

Національний університет “Львівська політехніка”

На правах рукопису

УДК 621.316.11:621.67

Лисяк Владислав Георгійович

**Усталені режими електротехнічного комплексу
"електропостачальна система – помпова станція"**

05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи

Дисертація на здобуття наукового ступеня

кандидата технічних наук

Науковий керівник:

к. т. н., доц. Гоголюк П.Ф.

Львів – 2016

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	5
В С Т У П	6
РОЗДІЛ 1 СУЧАСНИЙ СТАН ВИКОНАННЯ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ КОМПЛЕКСІВ З ПОМПОВИМИ СТАНЦІЯМИ, МЕТОДИ Й ЗАСОБИ АНАЛІЗУ РЕЖИМІВ ЇХНЬОЇ РОБОТИ	14
1.1 Загальна класифікація та склад устаткування помпових станцій.....	14
1.2 Енергоощадність помпових станцій	15
1.3 Методи та засоби аналізу режимів роботи основного устаткування помпових станцій і їхніх систем електропостачання	17
1.3.1.....Гідравлічна підсистема.....	18
1.3.2.....Електроприводні турбоагрегати.....	22
1.3.3.....Керування електроприводними відцентровими помповими турбоагрегатами	28
1.3.4.....Виявлення несправностей	31
1.4 Методи та засоби аналізу режимів роботи електропостачальних систем з помповими станціями як єдиних електротехнічних комплексів	33
1.5 Висновки до розділу 1	36
РОЗДІЛ 2 КОНЦЕПТУАЛЬНІ ЗАСАДИ ФОРМУВАННЯ МОДЕЛІ ТА ЇЇ СКЛАДОВІ	37
2.1 Обґрунтування напряму та загальна методика проведення дисертаційного дослідження.....	37
2.2 Математичні моделі складових електротехнічного комплексу "електропостачальна система – помпова станція".....	41
2.2.1.....Відцентрова помпа.....	41
2.2.2.....Гідравлічна мережа.....	55
2.2.3.....Асинхронний двигун	59
2.2.4.....Синхронний двигун	64
2.2.5.....Механічний зв'язок двигуна з помпою	68
2.2.6.....Двообвитковий трансформатор.....	71

	3
2.2.7.....Перетворювач частоти й напруги.....	73
2.2.8.....Пристрій поперечної компенсації реактивної потужності.....	76
2.2.9.....Лінія електропересилання.....	79
2.2.10..Статичне навантаження.....	81
2.2.11..Електроенергетична система живлення.....	83
2.3 Керування напором та витратою агрегатів.....	84
2.3.1.....Метод розрахунку розподілу робочої рідини між помпами агрегатів, що задає система керування двигунами.....	84
2.3.2.....Математична модель гідравлічних зв'язків багатоагрегатної групи помп і гідромережі та керування розподілом робочої рідини.....	93
2.3.3.....Частотне керування двигунами помпових агрегатів.....	97
2.3.4.....Зміна напруги обвитки статора двигунів помпових агрегатів.....	107
2.3.5.....Керування асинхронними двигунами з фазним ротором.....	107
2.3.6.....Активне керування помпами агрегатів.....	107
2.3.7.....Зміна умов функціонування помпи.....	107
2.3.8.....Застосування варіаторів.....	108
2.3.9.....Комп'ютерне симулювання усталених режимів.....	108
2.4 Висновки до розділу 2.....	108
РОЗДІЛ 3 МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ УСТАЛЕНИХ РЕЖИМІВ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНОГО КОМПЛЕКСУ "ЕЛЕКТРОПОСТАЧАЛЬНА СИСТЕМА – ПОМПОВА СТАНЦІЯ".....	
3.1 Математична модель блока електроприводного відцентрового помпового турбоагрегату.....	110
3.1.1.....Блок асинхронного відцентрового помпового турбоагрегату.....	112
3.1.2.....Блок синхронного відцентрового помпового турбоагрегату.....	115
3.2 Математична модель групи блоків електроприводних відцентрових помпових турбоагрегатів зі сполученими гідротрактами.....	118
3.2.1.....Група блоків відцентрових помпових турбоагрегатів із послідовним сполученням гідротрактів помп.....	120

3.2.2.....Група блоків відцентрових помпових турбоагрегатів із паралельним сполученням гідротрактів pomp.....	121
3.3 Математична модель електропостачальної системи.....	122
3.4 Математична модель узагальненого електротехнічного комплексу "електропостачальна система – помпова станція".....	128
3.5 Пошук нульових наближень.....	132
3.6 Висновки до розділу 3.....	133
РОЗДІЛ 4 ПЕРЕВІРКА АДЕКВАТНОСТІ МОДЕЛІ ТА ЇЇ РЕАЛІЗАЦІЯ.	134
4.1 Перевірка адекватності моделі.....	134
4.2 Реалізація моделі для одиничного блока відцентрового помпового турбоагрегата.....	142
4.2.1.....Розрахунок режимів асинхронного агрегата.....	145
4.2.2.....Розрахунок режимів синхронного агрегата.....	151
4.3 Реалізація моделі для багатоагрегатного електротехнічного комплексу.....	156
4.3.1.....Розрахунок режимів з некерованими агрегатами.....	164
4.3.2.....Розрахунок режимів за умови частотного керування двигунами.....	166
4.4 Усталені режими багатоагрегатного електротехнічного комплексу.....	169
4.4.1.....Керування усталеними режимами.....	170
4.4.2.....Конфігурація електропостачальної системи.....	174
4.4.3.....Компенсування реактивної потужності.....	178
4.4.4.....Раціональна схема живлення та система автоматичного керування.....	183
4.5 Висновки до розділу 4.....	189
ВИСНОВКИ.....	190
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	192
ДОДАТОК А.....	230

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

АД – асинхронний двигун.

АСК – автоматична система керування.

а.о. – абсолютні (іменовані) одиниці.

АВПТА – асинхронний відцентровий помповий турбоагрегат.

БАВПТА – блок асинхронного відцентрового помпового турбоагрегату.

БСВПТА – блок синхронного відцентрового помпового турбоагрегату.

ВН – вища напруга.

ВП – відцентрова помпа.

ВПТА – відцентровий помповий турбоагрегат з приводом.

в.о. – відносні одиниці.

ГМ – гідравлічна мережа.

ЕЕС – електроенергетична система.

ЕГДА – електрогідродинамічна аналогія.

ЕПС – електростачальна система.

ЕТК – електротехнічний комплекс "електростачальна система – помпова станція".

ЛЕП – лінія електропересилання.

ММ – математична модель.

НН – нижча напруга.

НССР – нелінійна система скінчених рівнянь.

ПА – помповий агрегат з приводом.

ПКП – пристрій поперечної компенсації реактивної потужності.

ПС – помпова станція.

САК – система автоматичного керування.

СВПТА – синхронний відцентровий помповий турбоагрегат.

СД – синхронний двигун.

СН – статичне навантаження.

ЦМ – цифрова модель.

d-q координати – ортогональні обертові d-q координати.

ВСТУП

Однією з актуальних задач сучасної прикладної науки є підвищення ефективності функціонування, оптимізація режимів і вирішення питань енергоощадності електротехнічних комплексів і систем, зокрема електропостачальних систем помпових станцій магістральних нафтогонів і водогонів. Унаслідок широкого застосування таких систем, значного споживання ними електроенергії та наявності проблем енергоощадності в них, актуальним є розвиток нової та вдосконалення наявної наукової бази.

Рівень енергоощадності помпових станцій залежить від низки чинників, зокрема від гідравлічного навантаження самих pomp. У загальних рисах суть керування полягає у необхідності підтримання сталого напору помпи за різних значень витрати робочої рідини в залежності від певного критерію. Донедавна таке керування здійснювалось, зазвичай шляхом застосування засувки і вмиканням чи вимиканням окремих pomp. Енергетично найефективнішим є застосування частотного керування витратою помпових агрегатів, оскільки в цьому разі агрегат працює з мінімальними втратами енергії в його елементах, відсутні гідравлічні удари в гідравлічній системі.

