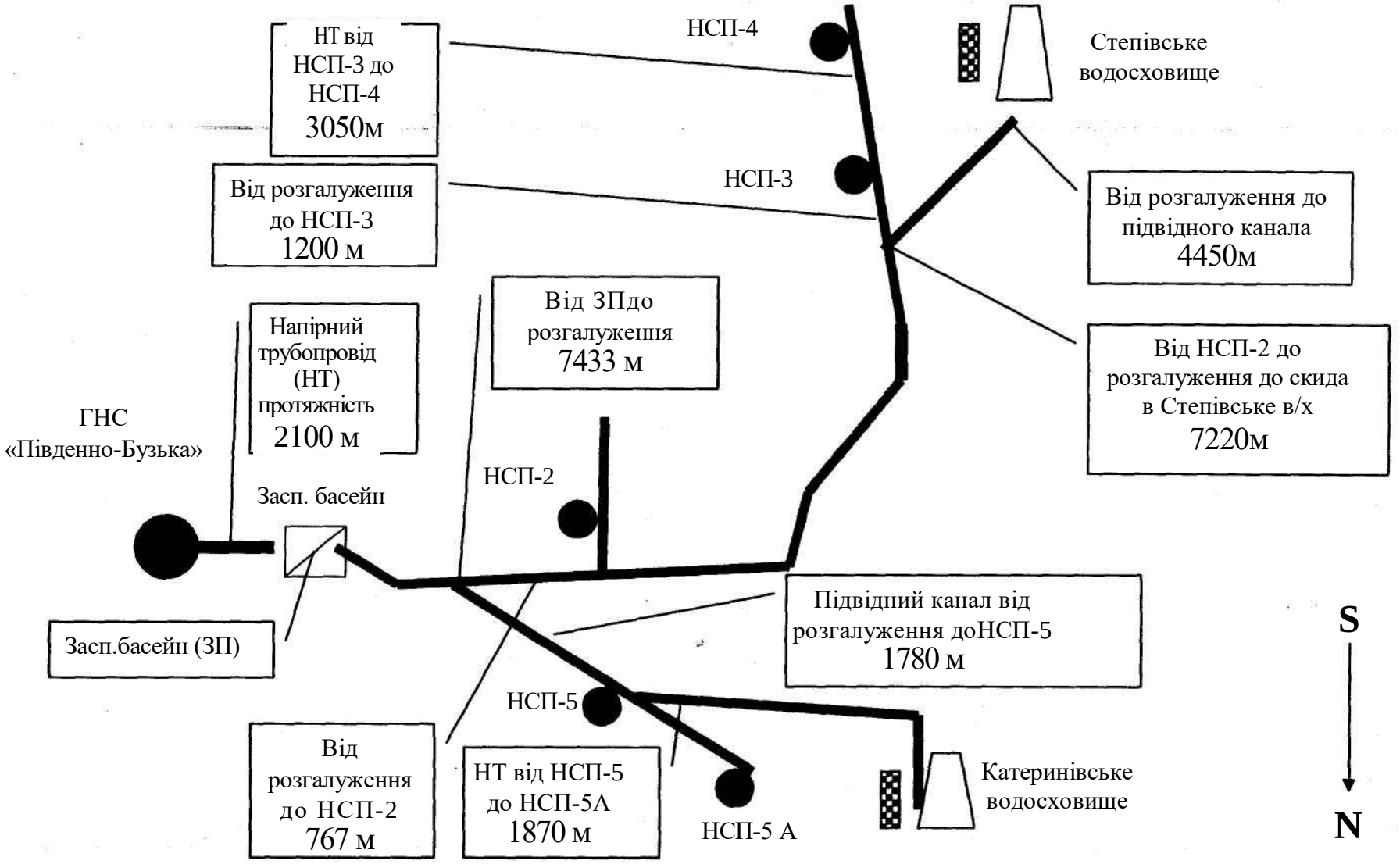


Рисунок 2.1 - Лінійна схема розташування насосних станцій. Південно-Бузька зрошувальна система

Таблиця 2.2 - Дані, отримані в результаті її експлуатації

№	Параметр/ рік	2020р.	2021р.	2022р.	Прим.
1	2	3	4	5	6
1	Середній обсяг споживання води за добу по місяцях, тис.м^3:				
	Квітень	114	108	-	
	Травень	114	118	32,29	
	Червень	144	96,7	90,66	
	Липень	271	96,7	51,71	
	Серпень	114	96,8	112,82	
	Вересень	114	100,2	47,88	
2	Продуктивність НА, м^3/сек:				
	Агрегат №1	2,3	2,3	3,07	
	Агрегат №2	1,82	2,3	2,3	
	Агрегат №3	2,3	1,56	1,83	
	Агрегат №4	1,32	2,5	1,35	
	Агрегат №5	-	-	0,38	
3	Фактично споживана потужність одного НА, кВт				
	Агрегат №1	3000	-	3200	
	Агрегат №2	2200	-	-	
	[1] Агрегат №3	3000	2200	2200	
	Агрегат №4	2200	2340	2340	
	Агрегат №5	-	-	630	
4	Одночасно працювало НА по місяцях в сезон поливу				
	Квітень	1	1	-	
	Травень	1	1	2	
	Червень	2	1	4	
	Липень	2	1	3	
	Серпень	1	1	3	
	Вересень	1	1	2	

Часті прямі увімкнення двигунів зумовлюють до їх виходу з ладу через великі термодинамічні удари, оскільки пусковий струм в 5 - 7 разів перевищує номінальний струм двигуна. Тому заводи-виробники вводять ліміт на кількість пусків двигунів за час експлуатації. Допустима (паспортна) кількість прямих пусків НА в сезон за

даними заводу-виробника допускається не більше двох пусків підряд з холодного стану і один пуск з гарячого стану в місяць. Короткий аналіз наявних даних показує, що затрати на оплату споживаної електроенергії в собівартості затрат на перекачування води складають переважну частину [6, 7].

Введення почасового (зонного) тарифу оплати споживаної електроенергії, а також постійне її зростання, яке в досяжному майбутньому триватиме, вимагає вживання невідкладних заходів як до зниження її споживання так і зниженню затрат на її оплату [8].

Основне перекачування води повинне здійснюватися вночі, або при необхідності в години напівпік (а це 11 годин за добу). Це може здійснюватися за рахунок частих увімкнень і вимкнень насосних агрегатів (НА) або регулювання подачі води за рахунок регулювання швидкості обертання НА при живленні їх двигунів від перетворювача частоти (ПЧ). В першому випадку економляться витрати на оплату споживаної електроенергії. В другому випадку економиться споживана електроенергія і затрати на її споживання.

Автоматизація насосних станцій зрошувальних систем є одним з діючих шляхів впровадження енергозберігаючих технологій, зниження експлуатаційних витрат і підвищення надійності експлуатації основного насосно-силового й допоміжного устаткування. По режимах керування встаткуванням насосна станція є з ручним керуванням, при якому всі операції, пов'язані з експлуатацією основного встаткування, виконуються постійно присушім черговим персоналом. Ручне керування може бути місцевим, при якому всі апарати керування розташовуються у безпосередній близькості від устаткування, і дистанційним, котре здійснюється на відстані із щита керування. Насосні станції з великими відцентровими або осьовими насосами й синхронними приводними електродвигунами великої потужності мають складні технологічні схеми пусків і зупинок з роботою різноманітного допоміжного устаткування, керування якими в комплексі складно автоматизувати й тому, як правило, вони проектуються й експлуатуються з ручним керуванням або з місцевою автоматизацією роботи окремих систем. Ручне керування всіма агрегатами й механізмами цих насосних станцій здійснюється черговим персоналом як за

допомогою електричних апаратів, установлених у безпосередній близькості від устаткування, так і дистанційно із щита керування. Технічне обслуговування й ремонт устаткування насосних станцій з ручним керуванням здійснюється черговим і спеціальним оперативним ремонтним персоналом.

2.2 Імітаційна модель прямого пуску насосного агрегату

Для розробки імітаційних математичних моделей [13] насосних агрегатів використовується обчислювальна система програм MATLAB [18], котра є одночасно операційною системою та язиком програмування. Система MATLAB дозволяє використовувати спеціалізовані функції і програми, написані на інших алгоритмічних язиках. В неї входить програма візуального моделювання SIMULINK, котра і використовувалася для моделювання.

Для дослідження режиму розгону насосного агрегату при прямому пуску АД від мережі була розроблена імітаційна модель, блок-схема якої показана на рис. 2.2.

Блок-схема даної імітаційної моделі містить:

Three-Phase Source – трифазне джерело живлення;

Three-Phase Breaker – трифазний вимикач;

Asynchronous Machine SI Units – асинхронний двигун;

Voltage Measurement 1-3 – блоки виміру напруги;

Math Function и Gain1 – функція вентиляторного навантаження;

Subsystem – блок обчислення втрат електричної енергії;

Scope1 – осцилограф напруги;

Scope2 – осцилограф втрат енергії;

Scope3 – осцилограф швидкості;

Scope4 – осцилограф струму статора;

Scope5 – осцилограф електромагнітного моменту.