Помпова станція є складним електротехнічним комплексом і складається з енергетично взаємопов'язаних підсистем різної фізичної природи – електромагнітних, механічних і гідравлічних. Помпові станції магістральних нафтогонів і водогонів характеризуються високою вартістю устаткування, значною потужністю одиничних агрегатів, відносною віддаленістю агрегатів від джерел живлення, що ставить особливі вимоги до ефективності електропостачання. Значна потужність одиничних агрегатів і віддаленість від джерел живлення спричиняють як взаємний вплив окремих агрегатів один на одного, так і взаємний вплив помпової станції в цілому на її електропостачальну систему. Крім того, зростання вартості енергоносіїв, а також народно-господарське значення таких об'єктів дозволяють зробити висновок про необхідність комплексного наукового підходу до вирішення цієї важливої наукової проблеми.

Актуальність теми. У більшості наявних математичних моделей електроспоживачів, які складаються з нерозривно пов'язаних між собою енергетично впливових підсистем різної фізичної природи, їх частина представлена спрощено у вигляді експериментально отриманих характеристик, апроксимованих залежностей, емпіричних формул, тощо – без відображення внутрішньої будови. Це зумовлює необхідність декомпозиції досліджуваного об'єкту на декілька підсистем і застосування різних підходів до кожної з них. Унаслідок цього з'являються труднощі системного бачення проблеми, виникає потреба залучення більшої кількості вузьких фахівців з різних галузей.

Відомо, що вибір того чи іншого методу аналізу, моделі та ступеня деталізації визначаються, зокрема колом задач, які необхідно вирішити. Моделювання перехідних процесів, що виникають під час роботи потужних електротехнічних комплексів, перш за все необхідне для дослідження стійкості, розроблення швидкодіючих автоматичних систем керування, вибору комутаційного устаткування, виявлення причин і прогнозування ушкоджень устаткування внаслідок перевантажень тощо. Аналіз експериментальних записів координат режимів помпових станцій, проведений у [16, 19, 103, 136], показав, що витрати помп досить повільно змінюються в часі (за винятком пуску, зупинки устаткування й аварійних процесів). Наприклад, за даними добового графіка споживання води у водопровідній мережі [103] найбільша швидкість наростання чи спадання споживання не перевищує 0,1% за секунду. Це обґрунтовано дозволяє виокремити такі тривалі режими помпових станцій та їхніх електропостачальних систем і розглядати їх як квазіусталені, аналіз яких вимагає створення відповідних засобів. Саме в цих режимах відбуваються основна частка енергоспоживання та значні втрати енергії, і саме для них застосування заходів з енергоощадності дає найвідчутніший ефект. Незважаючи на універсальність динамічного моделювання, його не завжди однаково доцільно застосовувати під час аналізу усталених режимів.

Досі відсутня ефективна математична модель усталених режимів узагальненого електротехнічного комплексу "електропостачальна система – помпова станція", яка б дозволяла безпосередньо враховувати взаємний вплив гідравлічних і електромагнітних параметрів елементів і координат режимів, оперуючи безпосередньо їхніми внутрішніми фізичними параметрами, та формування якої було б формалізованим.

Удосконалення методів і засобів аналізу режимів роботи електротехнічних комплексів з керованими помповими станціями шляхом створення математичної моделі усталених режимів роботи узагальненого ЕТК і формалізація її формування вирішить одну з важливих наукових проблем – ефективне дослідження усталених режимів таких об'єктів з метою підвищення енергоефективності їхнього функціонування.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконувалася згідно Закону України №2623-III від 11.07.2001 р. «Про пріоритетні напрямки розвитку науки і техніки», стратегічним пріоритетним напрямом інноваційної діяльності в Україні на 2003-2013 роки «Новітні ресурсозберігаючі технології», Закону України від 08.09.2011 р. №3715-VI «Про пріоритетні напрями інноваційної діяльності в Україні», постанови президії Національної академії наук України від 22.10.2010 р. № 294 "Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки на період до 2020 року", наукового напрямку «Підвищення надійності й ефективності систем енергозабезпечення» кафедри електропостачання промислових підприємств, міст і сільського господарства Національного університету «Львівська політехніка». Частина досліджень виконані в межах держбюджетної науково-дослідної роботи (номер державної реєстрації 0107U010436).

Мета й задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є розвиток методів аналізу режимів роботи електротехнічних комплексів "електропостачальна система – помпова станція" з відцентровими турбоагрегатами та створення математичної моделі усталених режимів узагальненого ЕТК для підвищення енергоефективності.

Для досягнення цієї мети необхідно розв'язати такі задачі:

1. Дослідити сучасний стан виконання та енергоефективність функціонування ЕТК, методи й засоби аналізу режимів їхньої роботи.
2. Розробити стратегію аналізу усталених режимів роботи ЕТК як макрооб'єкта, удосконалити наявні ММ основних елементів таких комплексів шляхом їхньої адаптації до подальшої композиції.
3. Сформувані ММ усталених режимів роботи блоків ВПТА, їхніх груп, ЕПС та узагальненого ЕТК.
4. Перевірити адекватність ММ шляхом реалізації відповідних ЦМ засобами обчислювальної техніки та застосувати її для розроблення раціональної схеми електричного живлення й мікропроцесорної системи керування режимами роботи ЕТК.

Об'єктом дослідження є процеси в електротехнічному комплексі "електропостачальна система – помпова станція".

Предметом дослідження є усталені режими роботи електротехнічного комплексу з керованими помповими станціями.

Методи дослідження. Використано фундаментальні положення теорії електричних, магнітних і гідравлічних кіл, метод електрогідродинамічних аналогій, системний підхід до аналізу електротехнічних комплексів як сукупності взаємозв'язаних підсистем різної фізичної природи, методи математичного моделювання, методи апроксимації, числові методи, системи комп'ютерної математики.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Одержали подальший розвиток методи аналізу усталених режимів роботи електротехнічного комплексу помпування рідини на основі створення його математичної моделі як композиції моделей нерозривно пов'язаних між собою підсистем різної фізичної природи.

2. Розроблено математичну модель усталених режимів узагальненого ЕТК довільної конфігурації, що дало змогу досліджувати взаємовпливи координат і параметрів електричного та гідравлічного режимів, досліджувати показники енергоефективності та виконувати порівняльний аналіз різних структур і

алгоритмів керування режимами помпування рідини

3. Уперше розроблено метод розрахунку розподілу робочої рідини між гідравлічно сполученими ВПТА, що дало змогу отримувати функції керування агрегатами з неузгодженими номінальними гідравлічними параметрами.

4. Розроблено метод формування сигналу автоматичного керування ВПТА й комутаційними пристроями електротехнічного комплексу "електропостачальна система – помпова станція", що дало змогу отримати найкращі техніко-економічні показники комплексу в повному діапазоні зміни витрати робочої рідини за підтримання постійного тиску в магістралі.

Практичне значення одержаних результатів.

1. Створена математична модель усталених режимів роботи узагальненого ЕТК дає змогу безпосередньо розраховувати й аналізувати енергетичні, електромагнітні та гідравлічні координати режиму, досліджувати їхній взаємний вплив, оцінювати на цій підставі стан як окремих елементів агрегатів, так і агрегатів у цілому.

2. Використання розробленої формалізованої методики формування математичної моделі усталених режимів ЕТК конкретної конфігурації дає змогу ефективно застосовувати її як під час проектування нових енергоефективних структур ЕТК, так і для покращення режимів роботи діючих ЕТК.

3. Відтворення в розробленій математичній моделі різних типових способів керування витратами та напорами відцентрових турбоагрегатів дає змогу здійснювати ефективне техніко-економічне порівняння варіантів моделей керування як на стадії проектування нових, так і під час модернізації діючих ЕТК.

4. Обґрунтовано структуру системи дискретно-неперервного автоматичного керування усталеними режимами ЕТК конкретної конфігурації та алгоритм його функціонування, що дало змогу покращити низку показників енергоефективності режимів помпування рідини.

5. Створена математична модель усталених режимів узагальненого ЕТК

може бути використана як основа для розроблення спеціалізованого програмного забезпечення в складі автоматизованих систем проектування ЕТК.

6. Створена математична модель може бути застосована для комплексного аналізу електромагнітних, гідравлічних і теплових режимів, електротехнологічної ефективності роботи електротехнічного комплексу pompування рідини теплових мережа шляхом об'єднання її з відповідними моделями.

7. Основні положення та результати наукових досліджень впроваджено у виконаних для ЛМКП "Львівводоканал" аналізі експлуатаційних режимів електропостачальної системи каналізаційної помпової станції водовідведення та оцінці ефективності реалізації частотного керування двигунами pomp на цій станції.

8. Матеріали дисертації використовуються при підготовці студентів базового напрямку "Електротехніка та електротехнології" з подальшим навчанням за спеціальністю 7(8).05070108 "Енергетичний менеджмент" у початковій дисципліні "Оптимізація режимів систем електропостачання" та при підготовці студентів спеціальності 7(8).05070103 "Електротехнічні системи електроспоживання" у початковій дисципліні "Режими електропостачальних систем та керування ними".

Особистий внесок здобувача.

Результати, викладені в роботі, отримані автором особисто. Основні ідеї і розробки, що виносяться на захист, належать авторові. Зокрема, в наукових працях, що написані у співавторстві, особисто автором:

- обґрунтовано доцільність та необхідність розроблення математичної моделі усталених режимів узагальненого ЕТК [48, 111];
- поетапно розроблено математичну модель усталених режимів узагальненого ЕТК [219, 221, 223, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 111];
- розроблено метод розрахунку розподілу робочої рідини між гідравлічно сполученими ВПТА з неузгодженими номінальними гідравлічними параметрами, що дозволяє отримувати функції керування ними [49];
- формалізовано формування математичної моделі усталених режимів

ЕТК конкретної конфігурації [112, 111];

- реалізовано математичну модель для низки варіантів виконання ЕТК конкретної конфігурації [234, 42, 111, 112] та перевірено її адекватність.

Апробація результатів дисертаційної роботи.

Основні положення і результати досліджень доповідались і були схвалені на таких міжнародних науково-технічних конференціях:

1. 4-а міжнародна науково-технічна конференція "Математичне моделювання в електротехніці, електроніці та електроенергетиці", присвячена 75-річчю кафедри "Електричні машини та апарати" (22-25 жовтня 2003р, м. Львів, Україна).
2. IEEE – Power Systems Conference & Exposition (10–13 October 2004, New York City, NY).
3. XIII International Symposium On Theoretical Electrical Engineering (July 4–7 2005, Lviv, Ukraine).
4. 5-а міжнародна конференція "Математичне моделювання в електротехніці та електроенергетиці" (17-20 жовтня 2007 р., м. Львів, Україна).
5. 6-а міжнародна науково-технічна конференція "Ефективність та якість електропостачання промислових підприємств" (21-23 травня 2008 р., м. Маріуполь, Україна).
6. IEEE – International Symposium on Industrial Electronics (Cambridge (UK) from 30th June to 2nd July 2008).
7. Міжнародна науково-технічна конференція "Математичне моделювання в електротехніці й електроенергетиці" ММЕлектро-2009 (03-06 червня 2009 р., м. Львів, Україна).
8. 4-а Міжнародна конференція "Інтелектуальні енергетичні системи – ESS'15" (09-12 червня 2015 р., Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут» , м. Київ, Україна).

Публікації. Основний зміст, теоретичні й практичні положення, результати та висновки за матеріалами дисертаційної роботи опубліковані у 14-и статтях, з них: 2 – у наукових періодичних виданнях інших держав (з них 1 – у виданні, яке включене до міжнародної наукометричної бази даних

SCOPUS); 9 – (з них 1 без співавторів) у наукових фахових виданнях України; 1 – у матеріалах міжнародної науково-технічної конференції, які включені до міжнародної наукометричної бази даних SCOPUS; 1 – у матеріалах міжнародного симпозіума; 1 – публікація (без співавторів), яка додатково відображає наукові результати дисертації.

Структура й обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаної літератури із 250 найменувань і 2 додатків. Повний обсяг роботи – 229 сторінок, у тому числі основного тексту – 154 сторінки. У роботі наведено 117 рисунків, 30 таблиць і 2 додатки.

РОЗДІЛ 1

СУЧАСНИЙ СТАН ВИКОНАННЯ

ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ КОМПЛЕКСІВ З ПОМПОВИМИ СТАНЦІЯМИ, МЕТОДИ Й ЗАСОБИ АНАЛІЗУ РЕЖИМІВ ЇХНЬОЇ РОБОТИ

1.1 Загальна класифікація та склад устаткування помпових станцій

Сучасні помпові та компресорні станції є потужними складними інженерними комплексами, що складаються зі взаємозв'язаних гідравлічної, механічної, електричної, автоматичної підсистем. Вони забезпечують видобуток, транспортування, накопичення й розподіл рідких і газоподібних речовин. Конкретний склад устаткування та конфігурація кожної з цих підсистем визначається типом і призначенням станції на підставі принципів безперебійності, надійності, енерго- та ресурсоощадності, а також охорони довкілля. Згідно [71, 206] устаткування помпових і компресорних станцій поділяється на:

- мережеве (трубопровідна, регульовальна й запірна арматура);
- основне енергетичне (турбоагрегати, вони ж турбомеханізми) – агрегати, що складаються з помпи чи компресора та рушія;
- електричне (система живлення електричною енергією);
- механічне (підіймально-транспортні механізми, засувки);
- допоміжне (системи технічного водопостачання, дренажно-осушувальні, оливні, пневматичні, вакуумні системи).

Рушієм компресорних турбоагрегатів найчастіше є газові турбіни та електродвигуни. Рушієм помпових турбоагрегатів є електродвигуни (асинхронні, рідше – синхронні).

Тип станції визначається її призначенням, видом речовини, режимом джерела речовини, типом і характеристиками основного устаткування, а також низкою інших факторів. У залежності від цього класифікація станцій може бути найрізноманітнішою. Помпові станції, класифіковані за найважливішими

ознаками поділяють на станції першого та другого підйомів, головні та проміжні транспортувальні, підвищувальні, циркуляційні.

У цій роботі розглядається помпова станція з електроприводними відцентровими турбоагрегатами у нерозривному зв'язку з електропостачальною системою як єдиний узагальнений електротехнічний комплекс [82]. На підставі цих міркувань комплекс умовно розділено на такі підсистеми:

- гідравлічну (трубопровід, гідромережа) – як кінцевий споживач енергії;
- електрогідравлічну (електроприводні відцентрові турбоагрегати);
- електропостачальну систему, що живить електроприводні відцентрові турбоагрегати та статичне електричне навантаження,

між якими існують зв'язки:

- гідравлічні – між електроприводними відцентровими турбоагрегатами та між ними і гідромережею;
- електричні – між електроприводними відцентровими турбоагрегатами та між ними й електропостачальною системою;
- інформаційні – у вигляді системи керування гідравлічною, електрогідравлічною та електричною підсистемами.

Саме такий поділ покладено в основу розробленої математичної моделі.

Для математичного опису гідравлічної підсистеми застосовано метод електрогідродинамічних аналогій [141].

1.2 Енергоощадність помпових станцій

Найбільшим споживачем електроенергії є електропривод. Без урахування тягового й побутового електроприводів його частка в загальному енергоспоживанні в Україні складає близько 60% [80, 121], а у випадку відсутності заходів з енергоощадності може сягнути в майбутньому 70% [80]. За даними [80] найбільші втрати електроенергії виникають у її споживачів. Оскільки найбільшим електроспоживачем є електропривод, переважну частину якого складає асинхронний електропривод [121], а втрати

в ньому можуть сягати 60%, саме він має найбільший потенціал енергоощадності [80].

ПС є суттєвими споживачами електричної енергії. Наприклад, за даними [10] електроприводні ВПТА споживають близько 20% (а за даними [19] – близько 25%) усієї електроенергії, що виробляється. За даними [108] лише внаслідок неоптимальних режимів ПА з надлишковими статичними й динамічними напорами втрати енергії складають від 5% до 15% (у деяких випадках – від 25% до 50%). Усунення надлишкових статичних напорів шляхом підтримання верхнього максимального рівня рідини в накопичувальних резервуарах, а також усунення надлишкових динамічних напорів шляхом керування витратою ПА може заощадити в окремих випадках до 20% та до 25% електроенергії відповідно [64, 108]. Заощадження 1 кВт·год електроенергії призводить до заощадження 5 кВт·год енергії первинних ресурсів [80].