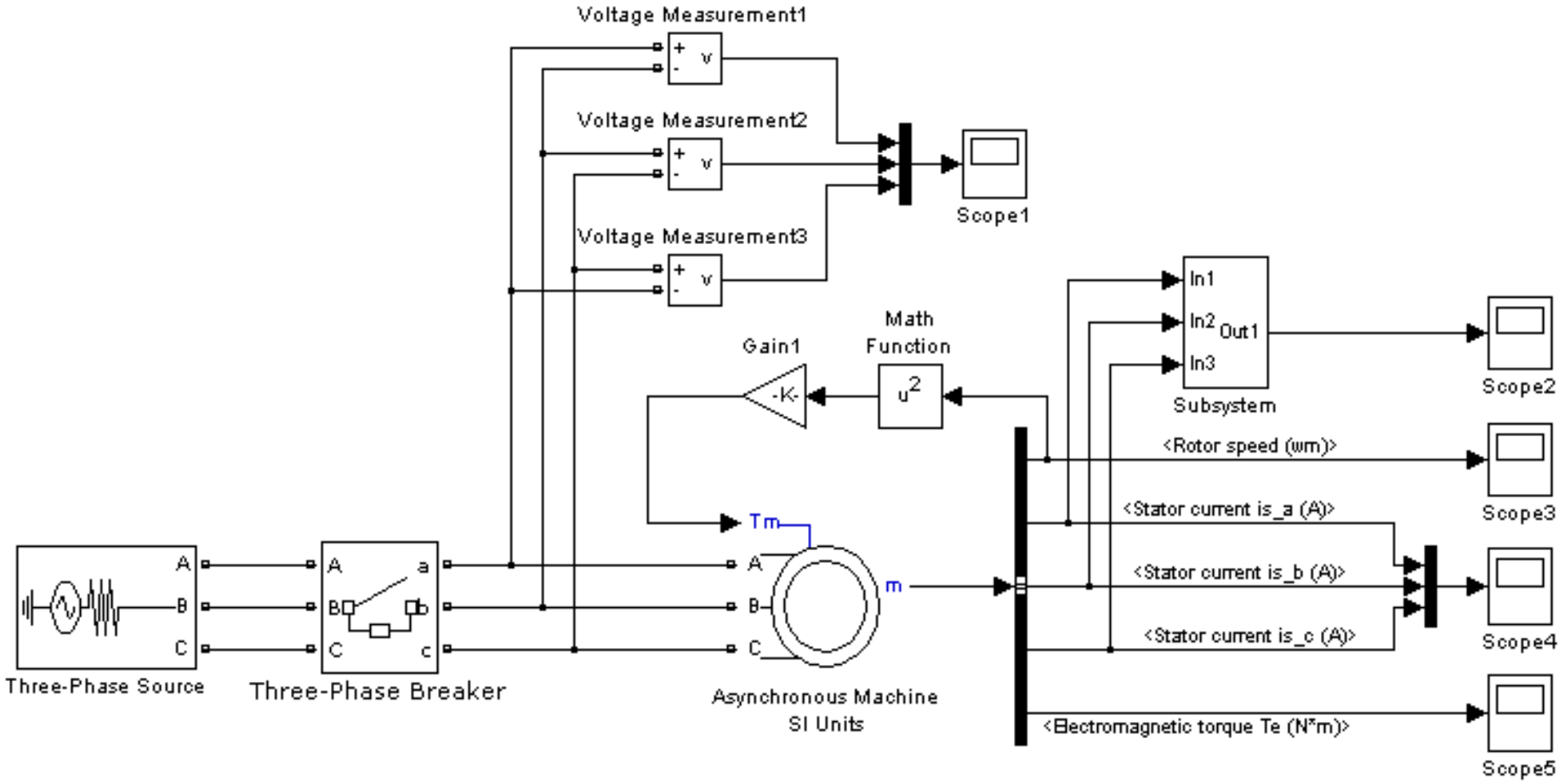


Рисунок 2.2 – Блок-схема імітаційної моделі насоса при прямому пуску АД від мережі

В блоці Three-Phase Source формується трифазна синусоїдальна напруга живлення з діючим лінійним значенням, яке дорівнює 6 кВ з частотою 50 Гц. Блок Three-Phase Breaker імітує роботу вимикача, за допомогою якого асинхронний двигун Asynchronous Machine SI Units (рис. 2.3) підключається до джерела живлення Three-Phase Source. За допомогою блоків Voltage Measurement 1-3 виконується вимір лінійної напруги з наступним виводом показань на осцилограф Scope1. Блоки Math Function та Gain1 імітують вентиляторне навантаження на валу двигуна. На осцилограф Scope3 виводяться показання швидкості ротора двигуна, на осцилограф Scope4 - струмів статора двигуна, на осцилограф Scope5 - електромагнітного моменту двигуна. Використовуючи показання струмів статора двигуна, блок Subsystem розраховує значення втрат електричної енергії з наступним виводом показань на осцилограф Scope2.

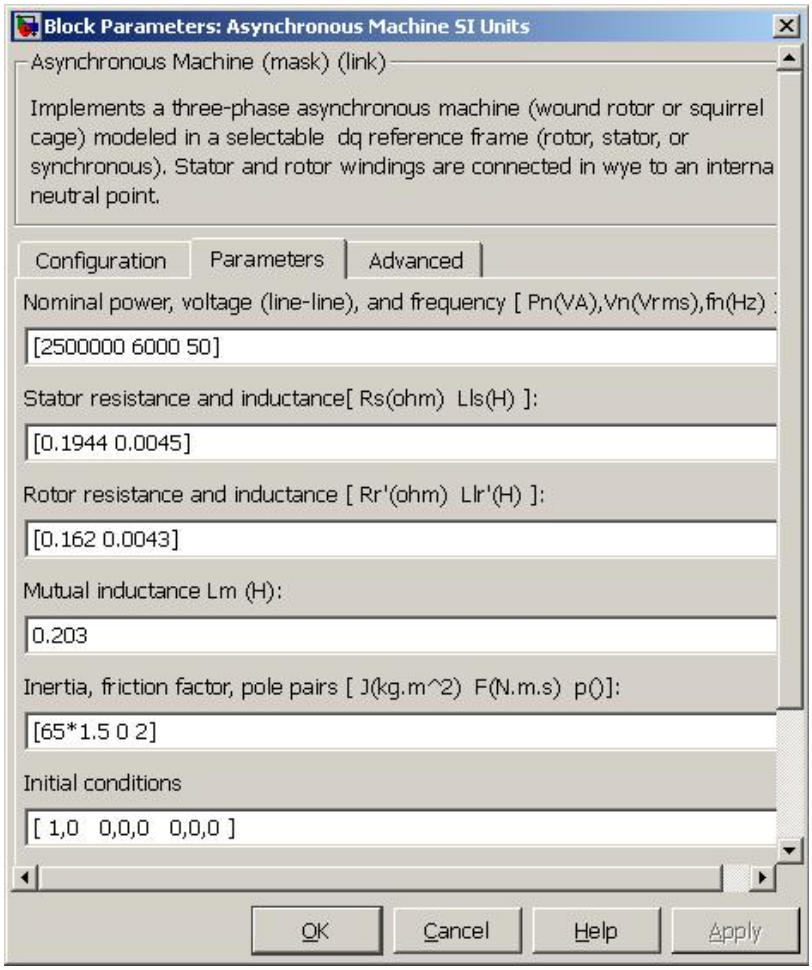


Рисунок 2.3 – Параметри блоку Asynchronous Machine SI Units.

На рис. 2.4 представлені результати моделювання режиму розгону насосного агрегата потужністю 2200 кВт при прямому пуску АД

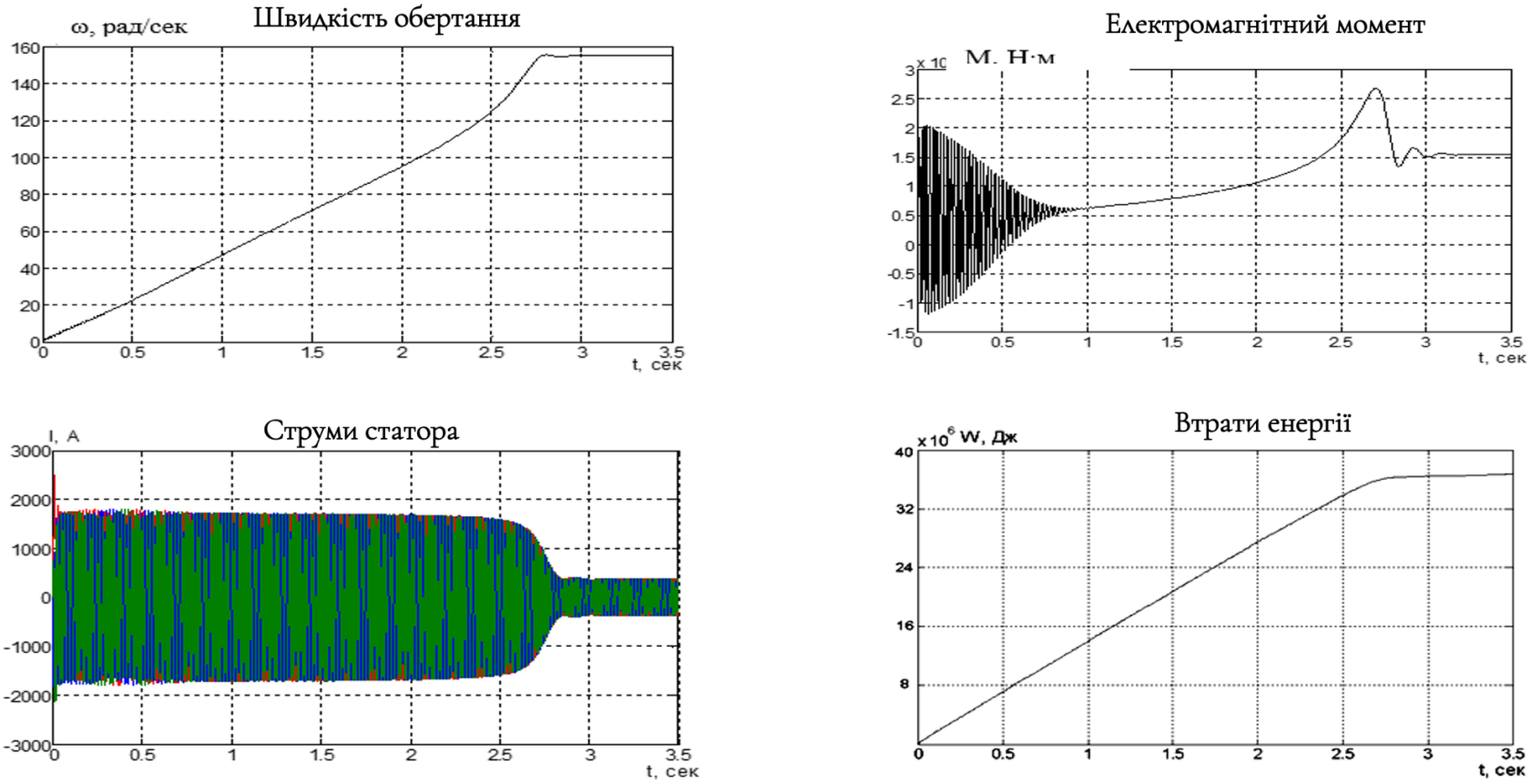


Рисунок 2.4 – Результати моделювання режиму розгону насосного агрегата потужністю 2200 кВт при прямому пуску АД

2.3. Аналіз енергоспоживання насосних агрегатів без пускових пристроїв (базовий варіант)

Існуюча робота зрошувальної системи характеризується такими періодами:

1) травень місяць, коли працює один НА №5 з продуктивністю 0,38 м^3/с і фактичною споживаною потужністю ($P_{НА5}$) 630 кВт; при невпинній цілодобовій роботі він забезпечує середній обсяг перекачування води 32,832 тис.м^3 за добу; у травні місяці він буде працювати такий час, що обумовлено середнім обсягом води, споживаної за добу у кількості 32,29 тис.м^3; кількість днів роботи НА у травні складе:

$$t_{тр} = Q_{сп} / Q_{НА} \cdot t_{міс} \qquad (2.1)$$

де $Q_{сп}$ - середній обсяг води, споживаної за добу у місяці - 32,29 тис.м^3;

$Q_{НА}$ - середній обсяг перекачування води за добу НА – 32,832 тис.м^3;

$t_{міс}$ - кількість календарних днів у місяці – 31 день;

$$t_{тр}=32,29 / 32,832 \cdot 31 = 31 \text{ доба};$$

2) червень місяць, коли працює один НА №4 з продуктивністю 1,35 м^3/с і фактичною споживаною потужністю ($P_{НА4}$) 2340 кВт; при невпинній цілодобовій роботі він забезпечує середній обсяг перекачування води 116,64тис.м^3 за добу; у червні місяці він буде працювати такий час, що обумовлено середнім обсягом води, споживаної за добу у кількості 90,66 тис.м^3; кількість днів роботи НА у червні розраховуємо за формулою (2.1):

$$t_{чер}=90,66 / 116,64 \cdot 30 = 24 \text{ доби};$$

3) липень місяць, коли працює один НА №4 з продуктивністю 1,35 м^3/с і фактичною споживаною потужністю ($P_{НА4}$) 2340 кВт; при невпинній цілодобовій роботі він забезпечує середній обсяг перекачування води 116,64тис.м^3 за добу; у липні місяці він буде