Відсоток електроенергії, що можна заощадити шляхом застосування керованого електроприводу різних видів турбоагрегатів, наведено в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1

Потенціал оощадності електроенергії в турбоагрегатах

Турбоагрегати	Максимальне заощадження електроенергії
Помпи	25%-50%
Компресори	40%
Вентилятори	30%
Центрифуги	50%
Димосмоки	80%

Значний потенціал енергоощадності електроприводних ВПТА присутній практично скрізь, де вони застосовуються. Наприклад:

- у сфері водопостачання та водовідведення [232, 15, 86, 107, 108, 109, 115, 170, 186], де останнім часом спостерігається зниження водоспоживання [15];
- в системах тепlopостачання [97, 131, 207];

- там, де ними замінюють парові поршневі помпи [1];
- у системах електротеплотехнічного устаткування власних потреб електростанцій, режим яких залежить від навантаження [105];
- у нафто- та газодобувних галузях [18, 31, 137, 139, 176, 188, 204, 213];
- на магістральних нафтогонах [4, 12, 50, 54, 61, 65, 93, 96, 102, 116, 132, 205].

Ефективне вирішення задач енергоощадності ПС неможливе тільки шляхом економії палива й електроенергії. Необхідною умовою є врахування при цьому низки інших факторів (наприклад, можливості рекуперації енергії, збільшення міжремонтних інтервалів, скорочення витрат на ремонт і експлуатацію та природоохоронні заходи, тощо) [63]. Застосування частотно керування є потужним засобом енергетичної оптимізації режимів електроприводу, методику розрахунку якої (наприклад, для АД) запропоновано в [114]. Однак, не завжди ці задачі можна вирішити шляхом виняткового застосування частотно керованого електроприводу без всебічного аналізу роботи кожної з підсистем ПС [5, 12]. Крім цього, необхідно систематизувати й враховувати попередній досвід упровадження енергоощадних заходів на ПС, застосовувати за наявності керований об'єктно орієнтований електропривод [98]. Під час вирішення цих задач необхідно також враховувати експлуатаційну зміну робочих характеристик ВПТА [193].

Таким чином, багатоетапність здійснення аналізу режимів роботи ЕТК, а також необхідність врахування низки факторів під час цього потребують удосконалення методів такого аналізу шляхом створення узагальнених математичних моделей із застосуванням загальних підходів [82].

1.3 Методи та засоби аналізу режимів роботи основного устаткування помпових станцій і їхніх систем електропостачання

Під час розроблення будь-якої математичної моделі завжди доводиться шукати компроміс між ступенем узагальненості представлення об'єкта моделювання та ступенем деталізації його елементів. У цьому контексті математичні моделі умовно поділяють на повні та поелементні [104].

На сьогоднішній день математичному моделюванню електротехнічних комплексів помпових станцій як взаємопов'язаних між собою електричних, електромеханічних та гідравлічних підсистем присвячено багато робіт. Керуючись [104], їх можна поділити на такі групи:

- 1) роботи, в яких увага зосереджена на моделюванні елементів гідравлічної підсистеми (помп чи гідромереж) зі спрощеним представленням електроприводу без урахування ЕПС;
- 2) роботи, в яких увага зосереджена на моделюванні електроприводних відцентрових турбоагрегатів зі спрощеним представленням гідравлічної частини без урахування ЕПС;
- 3) роботи, в яких увага зосереджена на розробленні автоматичних систем керування електроприводом зі спрощеним представленням гідравлічної частини (нерідко – й електроприводу) без урахування ЕПС;
- 4) експериментальні і теоретичні роботи для виявлення несправностей;
- 5) значно менша кількість робіт присвячена моделюванню електропостачальних систем помпових станцій з урахуванням гідравлічних та електричних зв'язків між помповими агрегатами, гідромережі, керування ними, взаємного їхнього впливу. Зокрема, в [82] узагальнено підходи, розроблені принципи "моделювання електротехнічних комплексів і систем як сукупності взаємодіючих підсистем різної фізичної природи", що дає можливість системно підійти до побудови математичних моделей конкретних електротехнічних комплексів.

Розглянемо детальніше питання, що вирішуються в перших чотирьох групах робіт. П'ятій групі робіт надамо окрему увагу. При цьому, не будемо обмежуватись лише відцентровими й рідинними турбоагрегатами.

1.3.1 Гідравлічна підсистема

Моделювання гідравлічної підсистеми та її складових є окремим напрямком, якому присвячено багато наукових праць. Структура моделі, ступінь її деталізації, метод моделювання, склад рівнянь, залежать від

структури підсистеми та кола задач, які повинна вирішувати модель. У цій роботі увагу зосереджено на моделювання ЕПС помпових станцій. Тому вбачається доцільним обрати для аналізу насамперед ті наявні види математичних моделей елементів гідравлічної підсистеми, які можна легко адаптувати до застосування теорії електричних кіл.

Окрему увагу присвячено дослідженню і моделюванню трубопроводів і їхніх мереж з тим чи іншим ступенем деталізації в роботах [237, 8, 51, 52, 79, 104, 131, 132, 205] та відцентрових pomp – у роботах [215, 227, 228, 239, 7, 51, 52, 68, 79, 93, 94, 96, 195, 196, 198].

У [8] наводиться математична модель трубопроводу, а у [51, 52] – також і ВП, на підставі яких отримано вирази для ККД, та розглянуто два способи керування витратою (дроселювання та зміна частоти) для порівняння їхніх енергетичних показників. Трубопровід змодельовано з застосуванням різних коефіцієнтів тертя рідини у вигляді квадратичного полінома. Помпа змодельована шляхом апроксимації квадратичною параболою її паспортної напірної характеристики. Модель помпи враховує також квадратичну залежність "напору за нульової продуктивності" від кутової швидкості обертання робочого колеса.

На основі електрогідродинамічної аналогії у [79] автором розроблено математичну модель ВП та трубопроводу у вигляді сукупності однотипних ланок, що дозволяє в певній мірі врахувати розподіленість параметрів і відгалуження трубопроводу за його довжиною. Модель ВП представлена напором і поздовжнім активно-індуктивним елементом.

Подібний до [79] підхід застосовано автором [195, 196]. Модель ВП з розподіленими параметрами, що визначаються за її геометричними розмірами, замінено моделлю, що складається зі скінченної кількості ділянок трубопроводу зі зосередженими активними та реактивними гідроопорами.

Робота [237] присвячена виявленню місць раптових проривів трубопровідних мереж, які мають вибуховий характер, шляхом імітаційного моделювання хвильового поширення змін тиску. Для цього автором

представлено трубопровід як елемент мережі з розподіленими за його довжиною параметрами з урахуванням сил рідинного тертя.

Математичну модель нафтопроводу для визначення місця витoku нафти, запропоновано в [104]. Вона сформована у вигляді матриць операторів зв'язку тиску та витрати між двома точками трубопроводу на підставі вимірювання цих величин давачами та з урахуванням випадкових процесів під час передачі електричних сигналів.

У [217] засобами середовища Simulink з використанням готових бібліотек змодельовано систему водопостачання з частотно керованими помпами під час забору води з греблі. Напірна характеристика помпи апроксимована поліномом. Детально змодельована гідромережа з урахуванням впливу коефіцієнтів тертя, діаметру труб, довжин, тощо, а також – безтискові резервуари води, в які вона поступає та з яких споживається. У [131] розроблено математичну модель для розрахунку систем централізованого теплопостачання та систем центрального опалення. Математична модель ГМ, запропонована в цій роботі, характеризується високим ступенем деталізації системи трубопроводів та поділом її на пряму й зворотну частини.

Математичну модель нафтогону, розроблену в [61], реалізовано у вигляді візуалізованої комп'ютерної моделі. Електромеханічна частина врахована у вигляді алгоритмів керування.

Математичну модель нафтопроводу для аналізу динамічних процесів у ньому наведено в [132]. У цій роботі наведено побудову структурної математичної моделі з використанням подвійного перетворення Лапласа (оригінал - операторне зображення - оригінал) та врахуванням розподіленості параметрів. Побудована в [205] модель трубопроводу отримана на підставі запису законів збереження маси й імпульсу під час руху рідини в об'єкті також враховує розподіленість параметрів. Аналогічний підхід застосовано автором [54] під час моделювання процесу переміщення газу в трубопроводі.

Запропоновані в [227, 228] математична модель занурювальної ВП

розділена на 4 окремі модулі. Таке представлення здійснене з метою адаптації моделі до виявлення п'яти різних видів несправностей (одна з них є зовнішньою – обрив трубопроводу). Модель помпи враховує квадратичну залежність напору від кутової швидкості обертання робочого колеса та в певному сенсі ґрунтується на її просторовій будові. Однак, залежність напору від витрати представлена одним рівнянням – у вигляді квадратичного полінома, а до складу рівнянь моделі входять безрозмірні коефіцієнти.

Експериментальним дослідженням можливих проблем з експлуатацією ВПТА в Єгипті методом модального аналізу фізичної моделі присвячена робота [239]. Здійснено дослідження різних режимів ВПТА шляхом визначення резонансних частот механічних коливань модельного об'єкта без математичного моделювання.

У [68] здійснене порівняння апроксимації механічних характеристик ВП магістральних нафтогонів інтерполяційними поліномами Лагранжа, Ньютона, Стирлінга та за методом найменших квадратів. Показано, що ці поліноми мають подібні коефіцієнти. Здійснено розрахунки пускових режимів з використанням цих поліномів.

Робота [236] присвячена математичному моделюванню динамічних режимів помпування водяних суспензій піску у системі трубопровід – ВПТА з дизельним рушієм внутрішнього згорання. Помпа представлена у вигляді напору та ККД, виражених квадратними поліномами витрати з коефіцієнтами, які враховують умовне зменшення діаметра робочого колеса за рахунок наявності лопатей та вплив швидкості обертання. Модель трубопроводу отримана з емпіричної формули Дарсі-Вейсбаха; її остаточний вигляд залежить від параметрів трубопроводу й складу суспензії.

Проектуванню помпового устаткування присвячена робота [7]. Математичну модель довільної помпи автор отримує як сукупність сполучених між собою (на підставі загальної теорії кіл та у відповідності до її просторової будови) математичних моделей його елементів. Застосовано принцип електрогідродинамічних аналогій.

Метод електрогідравлічних аналогій було успішно застосовано в [93, 94] для отримання математичної моделі ВП і обчислення її параметрів за геометричними розмірами елементів помпи. Продовженням цього стало створення загальної Bond Graph моделі pomp [96] магістральних нафтогонів. Математична модель побудована на основі просторової будови помпи та фундаментальних рівнянь руху рідини; у ній відображені основні конструкційні елементи помпи.

Із метою оцінки ефективності різних способів керування витратою електроприводних ВПТА в [198] здійснено розрахунки низки режимів працюючих на трубопроводі агрегатів. При цьому, ВП представлені у вигляді апроксимаційних поліномів, коефіцієнти яких отримані з паспортних характеристик, а рівняння трубопроводу не наведені.

Імітаційні моделі одноступеневої [248] та багатоступеневої [215] ВП сформовано методами обчислювальної гідродинаміки Computational Fluid Dynamics (CFD), які дозволяють на підставі геометричних параметрів і фізичних умов об'єкта моделювання за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення отримати числові дані й схеми потоків речовини модельованого об'єкта.

Аналіз наведених моделей, методів їхньої побудови, сфери застосування дає підстави зробити висновок про доцільність застосування в цій роботі таких моделей, які базуються на просторовій будові елементів гідравлічної підсистеми, і які сформовані на основі електрогідродинамічної аналогії. Такий вибір моделей елементів дозволяє врахувати вплив їхніх внутрішніх параметрів і застосувати формалізований підхід до формування узагальненої моделі ЕПС помпової станції, одночасно уникнувши надмірної деталізації.

1.3.2 Електроприводні турбоагрегати

Першим етапом формування узагальненої математичної моделі ЕПС помпової станції повинно бути об'єднання в єдине ціле моделей гідравлічної підсистеми та електроприводного турбоагрегата. Існує низка робіт, у яких

запропоноване вирішення цієї задачі, та які різняться між собою методами моделювання, призначенням моделей, математичним описом гідравлічної підсистеми та ступенем її деталізації.

Спрощену методику оцінки енергоощадності внаслідок запровадження частотно керованого електроприводу pomp нафтоперегінних станцій розроблено в [4]. У цій роботі наведено низку розрахункових формул та послідовність їхнього застосування для обчислення втрат потужності та енергії в трансформаторах, кабельних лініях, електродвигунах і помпах, що може бути корисним під час інженерних розрахунків.

Робота [235] присвячена моделюванню малопотужних електроприводних помпових турбоагрегатів, які застосовуються у фотоелектричних системах, однак наведена модель є феноменологічною і, як стверджує сам автор, – "позбавлена будь-якого фізичного змісту". Подібний метод моделювання застосовано в [175, 176]. У цих працях синтезовано модель електроприводного ВПТА разом з нафтовою свердловиною у вигляді рівнянь регресії.

Імітаційну модель ВПТА з вентильним індукторним електродвигуном запропоновано в [146]. Робота присвячена розробленню моделей для проектування такого рушія, його налагодження та дослідження режимів. Модель ВП наведена у вигляді простих виразів, до складу яких входить незмінний ККД помпи, сталі коефіцієнти та її напір за нульової витрати. Передатні функції використано автором [74] для моделювання електроприводного ВПТА зі системою автоматичного керування рухом рідких вуглеводнів.

Для підтвердження результатів експериментальних досліджень процесу пуску та переведення в реверсний режим асинхронного ВПТА в [241] у середовищі Matlab побудовано математичну модель цього об'єкта. Спрощену математичну модель ВП з вентильним індукторним двигуном запропоновано в [249]. У цих роботах помпове навантаження представлено у вигляді найпростішої механічної характеристики.

У [250] розроблено схему векторно керованого електроприводу ВПТА та реалізовано його на базі мікропроцесорного контролера. ВП представлено у вигляді момента опору, апроксимованого квадратичною параболою.

Моделюванню й оптимізації режимів синхронних двигунів потужних ПС присвячено роботу [2]. Механічна характеристика ВП апроксимована квадратичною параболою (до складу виразу входять пусковий і номінальний моменти, сталий "коефіцієнт помпи" та квадрат частоти обертання).

Розрахункові вирази для визначення втрат потужності в усіх ланках електроприводного ВПТА за умови підтримання сталого тиску в ГМ шляхом частотного керування та зміни кількості паралельно працюючих агрегатів наведено в [6]. Потужність і напір ВП апроксимовано поліномами витрати та відносного значення частоти зі сталими безрозмірними коефіцієнтами; ГМ – квадратичною залежністю витрати й гідроопором.

У [33] розроблено математичну модель високовольтного пуско-керувального пристрою разом з АД і електроприводним компресором. Під час моделювання турбоагрегату увагу зосереджено на методиці апроксимації його паспортних аеродинамічних характеристик. Запропоновано методику розрахунків енергетичних характеристик вентиляторної станції.

Математичну модель для розрахунку загальних втрат потужності в частотно керованих асинхронному та синхронному електроприводах ВПТА розроблено в [39]. Турбомеханізми представлені простим добутком їхньої потужності на відносне значення частоти обертання.

Нелінійну вентиляторну характеристику компресора лінеаризовано в [50] для включення її до складу розробленої математичної моделі синхронного електроприводу компресорного агрегату магістрального газогону зі системою частотного керування.

У [58] розроблено математичну модель і досліджено режими системи керований трансформатор напруги – безпосередній тиристорний перетворювач частоти – АД – ВП зі системою ступеневого частотного керування та самодіагностикою несправностей двигуна. Проаналізовано

вплив послідовно-паралельного сполучення ВП на режими електроприводу шляхом простого графічного додавання їхніх вентиляторних механічних характеристик без математичного узагальнення таких сполучень.

Обґрунтуванню та розробленню математичної моделі частотно керованого АД із занурюваною помпою присвячена робота [69]. Помпове навантаження в цій роботі представлене вентиляторною механічною характеристикою з безрозмірним коефіцієнтом.

У математичній моделі електроприводного ВПТА, навантаженого розгалуженим трубопроводом водопостачання [76], використано блок, що складається з джерела електричного живлення, частотного перетворювача та АД. Помпа змодельована напірною характеристикою з урахуванням впливу на неї квадрата відносної частоти обертання та сталого "коефіцієнта помпи", який обчислюється за номінальними значеннями напору та витрати. Трубопровід представлений його еквівалентним опором і статичним протинапором.

У [83] розроблено та досліджено математичні моделі частотно керованого електроприводу ВПТА з використанням автономних інверторів напруги та струму. Помпове навантаження змодельовано вентиляторною механічною характеристикою з безрозмірним коефіцієнтом.