працювати такий час, що обумовлено середнім обсягом води, споживаної за добу у кількості 51,71 тис.м^3; кількість днів роботи НА у липні розраховуємо за формулою (2.1):

$$t_{лип}=51,71 / 116,64 \cdot 31 = 14 \text{ діб};$$

4) серпень місяць, коли працює один НА №4 з продуктивністю 1,35 м^3/с і фактичною споживаною потужністю ($P_{НА4}$) 2340 кВт; при невпинній цілодобовій роботі він забезпечує середній обсяг перекачування води 116,64тис.м^3 за добу; у серпні місяці він буде працювати такий час, що обумовлено середнім обсягом води, споживаної за добу у кількості 112,82 тис.м^3; кількість днів роботи НА у серпні розраховуємо за формулою (2.1):

$$t_{сер}=112,82 / 116,64 \cdot 31 = 30 \text{ діб};$$

5) вересень місяць, коли працює один НА №4 з продуктивністю 1,35 м^3/с і фактичною споживаною потужністю ($P_{НА4}$) 2340 кВт; при невпинній цілодобовій роботі він забезпечує середній обсяг перекачування води 116,64тис.м^3 за добу; у вересні місяці він буде працювати такий час, що обумовлено середнім обсягом води, споживаної за добу у кількості 47,88 тис.м^3; кількість днів роботи НА у вересні розраховуємо за формулою (2.1):

$$t_{вер}=47,88 / 116,64 \cdot 31 = 13 \text{ діб}.$$

Розрахуємо витрати при роботі насосних агрегатів (НА) без пристроїв пуску – базовий варіант. Використовувати будемо одно ставкову тарифікацію.

Визначимо існуючу оплату за споживану електроенергію за травень при роботі НА №5:

$$П_{тр} = P_5 \cdot \eta_5 \cdot t_{тр} \cdot t_о \cdot C \qquad (2.2)$$

де P_5 = 630 кВт – фактично споживана потужність НА №5;

η_5 = 0,947 – ККД двигуна НА№5;

$t_д$ = 24 год;

С = 6 грн / кВт· год (без ПДВ).

Звідки одержимо:

$$П_{тр} = 630 \cdot 0{,}947 \cdot 31 \cdot 24 \cdot 6 = 2663267{,}04 \text{ грн}$$

Визначимо існуючу оплату за споживану електроенергію за місяць при роботі НА №4:

$$П_{чер} = P_{НА4} \cdot \eta_4 \cdot t_{чер} \cdot t_д \cdot C \qquad (2.3)$$

де P_4 = 2340 кВт – фактично споживана потужність НА №4;

η_4 = 0,968 – ККД двигуна НА№4.

Звідки одержимо:

$$П_{чер} = 2340 \cdot 0{,}968 \cdot 24 \cdot 24 \cdot 6 = 7828254{,}72 \text{ грн.}$$

Визначимо існуючу оплату за споживану електроенергію за липень при роботі НА №4:

$$П_{лип} = P_{НА4} \cdot \eta_4 \cdot t_{лип} \cdot t_д \cdot C \qquad (2.4)$$

Звідки одержимо:

$$П_{лип} = 2340 \cdot 0{,}968 \cdot 14 \cdot 24 \cdot 6 = 4566481{,}92 \text{ грн.}$$

Визначимо існуючу оплату за споживану електроенергію за місяць при роботі НА №4:

$$П_{сер} = P_{НА4} \cdot \eta_4 \cdot t_{сер} \cdot t_д \cdot C \qquad (2.5)$$

Звідки одержимо:

$$П_{сер} = 2340 \cdot 0{,}968 \cdot 30 \cdot 24 \cdot 6 = 9975318{,}4 \text{ грн.}$$

Визначимо існуючу оплату за споживану електроенергію за місяць при роботі НА №4:

$$П_{вер} = P_{НА4} \cdot \eta_4 \cdot t_{вер} \cdot t_д \cdot C \qquad (2.6)$$

Звідки одержимо:

$$П_{вер} = 2340 \cdot 0{,}968 \cdot 13 \cdot 24 \cdot 6 = 4240304{,}64 \text{ грн.}$$

Сумарна плата за електроенергію за один полівній сезон оросительної системи в існуючому (базовому) варіанті $П_б$ складає:

$$П_б = П_{тр} + П_{чер} + П_{лип} + П_{сер} + П_{вер}, \qquad (2.7)$$

Звідки одержимо:

$$П_б = 2663267{,}04 + 7828254{,}72 + 4566481{,}92 + 9975318{,}4 + 4240304{,}64 = 29273626{,}72 \text{ грн.}$$

3 АНАЛІЗ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ПУСКОВИХ ПРИСТРОЇВ ДЛЯ НАСОСНИХ АГРЕГАТІВ ЗРОШУВАЛЬНИХ СИСТЕМ

3.1. Імітаційна модель пуску насосного агрегату з використанням тиристорного перетворювача напруги

Розглянемо використання ТПН напругою 6 кВ та потужністю 2200 кВт для живлення асинхроного двигуна насосного агрегату в режимі пуску. ТПН дозволяє зменшити пусковий струм і термодинамічні навантаження, застосовується для почергового пуску чотирьох асинхронних двигунів розглядаємої ГНС. При цьому забезпечується пуск двигуна за заданою програмою з регульованим плавним наростанням пускового струму до заданого значення з наступним обмеженням величини струму. Досягши підсинхронної швидкості видається команда на включення лінійного вимикача двигуна, а після його включення-відключення ПМП від даного двигуна і можливість пуску наступного двигуна.

Параметри вибраного ТПН:

- номінальна вихідна напруга - 6 кВ;
- номінальний струм - 500 А;
- час повторного запуску - 10 хв.;
- напруга живильної мережі - 6,3 кВ;
- частота мережі живлення - 50 Гц;

Схема системи електропостачання функціонально складається з токообмежуючих реакторів (А2) та теристорного перетворювача змінної напруги (А3) і засобів комутації ШР1 і ШР2. ТПН забезпечує контроль та регулювання величини пускового струму на заданому рівні. Блоки ШР1 і ШР2 забезпечують підключення до ПН відповідного агрегату, що пускається. Блок ШРТ - захищає блок Ш1 від великих струмових впливів, викликаними короткими замиканнями у вихідних ланцюгах і навантаженні ТПН.

Для виконання порівняльного аналізу електромеханічних процесів та втрат потужності в АД при живленні від ТПН розроблена в пакеті програм MATLAB математична модель пуску насосних агрегатів від ідеального ТПН, показаного на рис. 3.1.

Ця схема містить:

Three-Phase Source – трифазне джерело живленя;

Three-Phase Breaker – трифазний вимикач;

Asynchronous Machine SI Units – асинхроний двигун;

Voltage Measurement 1-3 – блоки виміру напруги;

Math Function и Gain1 – функція вентиляторного навантаження;

Subsystem – блок обчислення втрат електричної енергії;

Scope1 – осцилограф напруги;

Scope2 – осцилограф втрат енергії;

Scope3 – осцилограф швидкості;

Scope4 – осцилограф струму статора;

Scope5 – осцилограф електромагнітного моменту;

Scope6 – осциллограф кута керування тиристорів;

Curent – блок завдання обмеження пускового струму статора двигуна;

Angle controller – блок формування кута відкриття тиристорів;

Thyristors voltage converter – тиристорний перетворювач напруги (внутрішня схема блоку для одної фази показана на рис. 3.2).

Pulse-phase control system – блок формування імпульсів керування (внутрішня схема блоку показана на рис. 3.3);

На вказаній моделі проведені розрахунки електромеханічних процесів пуску насосного агрегату з електродвигуном типу ДАЗ 14 79-4МУХЛ4 потужністю 2200 кВт, напругою 6 кВ з використанням ТПН, результати яких наведені на рис. 3.4.

З розрахованих при пуску мережних струмів визначені втрати потужності при пуску з двигуном потужністю 2200 кВт з використанням ТПН, які рівні 7520 кДж.

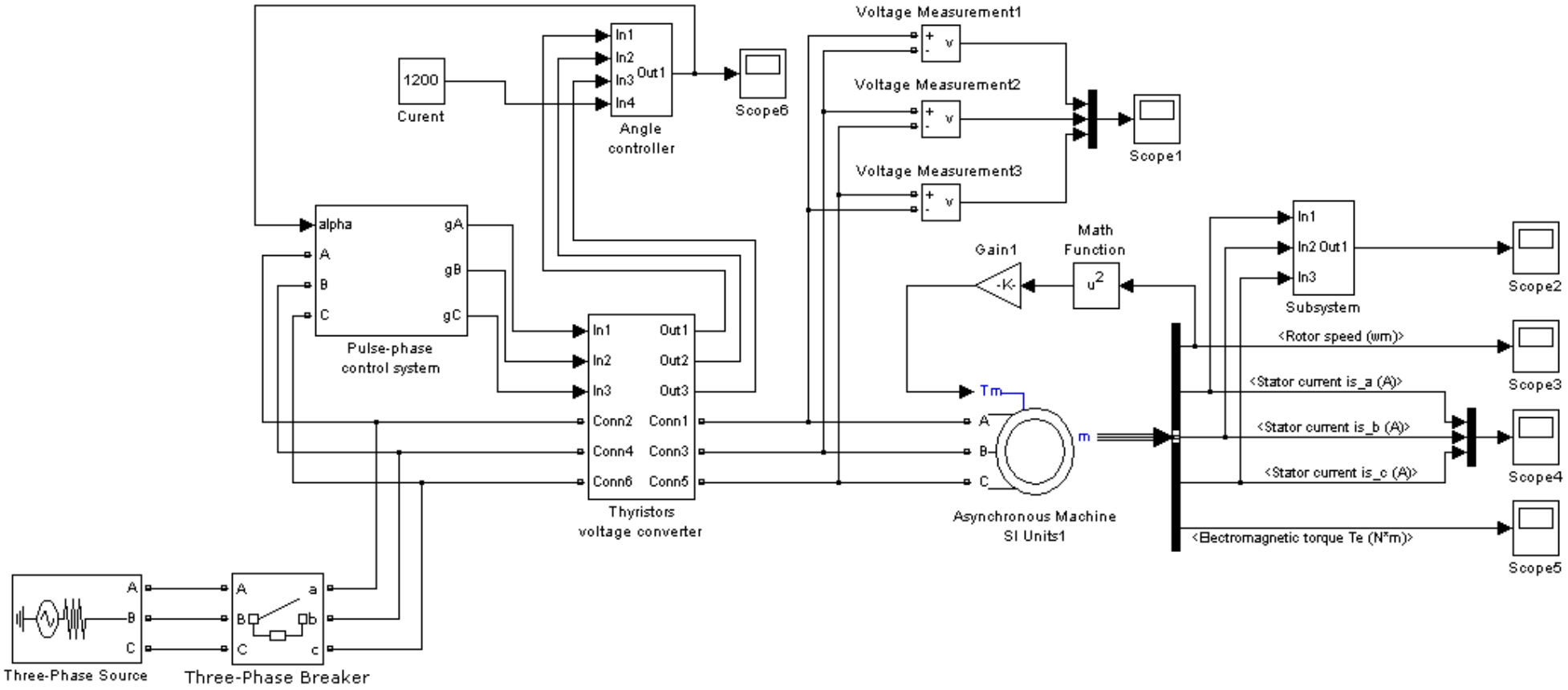


Рисунок 3.1 – Блок-схема імітаційної моделі пуску насосного агрегату з використанням тиристорного перетворювача напруги

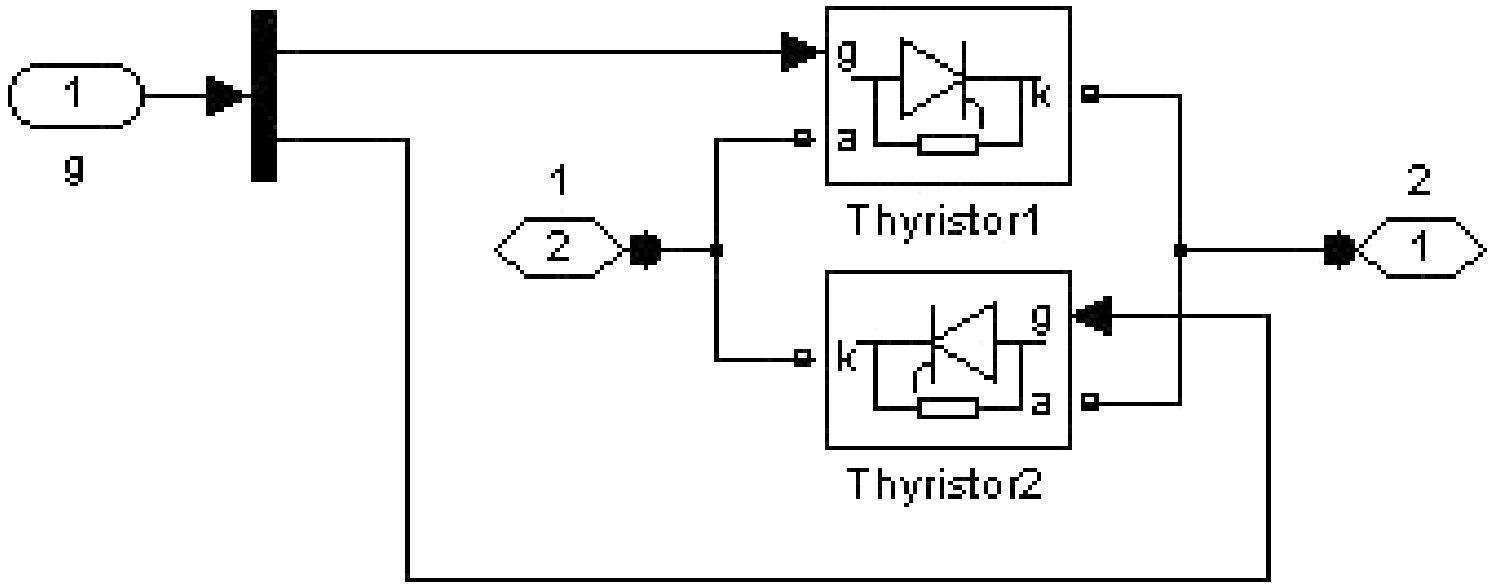


Рисунок 3.3 - Внутрішня схема блоку Thyristors voltage converter для однієї фази

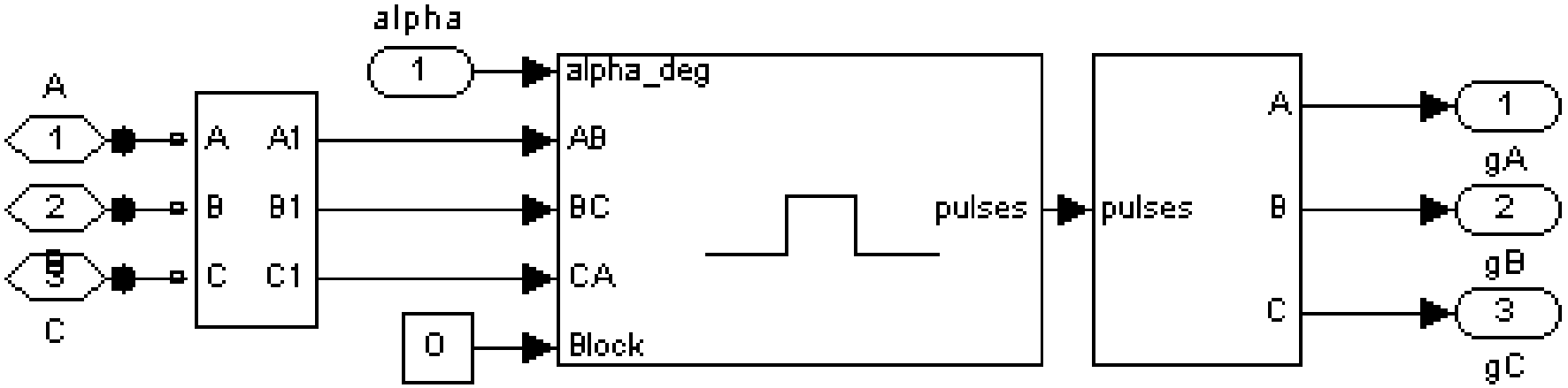


Рисунок 3.3 - Внутрішня схема блоку формування імпульсів керування Pulse-phase control system

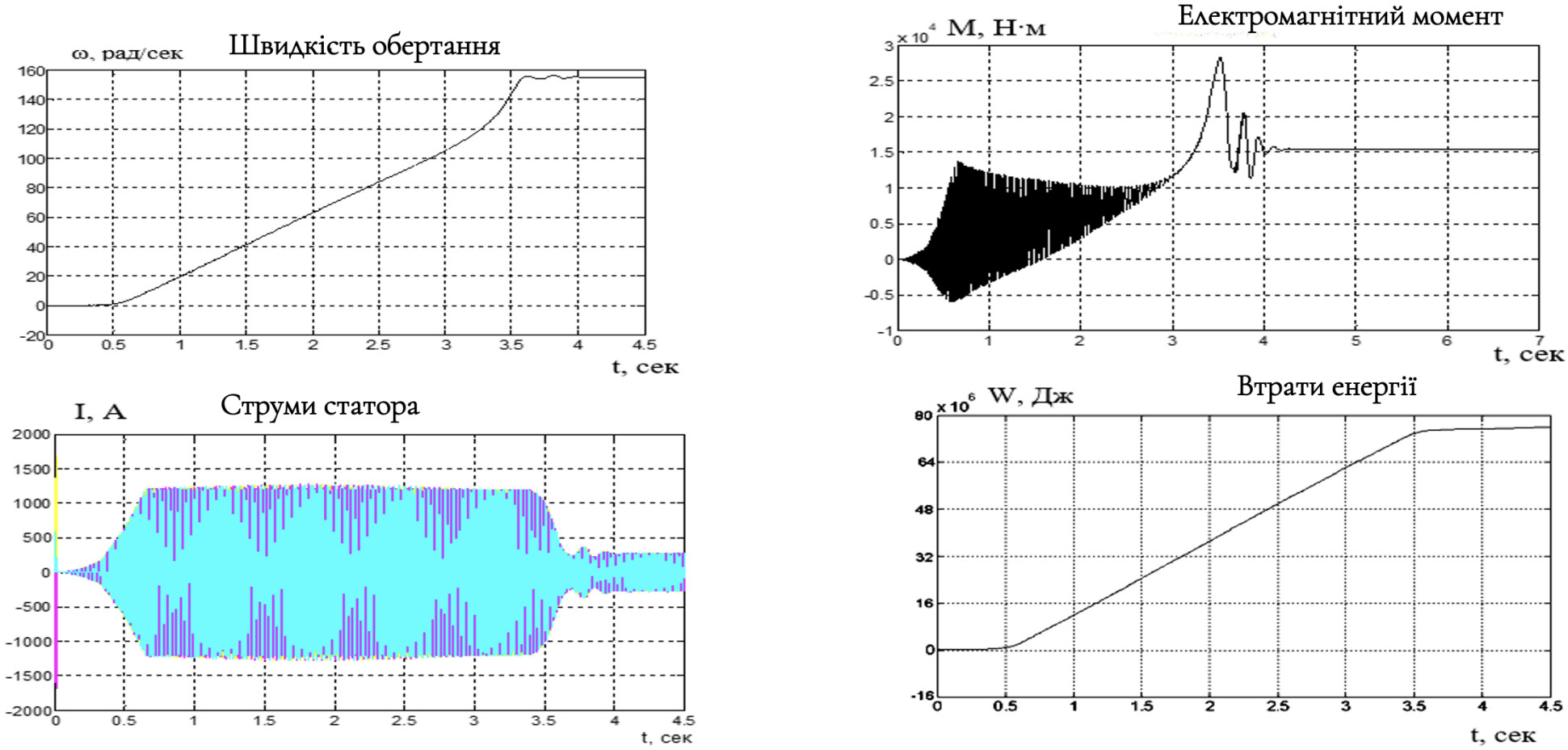


Рисунок 3.4 – Результати моделювання пуску АД від ТПН

3.2. Імітаційна модель пуску насосного агрегату з використанням перетворювача частоти

Електрична схема ПЧ представлена містить:

- струмообмежуючий реактор (Lo);
- випрямляч;
- обмежник перенапруг на вході в випрямляч (RCb);
- дроссель, що згладжує (Lj);
- обмежники перенапруг ланки постійного струму (RCd);
- автономний інвертор;
- обмежники перенапруг на виході інвертора (RCh);

засоби комутації двигунів (ШР);

- засоби керування, регулювання, захисту, контролю та зв'язку з зовнішніми пристроями (ШУ).

Випрямляч виконаний на тиристорах по 3-фазній мостовій схемі. На вході випрямляча установлений 3-фазний струмообмежуючий реактор. Обмеження комутаційних перенапруг здійснюється вхідними RC-ланцюгами. Струмообмежуючий реактор на вході випрямляча обмежує струми короткого замикання (КЗ) при виникненні КЗ в ланцюгах ПЧ та навантаженні.

Обмежник перенапруг на вході випрямляча - обмежує перенапруги, виникаючі на вході випрямляча при обриві струму випрямляча в процесі комутацій тиристорів, а також зовнішні перенапруги до припустимого рівня. Дроссель, що згладжує пульсації вихідного струму та обмежує струми через тиристори при аварійному режимі «перекиданні» інвертора. Обмежники перенапруг ланки постійного струму обмежують перенапруги, виникаючі на реакторі, що згладжує, при різких змінах струму, до припустимого рівня. Інвертор - перетворює згладжений струм випрямляча в 3-фазний змінний струм частоти 0...50 Гц. Обмежники перенапруг на виході інвертора - обмежують комутаційні перенапруги та знижують швидкість їх наростання на виході інвертора, викликані комутацією струму в двигуні.