Математичну модель вентилятного синхронного двигуна вентилятора шахти з частотним перетворювачем створено й досліджено в [100]. Вентилятор представлений у вигляді залежної від частоти його аеродинамічної характеристики, отриманої на підставі паспортних даних.

Праця [116] присвячена розробленню об'єктно орієнтованого частотного асинхронного електроприводу ВПТА нафтогінних станцій. У розробленій математичній моделі ВП задана залежними від частоти напірними характеристиками.

У статті [119] в середовищі Matlab змодельовано електропривод потужного помпового агрегату гідравлічного очищення окалини з металевого прокату з метою енергоощадності, оскільки потужність такого агрегату є

співмірною з потужністю прокатного стана. У цьому ж середовищі в [22] здійснено моделювання системи "перетворювач частоти – АД – ВП" зі зворотним зв'язком за кутовою швидкістю для дослідження її поведінки в процесі зміни споживання рідини. ВПТА в цих роботах задані механічними й напірними характеристиками з фіктивним опором і врахуванням впливу швидкості обертання.

Математичну модель частотно керованої електрогідравлічної системи з урахуванням водопровідної мережі розроблено в [103]. Ця модель призначена для розрахунку координат режиму на виході помпи та трубопроводу, а також – для детального дослідження усталених режимів і динамічних процесів у АД. З цією метою трубопровід й ВП представлено в спрощеному вигляді; детальний математичний опис застосовано для АД.

Наведені в [133] аналітичні функціональні залежності, які пов'язують між собою потужності в усіх елементах частотно керованих електроприводних ВПТА, дозволяють оцінювати різні варіанти керування витратою та напором. У цій праці запропоновано уточнений апроксимаційний вираз механічної характеристики ВП.

Об'єктом дослідження в [139] є вентильний магнітоелектричний електропривод занурюваних разом з двигуном відцентрових і гвинтових помп, для якого розроблені відповідні математичні моделі. У роботі не моделюється ГМ; помпи представлені їхніми паспортними механічними й напірними характеристиками.

Розробленню та математичному моделюванню аксіального відцентрового асинхронного двигуна-помпи з короткозамкненим ротором, що застосовується в гідравлічних системах літаків, присвячена робота [171]. Помпове навантаження в цій моделі відображене у вигляді вентиляторної механічної характеристики, ГМ не моделюються.

У [172, 199] увагу присвячено розробленню математичних моделей і дослідженню режимів тиристорних перетворювачів частоти й напруги електроприводних асинхронних турбоагрегатів зі системою ступеневого

частотного керування та програмним формуванням керівних імпульсів. Обґрунтовано застосування ступеневого керування. Помпові та вентиляторні агрегати представлені їхніми паспортними характеристиками.

Робота [179] присвячена розробленню математичної моделі об'єктно орієнтованого АД електроприводних турбомеханізмів. Запропонована методика моделювання дозволяє отримати різні варіанти моделей двигунів. Турбомеханізми представлені їхніми паспортними механічними характеристиками.

Модель помпи з трубопроводом у вигляді рівнянь довгої лінії з розподіленими параметрами, розроблена автором [187], застосовано ним під час математичного моделювання бурового помпового агрегату з тиристорним електроприводом постійного струму.

Основна увага в [62] зосереджена автором на розробленні числових методів розв'язання системи диференціальних рівнянь динамічної моделі занурюваного електроприводного ВПТА. У [204] цю модель доповнено рівняннями трансформатора живлення та частотного перетворювача, а ВП представлено скалярною моделлю. Моделювання електроприводних ВПТА на основі методу Bond Graph, який передбачає комп'ютерне формування рівнянь ієрархічних моделей взаємопов'язаних підсистем різної фізичної природи, було виконане в [101, 102, 92]. У цих роботах застосовані математичні моделі ВП [94], отримані на підставі електрогідродинамічних аналогій.

Аналіз наведених розробок у сфері моделювання електроприводних турбоагрегатів дає підстави умовно розділити їх на три групи:

- 1) феноменологічні, регресійні, емпіричні, імітаційні, у вигляді передатних функцій – повністю або частково позбавлені фізичного змісту моделі [235, 4, 74, 146, 175, 176];
- 2) моделі з детальним математичним описом фізики рушія, але зі спрощеним представленням турбоагрегатів без урахування їхньої будови (переважна кількість розглянутих праць);
- 3) спеціалізовані математичні моделі частотно керованих

електроприводних ВПТА з математичним описом фізики електромагнітної та гідравлічної підсистем [62, 92, 101, 102, 187, 204].

1.3.3 Керування електроприводними відцентровими помповими турбоагрегатами

Важливе місце серед наукових праць із математичним описом електроприводних турбоагрегатів, займають роботи, присвячені розробленню автоматичних систем керування ними. Розглянемо їх з погляду представлення математичних моделей.

Структурні схеми автоматичних систем керування одиничними електроприводними ВПТА чи їхніми групами для різних схем водопостачання, кількісні оцінки енерго- та ресурсоощадності шляхом мінімізації втрат електроенергії та води з використанням оцінювачів ККД, напору і витрати ВП, алгоритми керування наведено [229, 230, 231, 232, 243, 246, 20, 21, 23..29, 77, 149..151, 153..158, 181..185, 191]. Синтезу й аналізу нейронних мереж для керування ВПТА присвячені роботи [216, 244, 25, 75, 113, 152, 166, 191], експериментальним дослідженням – [78, 159]. Спільним для цих праць є те, що турбомеханізми змодельовано передатними функціями, чи – на підставі найпростіших заступних схем з використанням номінального ККД помп, одного-двох активно-індуктивних елементів. Теоретична та практична важливість цих розробок у повній мірі розкривається під час створення автоматичних мікропроцесорних систем керування ВПТА.

Математичні моделі процесів компримування (підвищення тиску) природного газу, які враховують технічний стан газокompресорного обладнання розроблено в [65]. Створені моделі не мають фізичного змісту, однак, дозволяють побудову самоорганізовуваних автоматичних систем керування з мінімальною інформацією про об'єкт керування. Структурну схему системи керування тиском газокompресорних агрегатів, але без наведення математичних моделей наведено в [169].

У [72] розроблено імітаційну модель квазівекторної системи

автоматичного керування з автономними інверторами напруги, для створення комп'ютерної системи керування електроприводними ВПТА аміакогону "Тольяті-Одеса". Ефективне вирішення модернізації ПС водовідведення шляхом комбінованого застосування частотного керування електроприводом ВП й керування електроприводом дросельних засувок запропоновано в [125], де розроблено структурну схему керування двоагрегатної ПС з паралельним сполученням електроприводних ВПТА, а також – алгоритм керування, застосований на ПС водовідведення у м. Івано-Франківськ.

Ідея порівняння роботи добувної свердловини з результатами імітаційного моделювання цього ж об'єкта покладена автором [84] у розроблену ним концепцію інтелектуальної автоматичної системи керування електроприводним ВПТА.

Обґрунтування енергоощадних режимів частотного електропривода ВПТА в [9] здійснено за допомогою формування в середовищі Matlab з використанням пакетів Simulink моделей, які описують залежність енерговитрат від частоти. В аналогічний спосіб з використанням бібліотеки готових модулів SimPowerSystems у [194] реалізовано комп'ютерну модель системи "програмоване джерело живлення – АД – ВП – ГМ". Тут гідромережа представлена еквівалентною статичною, а помпа – її апроксимованими вентиляторними механічною й напірною характеристиками.

Результати роботи з проектування, створення та випробування комп'ютеризованого лабораторного комплексу для досліджень керованого електроприводного ВПТА [87] використано під час обґрунтування необхідності [88] та розроблення [89] електроприводу ПС міського водопостачання. Керовані та паралельно сполучені з ними гідротрактами некеровані турбоагрегати представлені поліномами зі сталими коефіцієнтами чи найпростішими заступними схемами з одним фіктивним опором.

У [99] побудовано автоматичну систему частотного керування асинхронними електроприводними ВПТА для забезпечення заданих наперед

напору та витрати водяних pomp, які представлені вентиляторними механічними характеристиками з фіктивним опором. Аналогічний підхід до моделювання турбоагрегатів використано в [127, 128, 129] під час розроблення алгоритмів керування електроприводними ВПТА водопостачальних ПС з паралельно сполученими гідротрактами pomp.