Для виконання порівняльного аналізу перехідних процесів в АД при живленні від ПЧ розроблена в пакеті програм MATLAB імітаційна модель пуску насосних агрегатів від ідеального ПЧ, представлена на рис. 3.5.

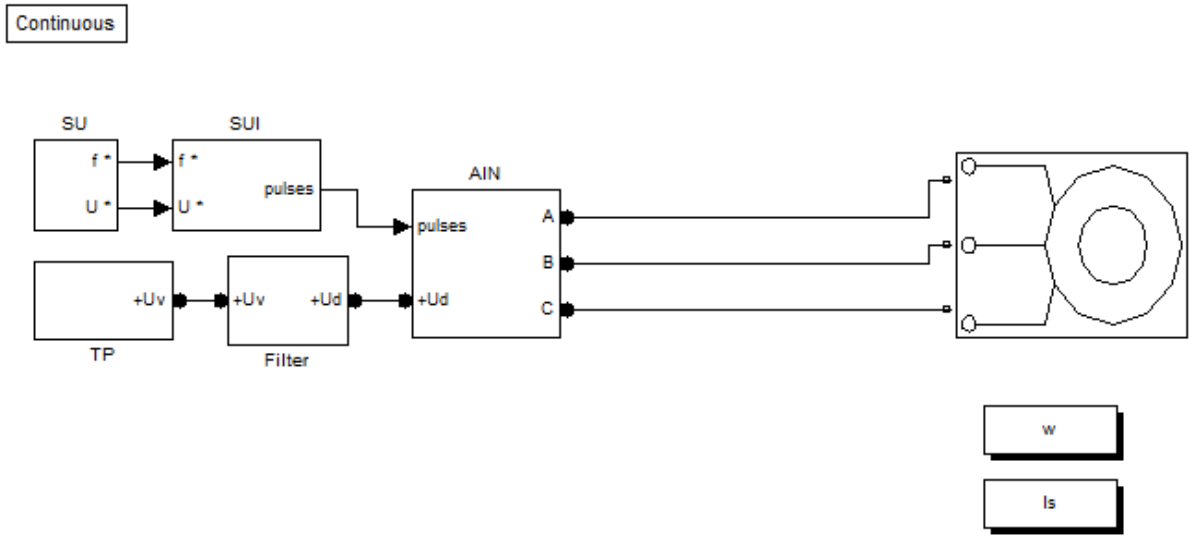


Рисунок 3.5 – Блок-схема імітаційної моделі пуску насосного агрегату з використанням перетворювача частоти

Ця схема містить:

SU – система керування;

SUI – система формування імпульсів керування;

ТР – тиристорний випрямляч;

AIN – інвертор;

W и I_S – вимірювальні блоки.

На даній моделі проведені розрахунки електромеханічних процесів пуску насосного агрегату з електричним двигуном типу ДАЗ 14 79-4МУХЛ4 потужністю 2200 кВт, напругою 6 кВ з використанням ПЧ, результати яких приведені на рис. 3.6

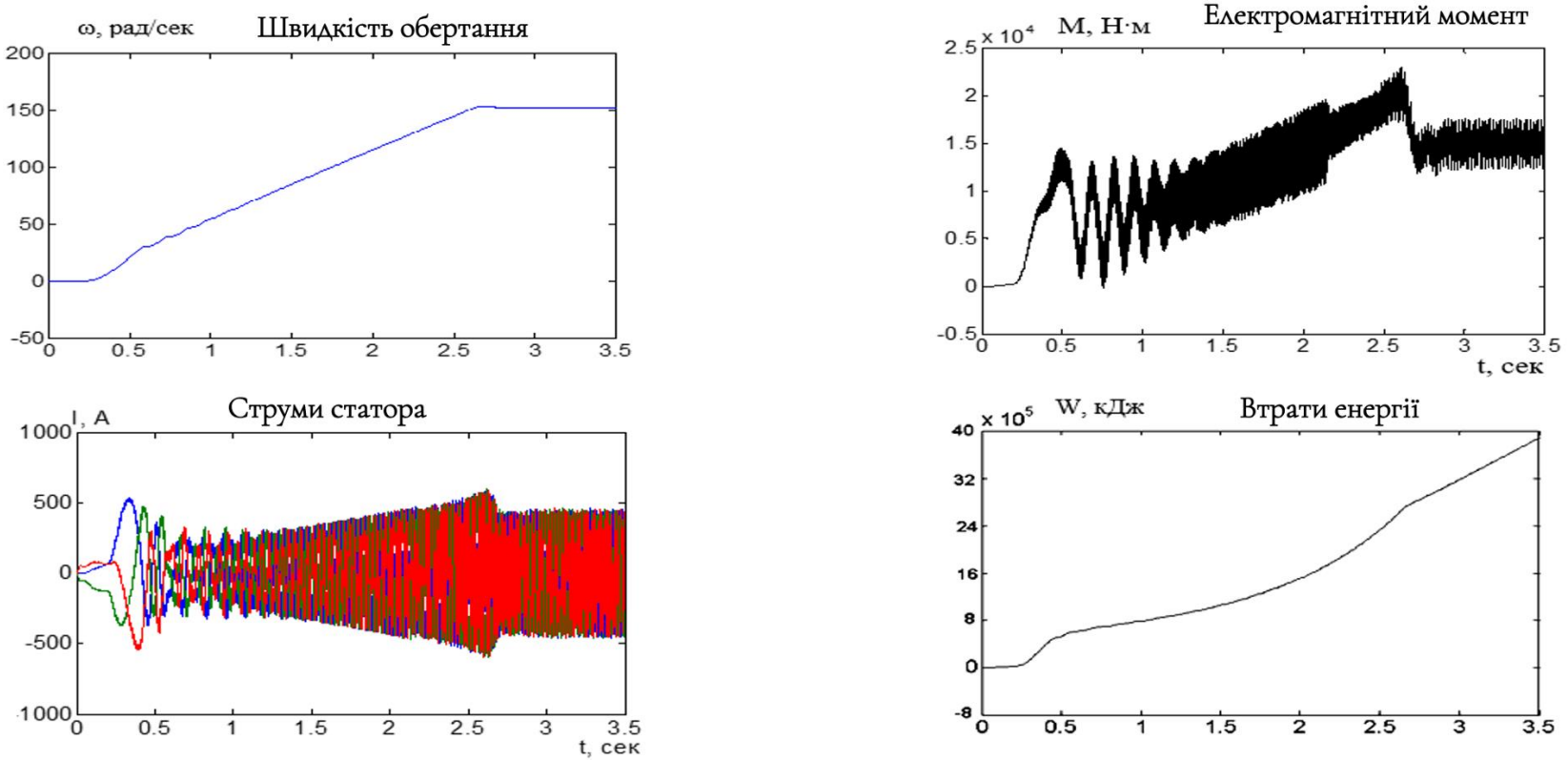


Рисунок 3.6 – Результати моделювання пуску АД від ПЧ

З обчислених на імітаційних моделях електромагнітних процесів для мережних фазних струмів двигуна типу ДАЗ 14 79-4МУХЛ4 розраховані втрати енергії W в міді статорних и роторних обмоток двигуна при різних засобах пуску (від мережі, від ТПН або від ПЧ), які приведені в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Втрати енергії в двигуні типу ДАЗ 14 79-4МУХЛ4 потужністю 2200 кВт при різних засобах пуску.

Засіб пуску	Прямий від мережі	Від ТПН	Від перетворювача частоти з часом пуску, рівним $T_{n.}$, сек								
			1,14	1,65	2,18	2,58	2,67	2,73	2,78	3,18	3,68
Втрати *W*, кДж	3680	7520	3520	2832	2784	2752	2720	2744	2744	2768	2832

При цьому для визначення втрат енергії в АД з урахуванням фактичних несинусоїдальних форм струму, який відповідає живленню від ТПН та ПЧ, розрахунки втрат потужності та енергії в двигуні вироблялися з використанням метода скалярних векторів [19]. При даному методі трифазні поточні (миттєві) значення мережних напруг $U_{\phi A}$, $U_{\phi B}$, $U_{\phi C}$ та статорних струмів I_{sA}, I_{sB}, I_{sC} двигуна утворюють відповідні узагальнені вектора мережних напруг $\bar{U}_{\phi}$ та статорного струму $\bar{I}_s$ АД:

$$\left.\begin{aligned} \bar{U}_{\phi} &= U_{\phi A} + aU_{\phi B} + a^2 U_{\phi C} \\ \bar{I}_s &= I_{sA} + aI_{sB} + a^2 I_{sC} \end{aligned}\right\} \qquad (3.1)$$

де $a=e^{j2\pi/3}$ – поворотний множник;

$j=\sqrt{-1}$ – мнима одиниця.

Узагальнені вектори $\bar{U}_{\phi}$ та $\bar{I}_s$ можуть бути задані через їх ортогональні проєкції $U_{\phi\alpha}$, $U_{\phi\beta}$ і $I_{s\alpha}$, $I_{s\beta}$ на осі нерухомої ортогональної координатної системи «α-β» (орієнтований віссю «α» по геометричній осі статорної обмотки фази А двигуна) [19]:

$$\left.\begin{aligned}\overline{U}_{\phi} &= U_{\phi\alpha} + jU_{\phi\beta} \\ \overline{I}_{s\alpha} &= I_{s\alpha} + jI_{s\beta}\end{aligned}\right\} \tag{3.2}$$

Указані ортогональні проекції узагальнених векторів визначаються з співвідношень [19]:

$$\left.\begin{aligned}U_{\phi\alpha} &= U_{\phi\alpha} \\ I_{s\alpha} &= I_{s\alpha}\end{aligned}\right., \qquad \left.\begin{aligned}I_{\phi\beta} &= \frac{(U_{\phi\beta} - U_{\phi C})}{\sqrt{3}} \\ I_{s\beta} &= \frac{(I_{s\beta} - I_{sC})}{\sqrt{3}}\end{aligned}\right\} \tag{3.3}$$

Використовуючи метод узагальнених векторів, знайдемо поточне (миттєве) значення втрат потужності в активних опорах статорної та роторної обмоток АД у вигляді [15]:

$$\begin{aligned}\Delta\underline{P} &= \frac{2}{3}\mathrm{Re}\left[(R_1 + \kappa^2 R_2)\overline{I}_s \cdot \hat{\overline{I}}_s)\right] = \\ &= \frac{2}{3}(R_1 + \kappa^2 R_2)\,\mathrm{Re}\left[({I_{s\alpha}}^2 + {I_{s\beta}}^2)(I_{s\alpha} + jI_{s\beta})\right] = \\ &= \frac{2}{3}(R_1 + \kappa^2 R_2)\,\mathrm{Re}\left[({I_{s\alpha}}^2 + {I_{s\beta}}^2) + j(I_{s\alpha}I_{s\beta} - I_{s\alpha}I_{s\beta})\right] = \\ &= \frac{2}{3}(R_1 + \kappa^2 R_2){I_s}^2\end{aligned} \tag{3.4}$$

де *Re* – математична операція виділення дійсної частини числа;

R_1 и R_2 – активні опори відповідно статорної і роторної обмоток двигуна;

$$\hat{\overline{I}} = I_{s\alpha} - jI_{s\beta} \tag{3.5}$$

- сполучене значення узагальненого вектора статорного струму АД;

$$\kappa = L_m/(L_m + L_{\tau v}) \tag{3.6}$$

– коефіцієнт зв'язку ротора, який обчислюється через параметри «Т» - образної схеми заміщення АД; індуктивність намагнічування L_m та індуктивність розсіювання ротора;

$$I_s = \sqrt{I_{sa}{}^2 - jI_{s\beta}{}^2} \tag{3.7}$$

– модуль узагальненого вектора статорного струму АД.