Принципи побудови й алгоритм векторного керування витратою електроприводного ВПТА розроблено та змодельовано в [160, 161] з метою їхньої верифікації. Механічні та напірні характеристики турбомеханізмів апроксимовано відповідними параболою.

Недостатня ефективність застосування окремо взятих (включно з частотним) способів керування витратою багатоагрегатних ПС обґрунтована в [142, 143]. Запропоновано застосування турбоагрегатів у генераторному режимі з рекуперацією енергії. Відцентрові турбоагрегати представлені у вигляді механічних і напірних характеристик з одним фіктивним опором, а ГМ з розподіленими параметрами – у вигляді системи еквівалентних чотириполюсників зі зосередженими параметрами.

Нові алгоритми програмного формування напруги для забезпечення ступеневого частотного керування асинхронними електроприводними відцентровими турбомеханізмами реалізовано в [172]. У розроблених математичних моделях вентиляторні механізми представлено паспортними механічними й напірними характеристиками. Аналогічно змодельовано турбомеханізми в роботах [189, 190], метою яких є створення системи паралельних каналів керування електроприводами з можливістю самодіагностики та з підвищеною надійністю шляхом застосування автоматичного вмикання резерву.

Розробленню автоматичної системи керування електроприводними ВПТА трубопроводів великої довжини з проміжними ПС присвячено роботу [192]. Підкреслено необхідність урахування розподіленості параметрів складних й розгалужених трубопроводів. Розроблено інженерні методи розрахунку процесу помпування рідини. Об'єкти моделювання представлено

у вигляді апроксимованих рядами Тейлора їхніх передатних функцій.

Аналіз наявних робіт, присвячених розробленню автоматичних систем керування електроприводними турбоагрегатами дозволяє розділити їх на три основні групи:

1) роботи в яких турбомеханізми та трубопроводи представлені з високим ступенем деталізації у вигляді об'єктів з розподіленими параметрами, електрична підсистема представлена з низьким ступенем деталізації;

2) роботи, в яких турбомеханізми та трубопроводи представлено на підставі їхніх найпростіших заступних схем, передатних функцій чи вимірних гідравлічних координат режиму електрична підсистема представлена з різним ступенем деталізації;

3) роботи в яких увага цілком зосереджена на системах і алгоритмах керування, синтезі й дослідженні нейронних мереж без наведення рівнянь математичних моделей або лише зі спрощеним представленням навантаження електропривода.

1.3.4 Виявлення несправностей

Актуальним питанням є розроблення алгоритмів, методів, моделей з метою своєчасного діагностування, виявлення та локалізації несправностей електроприводних ВПТА [127, 193] та трубопроводів [205]. Результати експериментальних досліджень електроприводних турбоагрегатів шляхом модального аналізу [239], вимірювання електричних і механічних координат режиму під час кавітації ВП [225], спектральний аналіз цих координат для виявлення інших несправностей [245] є базою для побудови спеціалізованих математичних моделей.

Так, алгоритм керування групою електроприводних ВПТА з паралельним сполученням гідротрактів розроблено в [127]. ВП представлені напірними вентиляторними характеристиками. Алгоритм передбачає контроль температури двигунів і не дозволяє вмикати агрегат після закінчення його міжремонтного нормативного терміну експлуатації.

Основні типи змін характеристик ВП, які відбуваються внаслідок їхнього зношування та засмічення під час експлуатації, розглянуто в [193] шляхом досліджують впливу зазначених чинників на ККД агрегатів.

Побудова імітаційної моделі лінійного трубопроводу з розподіленими параметрами [205], призначеної для прогнозування й діагностики пошкоджень у ньому, ґрунтується на законах збереження маси й імпульсу.

У [224] запропоновано модель електроприводного ВПТА, за допомогою якої локалізація пошкоджень здійснюється на підставі лише електричних координат режиму. Незважаючи на ефективність у досягненні результату, модель є емпіричною й не відображає внутрішньої будови агрегату.

Імовірнісну математичну модель для оцінювання стану електроустаткування ПС з урахуванням технологічних особливостей її роботи представлено у [110]. ВПТА в цій моделі представлено у вигляді апроксимованих напірних характеристик.

Роботи [226, 227, 228] присвячені виявленню та локалізації несправностей у багатоступневих електроприводних ВПТА. Рівняння математичної моделі АД сформовано в $d-q$ координатах без урахування нелінійності головного магнітного кола та втрат електроенергії в сталевому осерді. Модель ВП представлена у вигляді вентиляторної та механічної напірних характеристик, які залежать від її внутрішніх конструкційних розмірів.

Імітаційну комп'ютерну модель системи "комутатор – безконтактний двигун постійного струму – вентилятор" розроблено автором [14] для дослідження вібрації корпусу двигуна. Математичної моделі турбомеханізму не наведено.

Аналіз цих розробок дозволяє розділити їх умовно на два типи:

- 1) роботи, присвячені експериментальним дослідженням [225, 239, 245, 127, 193] з різними напрямками використання результатів експериментів;
- 2) роботи з емпіричними [224], імітаційним [14, 205] або математичними [226.. 228, 110], спеціалізованими для виявлення несправностей, моделями.

1.4 Методи та засоби аналізу режимів роботи електропостачальних систем з помповими станціями як єдиних електротехнічних комплексів

Проблема керування помпуванням рідин і газів є давнім питанням, актуальність якого в наш час лише зростає. Існує низка прикладних програмних комплексів, що дозволяють враховувати взаємний вплив гідравлічних та енергетичних параметрів (наприклад, MIKE NET фірми DHI WATER ENVIRONMENT для розрахунку системи водопостачання). Такі програмні продукти, реалізовані шляхом імітаційного, феноменологічного, стохастичного чи регресійного моделювання, пов'язують між собою параметри та координати режиму гідравлічної підсистеми (геометричні розміри, витрати, тиски) з основними енергетичними координатами режиму електропостачальної системи (вартість електроенергії, споживана потужність). Вони мають, насамперед, прикладне значення.

У [115] розроблено "методику розрахунку довготривалих режимів каскаду помпових станцій" з метою оптимізації водопостачання. Помпові станції розглядались як макрооб'єкти, для опису функціонування системи яких розроблено математичну макромодель.

Вимоги до математичних моделей ПС для забезпечення ними необхідної ефективності сформульовані в [218]. У цій роботі наведено імітаційну модель ПС, отриману методами обчислювальної гідродинаміки Computational Fluid Dynamics (CFD), які дозволяють на підставі геометричних параметрів і фізичних умов об'єкта моделювання за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення отримати числові дані й схеми потоків модельованого об'єкта. Наголошено на необхідності врахування електроприводу під час моделювання.

Імітаційні математичні моделі водогінних і каналізаційних ПС у вигляді НССР розроблено в [136]. Зв'язок між ВПТА встановлено на підставі балансу витрат цих агрегатів.

Питання, пов'язані з дискретно-неперервним керуванням режимами ПС, досліджені в [55, 56, 57]. Оптимізація режимів здійснюється шляхом вибору

оптимальної кількості та способів керування працюючих агрегатів. Робота [55] присвячена розробленню методів здійснення такого вибору; у [56, 57] побудовано імітаційні моделі. Турбомеханізми змодельовано у вигляді апроксимаційних виразів, отриманих із сімейства їхніх механічних і напірних характеристик за різних частот обертання.

Шляхи побудови автоматизованих ПС, розглянуті в [34], втілились у розробленні структурної схеми станції, керованої мікропроцесорним контролером. Помпи представлені у вигляді їхніх напірно-витратних характеристик; гідравлічні зв'язки між паралельно сполученими агрегатами відображені на підставі балансу тисків і витрат.

У [197] розроблено й змодельовано схему електропостачальної системи кисневої компресорної станції з частотно керованими синхронними компресорними турбоагрегатами, які разом з трубопроводами представлені у вигляді узагальнених механічних вентиляторних характеристик.

Моделювання системи "електропривод – ВП – ГМ" з паралельним сполученням pomp в "електричних аналогіях" без урахування електропостачальної системи було здійснено в [81] під час вирішення проблеми енергетичної оптимізації електроприводу ПС.