Виходячи з (3.4), визначаються втрати енергії при пуску АД в вигляді:

$$W = \int_0^{T_n} \Delta P \cdot dt = \frac{3}{2}(R_1 + \kappa^2 R_2) \int_0^{T_n} I_s^2(t) \cdot dt \tag{3.8}$$

де – T_n – час пуску (рівний часу зміни швидкості з нульового значення до сталої швидкості, рівної її номінальному значенню).

Наведені в табл. 3.1 значення пускових втрат енергії розглянутих при прямому пуску від мережі та при пуску від ТПН – з співвідношення (3.8), а при пуску від ПЧ – за допомогою імітаційної моделі високовольтного частотно – регульованого асинхронного електропривода, описаної в [20].

По результатам розрахунків для пуску від ПЧ побудована залежність втрат енергії від часу розгону двигуна, котра показана на рис. 3.7.

Виявлено, що: по-перше, з розглянутих видів пуску найменшими втратами енергії характеризується пуск від ПЧ; по-друге, при пуску від ПЧ існує явно виражений екстремум – мінімум втрат енергії при пуску, відповідний оптимальному часу розгону $T_{п.}$= 2,67 сек.

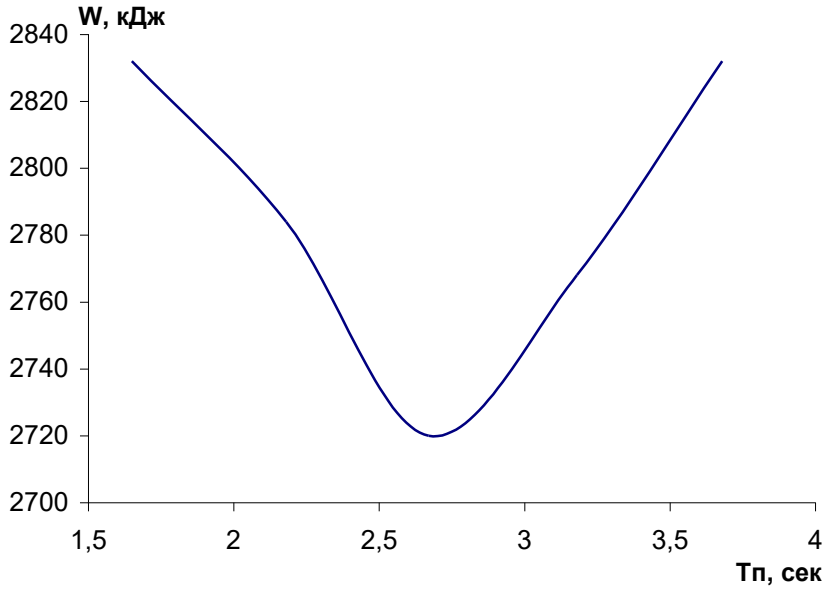


Рисунок 3.7 – Залежність втрат енергії від часу розгону двигуна типу ДАЗ 14 79-4МУХЛ4 потужністю 2200 кВт

3.3 Розрахунок оптимального по мінімуму втрат електроенергії часу частотного пуску асинхронного двигуна

Сучасні частотно- регульовані асинхронні ЕП оснащені задатчиком інтенсивності, що дозволяє установлювати бажане (задане) значення часу пуску (і гальмування). З урахуванням відзначеного в п. 3.2 наявності оптимального часу пуску насосного агрегату з асинхронним двигуном (який живлеться від перетворювача частоти), яке забезпечує мінімальне значення втрат енергії в двигуні при пуску, знаходження даного значення часу пуску затребувано практикою і дозволяє забезпечити додаткове енергозбереження на насосних станціях.

При розглянутому лінійному пуску від задатчика інтенсивності, як відомо, динамічний момент привода незмінний [17]:

$$M_{дин} = M - M_c = J\frac{d\omega}{dt} = const, \qquad (3.9)$$

де M – електромагнітний момент двигуна;

M_c – момент опору насоса, приведений до валу двигуна;

J – момент інерції привода, приведений до валу двигуна;

ω – значення кутової швидкості обертання валу ротора двигуна.

Для розглядаємого варіанта насосних агрегатів, працюючих в зрошувальних системах, момент опору з (M_c) перетворюється з урахуванням M_{co}=0 до вигляду:

$$M_c = M_н(\omega/\omega_н)^2, \qquad (3.10)$$

де $M_н$ и $\omega_н$ – номінальне значення відповідно електромагнітного моменту і швидкості двигуна відповідно.

З співвідношення (3.9) знайдемо при лінійній зміні швидкості двигуна час його пуску до сталої (номінальної) швидкості:

$$T_п = \int_0^{T_п} = \frac{J}{M_{дин}} \int_0^{\omega_н} d\omega = \frac{J \cdot \omega_н}{M_{дин}} \qquad (3.11)$$

Для найбільше розповсюдженого способу частотного керування АД (з постійним потокосчепленням ротора) квадрат модуля узагальненого вектора статорного струма двигуна визначається з співвідношення [15]:

$$I_s^2 = I_x^2 + I_y^2 = I_x^2 + K_2^2 I_y^2 = I_x^2 + (\frac{V}{K_2})^2 = I_x^2 + (\ \frac{M_c + M_{дин}}{K_2}\ )^2 \qquad (3.12)$$

де використовуються наступні позначення:

I_x та I_y – відповідно намагнічувана та активна складова статорного струму АД (причому, при прийнятому законі частотного керування: I_x=const [15]);

$$K_2 = \kappa L m I_x = const\,, \qquad (3.13)$$

коефіцієнт пропорційності між електромагнітним моментом і активною складовою статорного струму двигуна.

Електричні втрати в двигуні з урахуванням (3.4) та (3.12) розраховуються з залежності:

$$\Delta P_{дв.е} = \frac{3}{2}(R_1 + \kappa^2 R_2) I_s^2 = \frac{3}{2}(R_1 + \kappa^2 R_2)\left[I_x^2 + \left(\frac{M_c + M_{дин}}{K_2} \right) \right] \quad (3.14)$$

При прийнятій лінійній зміні швидкості двигуна під час пуску:

$$\omega = \omega_н (\frac{t}{T_п}) \quad (3.15)$$

Співвідношення (3.10) для моменту опору перетворюється до вигляду:

$$M_c = \left(\frac{M_н}{\omega_н} \right)^2 \cdot \omega_н^2 \left(\frac{t}{T_п} \right)^2 = M_н^2 \left(\frac{t}{T_п} \right)^2 \quad (3.15)$$

де $T_п$ – час пуску АД до номінальної швидкості.

Підставивши (3.15) в залежність (3.14), знайдемо втрати електроенергії при пуску АД, що приводять в рух НА, в вигляді:

$$\begin{aligned}
\Delta W &= \int_0^{T_п} \Delta P_{дв.е} \cdot dt = (R_1 + \kappa^2 R_2) \int_0^{T_п} \left[I_x^2 + (\frac{M_c + M_{дин}}{K_2})^2 \right] \cdot dt = \\
&= (R_1 + \kappa^2 R_2) \int_0^{T_п} \left[I_x^2 + \frac{\left[M_н (\frac{t}{t_п})^2 \right]^2}{K_2^{\,2}} + \frac{2 M_н (\frac{t}{T_п})^2 M_{дин}}{K_2^{\,2}} + \frac{M_{дин}^{\,2}}{K_2^{\,2}} \right] \cdot dt = \\
&= (R_1 + \kappa^2 R_2) \left[I_x^2 t + \frac{M_н^{\,2} \cdot t^5}{5 K_2^{\,2} T_п^{\,4}} + \frac{2 M_н M_{дин} t^3}{3 K_2^{\,2} T_п^{\,2}} + \frac{M_{дин}^{\,2}}{K_2^{\,2}} \right] \cdot \Big|_0^{T_п} = \\
&= (R_1 + \kappa^2 R_2) \left[I_x^2 + \frac{M_н}{5 K_2^{\,2}} + \frac{2}{3} \frac{M_н M_{дин}}{K_2^{\,2}} + \frac{M_{дин}^{\,2}}{K_2^{\,2}} \right] \cdot T_п
\end{aligned} \quad (3.16)$$

Підставивши в останній вираз значення для часу T_n з співвідношення (3.11), одержимо остаточний вираз для втрат енергії в АД при пуску:

$$\Delta W = \frac{J\omega_н(R_1 + \kappa^2 R_2)}{M_{дин}}\left[I_x^2 + \frac{M_н^{\,2}}{5K_2^2} + \frac{2}{3}\frac{M_н M_{дин}}{K_2^2} + \frac{M_{дин}^{\,2}}{K_2^2} \right] \qquad (3.17)$$

Для знаходження екстремума зазначених втрат енергії ΔW візьмемо від співвідношення (3.16) похідну по динамічному моменту $M_{дин}$ і дорівняємо її нулю:

$$\frac{d\Delta W}{dM_{дин}} = 0 \qquad (3.18)$$

Останній вираз з урахуванням (3.17) приведемо до спрощеного вигляду:

$$\frac{d}{M_{дин}}\left[(I_x^2 + \frac{M_н^{\,2}}{5K_2^2}) \cdot \frac{1}{M_{дин}} + \frac{2}{3}\frac{M_н}{K_2^2} + \frac{M_{дин}}{K_2^2} \right] = 0\,. \qquad (3.19)$$

Узявши похідну, преутворивши співвідношення (3.19) до вигляду:

$$-\frac{1}{M_{дин.о}^{\,2}}(I_x^2 + \frac{M_н}{5K_2^2}) + \frac{1}{K_2^2} = 0\ , \qquad (3.20)$$

з якого визначимо оптимальне значення динамічного моменту $M_{дин.}$ (відповідне оптимальному по мінімумові втрат енергії пуску АД від ПЧ):

$$M_{дин.о} = \sqrt{K_2^2 I_x^2 + \frac{M_н^{\,2}}{5}} = M_н\sqrt{\frac{1}{5} + (\frac{I_x}{I_{уп}})^2} \qquad (3.21)$$

де $I_{уп} = M_н/K_2$ – активна складова статорного струму АД, відповідна створенню в ньому номінального значення електромагнітного моменту $M_н$ (при

номінальному потокозчепленні ротора). На практиці відношення ($I_х/I_{уп}$) складає для АД від 0,25 до 0,5 [15].

Підставивши в (3.11) значення для динамічного моменту з (3.21), визначимо шукане значення оптимального часу пуску $T_{по}$ (що забезпечує мінімізацію втрат енергії при частотному пуску АД, що приводить в рух НА):

$$T_{по} = \frac{J\omega_н}{M_{дин.о}} = \frac{J\omega_н}{M_н\sqrt{\frac{1}{5} + \left(\frac{I_х}{I_{уп}}\right)^2}}. \qquad (3.22)$$

3.4. Розрахунок техніко-економічних показників від упровадження пускових пристроїв для насосних агрегатів зрошувальних систем

ГНС виконує перекачування води в поливний сезон (весна - літо -осінь) з річки Південний Буг в магістральний канал зрошувальної системи на висоту 104 м, звідки вода поступає як на полив, так і в накопичувальні водосховища для подальшого використання. На ГНС експлуатуються чотири насосні агрегати (НА) великої потужності. Режими роботи НА обумовлюються об'ємами води, що перекачується для наповнення магістрального каналу та подачі води в водосховища. При цьому об'єм води, що розбирається з водосховищ на потреби зрошування та промисловості значно змінюється у перебігу доби, місяця, сезону. Електродвигуни НА мають ліміт на кількість пусків за час експлуатації. Оплата за спожиту електроенергію НА проводиться за одноставковим тарифом. Витрати на оплату споживаної електроенергії в собівартості затрат на перекачування води складають переважну частину.

Застосування пристроїв плавного пуску допоможе подовжити термін служби як двигунів так і виконавчих механізмів насосів, оскільки не дозволяє пусковому струму зрости миттєво від нульового значення до семикратного робочого, що

зменшує їх термічний вплив (подовження терміну служби ізоляції) та динамічний вплив (запобігання руйнуванню муфти (якщо наявна), підшипників тощо.

В перший період (травень) треба перекачавати об'єм води $Q_{тр}$=32,29 тис.м^3 за добу. Визначимо необхідну продуктивність НА за формулою:

$$q' = Q_{тр} / (t_н /3600), \quad (3.23)$$

Звідки одержимо:

$$q' = 32290 / (24 \cdot 3600) = 0{,}37 \text{ м}^3/\text{с},$$

$$q' < q_1.$$

В разі перекачування води одним НА №1 з продуктивністю q_1=**3,07**м^3/с при потенційному переході на тризонний тариф в період провалу споживання електроенергії вночі, відведений час t_1 становитиме:

$$t_1 = Q_{тр} / q_1 \cdot 3600, \quad (3.24)$$

$$t_1 = 32{,}29 \cdot 10^3 / 3{,}07 \cdot 3600 = 2{,}92 \text{ год.}$$

В другий період (червень) треба перекачувати води $Q_{чер}$ = 90,66 тис.м^3 за добу. Визначимо необхідну середню продуктивність НА за формулою (3.23):

$$q' = 90660 /(24 \cdot 3600) = 1{,}049 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Перекачування води у червні в разі переходу на тризонний тариф буде здійснюватися вночі за допомогою НА №1 з продуктивністю q_1=3**,07** м^3/с протягом 7 годин та НА №3 з продуктивністю q_3 = 1,83 м^3/с за проміжок часу t_3:

$$t_3 = (Q_{чер} - q_1 \cdot \mathbf{7} \cdot 3600) / q_3 \cdot 3600, \quad (3.25)$$

$$t_3 = (90{,}66 \cdot 10^3 - 3{,}07 \cdot 7 \cdot 3600)/1{,}83 \cdot 3600 = 2{,}02 \text{ год.}$$

В третій період (липень) треба перекачувати води $Q_{лип}$ = 51,71 тис.м^3 за добу. Визначимо необхідну середню продуктивність НА за формулою (3.1):

$$q' = 51710 / (24 \cdot 3600) = 0{,}6 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Перекачування води у липні буде здійснюватися вночі в разі переходу на тризонний тариф за допомогою НА №1 з продуктивністю q_1=3,07 м^3/с за час дії нічного тарифу за проміжок часу t_1:

$$t_1 = Q_{лип} / q_1 \cdot 3600, \quad (3.26)$$

$$t_1 = 51{,}71 \cdot 10^3 / 3{,}07 \cdot 3600 = 4{,}68 \text{ год.}$$

В четвертий період (серпень) треба перекачувати води $Q_{сер}$ =112,82 тис.м^3 за добу. Визначимо необхідну середню продуктивність НА за формулою (3.23):

$$q' = 112820 / (24 \cdot 3600) = 1{,}31 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Перекачування води у серпні буде здійснюватися вночі в разі переходу на тризонний тариф за допомогою НА №1 з продуктивністю q_1=3**,07** м^3/с протягом 7 годин та НА №3 з продуктивністю q_3=1,83 м^3/с за час дії нічного тарифу за проміжок часу t_3:

$$t_3 = (Q_{сер} - q_1 \cdot 7 \cdot 3600) / q_3 \cdot 3600, \quad (3.27)$$

$$t_3 = (112{,}82 \cdot 10^3 - 3{,}07 \cdot 7 \cdot 3600)/1{,}83 \cdot 3600 = 5{,}39 \text{ год.}:$$

В п’ятий період (вересень) треба перекачувати води $Q_{вер}$ =47,88 тис.м^3 за добу. Визначимо необхідну середню продуктивність НА за формулою (3.1):

$$q' = 47880 / (24 \cdot 3600) = 0{,}55 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Перекачування води у вересні буде здійснюватися вночі в разі переходу на тризонний тариф за допомогою НА №1 з продуктивністю q_1=3,07м^3/с за час дії нічного тарифу за проміжок часу t_1:

$$t_1 = Q_{вер} / q_1 \cdot 3600, \quad (3.28)$$

$$t_1 = 47{,}88 \cdot 10^3 / 3{,}07 \cdot 3600 = 4{,}33 \text{ год}.$$

Оцінка економічного ефекту полягає в тім, що у якості вигоди приймається зниження витрат на оплату споживаної електроенергії за рахунок застосування ПП, що дасть можливість застосування частого запуску НА без побоювання пошкодження електродвигунів, тобто основне перекачування води можливо здійснювати вночі (перспективний сценарій), або при необхідності в години напівпік (а це 11 годин за добу), або регулювання подачі води за рахунок регулювання швидкості обертання НА при живленні його двигуна від перетворювача частоти (ПЧ). Капітальні витрати на ремонт НА, пов'язані з частими пусками не враховуються. Упровадження ПП в обов'язковому порядку збільшить термін служби НА в середньому в 1,5 рази, що може бути враховано відповідною зміною норми амортизаційних відрахувань. Різниця в експлуатаційних витратах по проєкту визначиться вартістю зекономленої електроенергії, амортизаційними відрахуваннями на нове обладнання і зміною амортизаційних відрахувань у зв'язку з підвищенням надійності і терміну служби двигуна НА.

Для порівняння з базовим варіантом візьмемо найбільш економічно доцільний варіант роботи насосних агрегатів з ППП також в години нічної тарифної зони на перспективу.

Проте, незважаючи на це, нині облік електроенергії ведеться за одноставковим

тарифом, тому економії можна буде досягти регулюванням продуктивності НА залежно від потреб або на базі ППП вмикати їх лише тоді, коли необхідно без цілодобової роботи на резервні водосховища або заміною потужного обладнання на слабше, яке працюватиме цілодобово (не розглядається). Насправді, економія буде переважно пов'язана з меншими витратами на обслуговування та ремонт обладнання, а також зменшенням амортизаційних відрахувань.

Приймемо, що припуску от ТПН та ПЧ вмикаються такі ж НА і а такі ж проміжки часу, що й при раніше розглянутому прямому пуску – нічний час. Приймаючи до уваги тривалість режиму роботи ввімкнених насосних агрегатів (тобто не враховуючи втрати енергії в пускових режимах), далі розрахуємо фактичну споживану електроенергію и плату за неї.

В перший період (травень) треба перекачувати води 32,29 тис.м^3 за добу. Перекачування води буде здійснюється одним НА №1 з продуктивністю 3,07 м^3/с протягом 2,92 години, спожита при цьому активна електроенергія складе:

$$W_{mp} = P_1 \cdot \eta_1 \cdot T \cdot t_1, \tag{3.29}$$

де P_1 = 3200 кВт – номінальна потужність НА №1;

η_1 = 0,952 – ККД двигуна НА №1;

T = 31 день – кількість робочих днів місяця;

t_1 = 2,92 год – кількість годин роботи НА №1 за нічним тарифом.

Плата за спожиту електроенергію у травні місяці складає:

$$П_{mp} = C \cdot W_{mp}, \tag{3.30}$$

Звідки одержимо:

$$W_{mp} = 3200 \cdot 0{,}952 \cdot 31 \cdot 2{,}92 = 275760{,}128 \text{ кВт.}$$

$$П_{mp} = 275760{,}128 \cdot 6 = 1654560{,}77 \text{ грн.}$$

В другий період (червень) треба перекачувати води 90,66 тис.м^3 за добу. Перекачування води у червні буде здійснюватися НА №3 з продуктивністю 1,83 м^3/с протягом 2,02 годин та НА №1 з продуктивністю 3,07 м^3/с протягом 7 годин. Спожита при цьому активна електроенергія складє:

$$W_{чер} = (P_1 \cdot \eta_1 \cdot T \cdot t_1) + (P_3 \cdot \eta_3 \cdot T \cdot t_3). \quad (3.31)$$

де P_3 = 2200 кВт – номінальна потужність НА №1;

η_3 = 0,962 – ККД двигуна НА№3;

T = 30 днів – кількість робочих днів місяця;

t_1 = 7 год – кількість годин роботи НА №1 за нічним тарифом;

t_3 = 2,02 год – кількість годин роботи НА №3 за нічним тарифом.

Плата за спожиту електроенергію у червні місяці складає:

$$П_{чер} = C \cdot W_{чер}\,. \quad (3.32)$$

Звідки одержимо:

$$W_{тр} = (3200 \cdot 0{,}952 \cdot 31 \cdot 7) + (2200 \cdot 0{,}962 \cdot 31 \cdot 2{,}02) = 793597{,}768 \text{ кВт.}$$

$$П_{чер} = 793597{,}768 \cdot 6 = 4761586{,}61 \text{ грн.}$$

В третій період (липень) треба перекачувати води 51,71 тис.м^3 за добу. Перекачування води у липні буде здійснюється НА №1 з продуктивністю 3,07 м^3/с протягом 4,68 години, спожита при цьому активна електроенергія складе:

$$W_{тр} = 3200 \cdot 0{,}952 \cdot 31 \cdot 4{,}68 = 441971{,}712 \text{ кВт.}$$

Плата за спожиту електроенергію у липні складає:

$$П_{лип} = 441971,712 \cdot 6 = 2651830,27 \text{ грн.}$$

В четвертий період (серпень) треба перекачувати води 112,82 тис.м^3 за добу. Перекачування води у серпні буде здійснюватися НА №3 з продуктивністю 1,83 м^3/с протягом 5,39 годин та НА №1 з продуктивністю 3,07 м^3/с протягом 7 годин, спожита при цьому активна електроенергія складе:

$$W_{сер} = (3200 \cdot 0,952 \cdot 31 \cdot 7) + (2200 \cdot 0,962 \cdot 31 \cdot 5,39) = 1014698,076 \text{ кВт.}$$

Плата за спожиту електроенергію у серпні складає:

$$П_{сер} = 1014698,076 \cdot 6 = 6088188,46 \text{ грн.}$$

В п’ятий період (вересень місяць) треба перекачувати води 47,88 тис.м^3 за добу. Перекачування води у вересні буде здійснюватися НА №1 з продуктивністю 3**,07** м^3/с протягом 4,33 годин, спожита при цьому активна електроенергія складе:

$$W_{вер} = 3200 \cdot 0,952 \cdot 30 \cdot 4,33 = 395727,36 \text{ кВт.}$$

Плата за спожиту електроенергію у вересні складає:

$$П_{вер} = 395727,36 \cdot 6 = 2374364,16 \text{ грн.}$$

Сумарна плата за електроенергію за один поливний сезон зрошувальної системи з використанням пристроїв плавного пуску ППП (ТПН, ПЧ) розраховується по формулі (2.7) і складає:

$П_{пп}$ = 2651830,27 + 2374364,16 + 6088188,46 + 4761586,61 + 1654560,77 = 17530530,27 грн

Розрахункова економія оплати за електроенергію при використанні ПП в нічний час складе у зрівнянні з базовим варіантом визначається у вигляді:

$$ΔП = П_б – П_{пп}, \quad (3.33)$$

$$ΔП = 29273626,72 - 17530530,27 = 11743096,45 \text{ грн.}$$

Розрахуємо термін окупності витрат. Витрати на реконструкцію ГНС складають:

- вартість ТПН (1 варіант)

$$З_1 = 3000000,00 \text{ грн.}$$

- вартість ПЧ (2 варіант)

$$З_2 = 5600000,00 \text{ грн.}$$

- вартість вакуумного високовольтного вимикача

$$З_3 = 100000,00 \text{ грн.}$$

- витрати на проектно-дослідницькі роботи

$$З_4 = 216000 \text{ грн.}$$

- витрати на будівельно-монтажні роботи

$$З_5 = 294000,00 \text{ грн.}$$

- витрати на пусконалагоджувальні роботи

$$З_6 = 280000,00 \text{ грн.}$$

- інші витрати

$$З_7 = 15\ \% (З_4 + З_5 + З_6) = 118500,00 \text{ грн.}$$

Витрати на реконструкцію ГНС по 1 варіанту складають:

$$З'_{Σ1} = З_1 + З_2 + З_3 + З_4 + З_5 + З_6 + З_7 = 1926795 \text{ грн.}$$

з урахуванням ПДВ:

$$З_{\Sigma 1} = З'_{\Sigma 1} \cdot 1{,}2 = 1926795 \cdot 1{,}2 = 2312154 \text{ грн.}$$

Витрати на реконструкцію ГНС по 2 варіанту складають:

$$З'_{\Sigma 2} = З_1 + З_2 + З_3 + З_4 + З_5 + З_6 + З_7 = 3226795 \text{ грн.}$$

з урахуванням ПДВ:

$$З_{\Sigma 2} = З_{\Sigma 2} \cdot 1{,}2 = 2081445 \cdot 1{,}2 = 3872154 \text{ грн.}$$

Економічний ефект по запропонованим варіантам визначається вартістю зекономленої електроенергії, амортизаційними відрахуваннями на нове обладнання і зміною амортизаційних відрахувань у зв'язку з підвищенням надійності і терміну служби двигуна НА і розраховується у вигляді:

$$E = \Delta П - З_{\Sigma} \cdot (C_{аб} - C_{ан}), \qquad (3.34)$$

де $C_{аб}$ - норматив амортизаційних відрахувань по базовому варіанту – 0,09;

$C_{ан}$ - норматив амортизаційних відрахувань по новому варіанту – 0,06.

Економічний ефект по 1 варіанту складає:

$$E_1 = 11743096{,}45 - 2312154 \cdot (0{,}09 - 0{,}06) = 11673731{,}83 \text{ грн.}$$

Економічний ефект по 2 варіанту складає:

$$E_2 = 11743096{,}45 - 3872154 \cdot (0{,}09 - 0{,}06) = 11626931{,}83 \text{ грн.}$$

Термін окупності витрат на впровадження ПП на ГНС:

$$T_{ОК} = З_{\Sigma} \cdot 5 / E, \qquad (3.35)$$

де 5 – кількість місяців у поливному сезоні.

Термін окупності витрат на впровадження ПП на ГНС по 1 варіанту (з пуском НА від ТПН) складає:

$$T_{ок} = 2312154 * 5 / 11673731,83 = 0,99 \text{ міс. поливн. сезону.}$$

Термін окупності витрат на впровадження ПП на ГНС по 2 варіанту (з пуском від ПЧ) складає:

$$T_{ок} = 3872154 \cdot 5 / 11\,626\,931,83 = 0,994 \text{ міс. поливн. сезону.}$$

Розраховані основні техніко-економічні показники від впровадження розглянутих пускових пристроїв на ГНС винесені у табл. 3.2.

Таблиця 3.2 - Основні техніко-економічні показники від впровадження розглянутих пускових пристроїв на ГНС.

№ п/п	Параметр	1 варіант (з ТПН)	2 варіант (з ПЧ)
1.	Витрати на реконструкцію ГНС з урахуванням ПДВ, грн.	2312154	3872154
2.	Економія витрат на оплату електроенергії, грн.	11743096,45	
3.	Економічний ефект, грн.	11673731,83	1162693,83
4.	Термін окупності, міс. полів. сезону	0,99	0,994

Термін окупності затрат на впровадження ППП на ГНС складає від 0,99 (для ТПН) до 0,994 (для ПЧ) місяців поливного сезону.

ВИСНОВКИ

1. Дослідження сучасного стану та перспектив розвитку зрошувальних комплексів показало, що оптимізація режимів роботи їхніх гідросилових установок найефективніше досягається шляхом впровадження систем керованого (плавного) пуску приводних електродвигунів змінного струму.

2. Шляхом порівняльного аналізу сучасних методів беззударного пуску з'ясовано, що найкращі техніко-економічні показники забезпечують системи регулювання на базі тиристорних перетворювачів напруги (ТПН) та напівпровідникових перетворювачів частоти (ПЧ).

3. Створено комплекс комп'ютерних імітаційних моделей, які дозволяють детально відтворити динаміку прямого пуску від електромережі, а також керованого пуску асинхронних двигунів за допомогою ТПН і ПЧ. Моделі забезпечують високу точність оцінювання параметрів електромагнітних процесів та динамічних втрат потужності в приводі.

4. Доведено існування оптимальної тривалості частотного пуску, за якої сумарні втрати електричної енергії в обмотках двигуна під час розгону є мінімальними. Виведено математичне співвідношення для визначення цієї оптимальної тривалості та відповідного обсягу пускових енерговтрат з урахуванням паспортних параметрів конкретної електричної машини.

5. Виконано порівняльний кількісний аналіз техніко-економічної доцільності інтеграції частотно-регульованих приводів та пристроїв м'якого пуску на основі ТПН в інфраструктуру меліоративних об'єктів.

6. Обґрунтовано, що для умов експлуатації наявних зрошувальних систем найбільш раціональним з енергетичної та фінансової точок зору є впровадження систем пуску на базі ТПН, оскільки цей варіант характеризується швидким терміном повернення інвестицій (близько одного року).

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. ДСТУ ISO 50001:2020. Системи енергетичного менеджменту. Вимоги та настанови щодо застосування. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2020. 28 с.

2. ДСТУ IEC 60034-2-1:2017. Машини електричні обертові. Визначення втрат та коефіцієнта корисної дії. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2017. 36 с.

3. Сінчук О. М. Електропривод і автоматизація промислових установок : підручник. Дніпро : НМетАУ, 2016. 412 с.

4. Бойко В. С., Жуйков В. Я. Енергоефективні електроприводи. Київ : ІЕЕ НАН України, 2018. 268 с.

5. Копилов І. П. Електропривод : підручник для ЗВО. Київ : Юрайт, 2017. 463 с.

6. Антонюк В. П., Ковальчук Л. І. Аналіз втрат потужності в асинхронних електродвигунах // Вісник НТУ «ХПІ». 2018. № 5. С. 21–27.

7. Бабенко О. М., Руденко С. С. Шляхи зниження енергоспоживання насосних агрегатів // Енергетика та електрифікація. 2019. № 3. С. 41–47.

8. IEC 61800-9-2:2017. Adjustable speed electrical power drive systems Energy efficiency. Geneva : IEC, 2017. 84 p.

9. Плахотнік О. В. Автоматизований електропривод насосних установок. Київ : Кондор, 2018. 256 с.

10. Левченко В. П., Савченко М. І. Асинхронні двигуни в насосних системах. Київ : Техніка, 2015. 304 с.

11. Соколов В. М. Електричні машини та втрати енергії. Харків : Факт, 2016. — 288 с.

12. Ковальчук О. А. Оптимізація режимів роботи насосних станцій з електроприводом // Промислова електроенергетика. 2020. № 2. С. 52–58.

13. Sheinbaum C., Ruiz B. Energy efficiency in pumping systems // Energy Policy. 2018. Vol. 114. P. 360–370.

14. Saidur R. Energy consumption and losses in electric motor driven systems // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2017. Vol. 73. P. 112–121.

15. Beaty H. W., Kirtley J. L. Electric motor handbook. New York : McGraw-Hill, 2019. 432 p.

16. De Almeida A., Ferreira F. Improving efficiency of electric motor systems // IEEE Industry Applications Magazine. 2016. Vol. 22, No. 5. P. 12–21.

17. Шевченко О. Л. Дослідження втрат потужності в частотно-регульованих електроприводах // Технічна електродинаміка. 2021. № 4. С. 67–73.

18. International Energy Agency. Energy efficiency of motor-driven systems. Paris : IEA, 2020. 178 p.

19. IEEE Std 3007.3-2012. Recommended practice for energy efficiency in industrial and commercial power systems. New York : IEEE, 2012. 98 p.

20. Кулик О. А. Системи електропривода насосних станцій. Львів : Львівська політехніка, 2017. 192 с.

21. Rahman M. M., Hasan M. M. Loss analysis of induction motor drives for pumping systems // Journal of Cleaner Production. 2020. Vol. 258. P. 120735.

22. Федоренко Г. А. Моделювання енергетичних процесів в електроприводах. Одеса : ОНПУ, 2019. 216 с.

23. Boldea I. Electric machines: steady state, transients, and design. 3rd ed. — Boca Raton : CRC Press, 2016. 928 p.

24. Пархоменко В. І. Енергоефективність насосних агрегатів водопостачання // Комунальне господарство міст. 2018. № 142. С. 85–91.

25. European Commission. Best available techniques for energy efficiency. Brussels, 2019. 430 p.

26. Ткаченко С. Й. Методи оцінювання втрат потужності в електроприводах. Вінниця : ВНТУ, 2020. 184 с.