У [17] розроблено ММ керованого електроприводу послідовно сполучених ВПТА помпової станції з урахуванням живильного трансформатора й ПЧН. Модель трубопроводу з розподіленими параметрами отримано з емпіричної формули Дарсі-Вейсбаха, а апроксимовані найпростішими виразами механічну й напірну вентиляторні характеристики ВП – за її паспортними кривими. Ці розробки продовжено в [134], де розглянуто паралельно сполучені ВПТА помпової станції. Трубопровід і ВП змодельовані апроксимаційними виразами з фіктивними гідроопорами.

У [213] розроблено математичну модель специфічного вузла навантаження – електротехнічного комплексу добувної нафтової свердловини з гвинтовими та штанговими помпами. Автор наголошує, що розроблена модель є "не метою, а засобом" для дослідження роботи цього

комплексу й підвищення його ефективності. Конструкційні елементи незалежних одна від одної в гідравлічній частині pomp і параметри робочої рідини враховані в цій моделі у вигляді експериментально отриманих залежностей номінальних потужностей pomp від цих параметрів. Подібне завдання ставилось в [137], де ВПТА представлено апроксимованими напірними характеристиками.

На підставі енергетичних моделей окремих структурних елементів у [204] побудовано математичну модель одиничної занурювальної електроприводної ВП з урахуванням живильного трансформатора, кабельної лінії та ПЧН., причому використано скалярну модель [93, 94] помпи. Імітаційну модель аналогічного електротехнічного комплексу, але – з представленими у вигляді паспортних характеристик моделями штангових, відцентрових і гвинтових pomp наведено в [188].

Стохастичний підхід з урахуванням випадкового характеру надходження та витрати робочої рідини застосовано в [210] під час розроблення методів енергоощадного керування ПС. Помпові агрегати змодельовано шляхом апроксимації їхніх експериментально отриманих характеристик.

У працях [122, 123, 124], присвячених зниженню втрат електроенергії в обвитках асинхронних двигунів помпової станції змодельовано систему "трансформатор – ЛЕП – система керування – тиристорний перетворювач напруги – АД-ВП – трубопровід" у середовищі Matlab з використанням спеціалізованих бібліотек. Запропоновано спеціалізовану теплову модель АД, трубопровід представлений з розподіленими параметрами; ВП апроксимовано паспортною напірною характеристикою.

Таким чином, сучасний стан моделювання ЕТК можна окреслити наявністю таких основних типів розробок:

- макромоделі груп ПС, готові програмні комплекси для розрахунку енергетичних показників ПС і ЕПС; структурні моделі; імітаційні моделі, реалізовані програмними комплексами зі стандартними бібліотеками розрахунків і візуалізації;

- спеціалізовані моделі ПС (теплові, стохастичні);
- моделі, розроблені для опису окремих ПС із одиничними, послідовно чи паралельно працюючими агрегатами з частковим урахуванням ЕПС;
- розгорнуті моделі ПС, але без урахування ЕПС.

1.5 Висновки до розділу 1

Огляд наукових публікацій, присвячених електротехнічним комплексам помпових і компресорних станцій як в цілому, так і їхнім складовим, засвідчив важливість удосконалення методів аналізу режимів їхньої роботи та розроблення відповідних ефективних засобів з метою підвищення енергоефективності.

Аналіз сучасного стану моделювання ЕТК та їхніх елементів дає підстави зробити висновок про відсутність математичної моделі усталених режимів узагальненого ЕТК, яка б дозволяла зі збалансованим ступенем деталізації враховувати взаємний вплив гідравлічних і електромагнітних параметрів і координат режиму, формування якої було б формалізованим.

Для досягнення мети дисертаційної роботи необхідно:

- розробити стратегію математичного моделювання усталених режимів роботи ЕТК;
- удосконалити наявні ММ основних елементів таких комплексів шляхом відповідної їх адаптації.

РОЗДІЛ 2

КОНЦЕПТУАЛЬНІ ЗАСАДИ ФОРМУВАННЯ МОДЕЛІ ТА ЇЇ СКЛАДОВІ

2.1 Обґрунтування напрямку та загальна методика проведення дисертаційного дослідження

Ефективне керування режимами ЕТК неможливе без аналізу енергетичних процесів у всіх його підсистемах. Особливо наочно це показано в [5, 12], присвячених багатоетапному аналізу режимів ПС із урахуванням гідравлічного навантаження, а також – експлуатаційних характеристик технологічного устаткування. Обраний нами напрям досліджень потребує розроблення засобу у вигляді єдиної математичної моделі, який дасть змогу досліджувати усталені режими ЕТК довільної конфігурації з урахуванням максимальної кількості необхідних для цього чинників.

Під час моделювання гідравлічної підсистеми використано метод електрогідродинамічних аналогій. Рівняння математичних моделей елементів ЕПС помпової станції формуються у в.о. з використанням основних припущень для кожного них.

Використано загальні теорії електричних, магнітних і гідравлічних кіл, методи математичного моделювання, числові методи, системи комп'ютерної математики. Для пошуку нульових наближень з метою розв'язання НССР математичної моделі використано диференційний метод у формі h -характеристик [144, 202]. Для розв'язання нелінійної системи скінчених рівнянь (НССР) стану ММ одиничного асинхронного ВПТА застосовано метод Ньютона [242, 60, 144]. Однак, ефективність цього метода виявилась недостатньою для розв'язання НССР математичної моделі ЕПС помпової станції внаслідок значної розрідженості матриці Якобі такої системи рівнянь. Застосування метода Левенберга-Марквардта [242, 60] в середовищі Mathcad допомогло вирішити цю проблему.

Рівняння ММ гідравлічної підсистеми ЕТК, використані в цій роботі, базуються на методі електрогідродинамічних аналогій [141]. Закони Ома та

Кірхгофа для послідовного та паралельного сполучення електричних опорів застосовуються для гідравлічних кіл. Цей метод дозволяє моделювати гідравлічне коло у вигляді топологічно подібного до нього електричного кола. Наприклад, диференційні рівняння стану довгої лінії з розподіленими параметрами (за умови відсутності витoku струму через ізоляцію) та герметичного трубопроводу з рідиною є однаковими за структурою [94]:

Електрична лінія	Трубопровід
$-\frac{\partial u}{\partial x} = L \frac{\partial i}{\partial t} + R i$ $-\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{1}{C} \frac{\partial i}{\partial x}$	$-\frac{\partial P}{\partial x} = L_g \frac{\partial Q}{\partial t} + R_g Q$ $-\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{1}{C_g} \frac{\partial Q}{\partial x}$
u – електрична напруга, В	P – тиск, Па
i – електричний струм, А	Q – витрата, м ³ /с
R – електричний резистанс, Ом	R _g – гідравлічний опір, кг/(м ⁴ ·с)
L – електрична індуктивність, Гн	L _g – гідравлічна індуктивність, кг/м ⁴
C – електрична ємність, Ф	C _g – гідравлічна ємність, м ⁴ ·с ² /кг
x – координата, м	
t – час, с	

У гідравлічному опорі виникають дисипативні втрати енергії рідинного тертя (аналогічно до втрат енергії на нагрівання провідника внаслідок проходження електричного струму). Гідравлічна індуктивність виявляється в силах інерції, які протидіють зміні витрати (аналогічно до того, як ЕРС індукції протидіє зміні струму). Гідравлічна ємність виявляється у зміні тиску рідини під час зміни її об'єму (аналогічно до зміни напруги між обкладками конденсатора під час зміни кількості електричного заряду).

Використання математичних моделей гідравлічної підсистеми [79, 93, 94], які ґрунтуються на основі метода електрогідродинамічних аналогій, дозволило в цій роботі застосувати формалізований підхід до формування й розв'язання рівнянь математичної моделі узагальненого ЕТК.

Для розв'язання НССР застосовано алгоритм Левенберга-Марквардта

(Levenberg-Marquardt Algorithm, LMA) [242, 60]. Незважаючи на те, що цей алгоритм не є найшвидшим, його висока стійкість стала вирішальним аргументом під час вибору метода розв'язання НССР розробленої ММ.

Нехай задано НССР у вигляді:

$$\mathbf{f}(\mathbf{X}) = \mathbf{0}, \quad (2.1)$$

де \mathbf{X} – вектор-стовпець невідомих.

Ітераційний пошук кореня системи (2.1)

$$\mathbf{X}^{(k+1)} = \mathbf{X}^{(k)} - \Delta\mathbf{X}^{(k)} \quad (2.2)$$

полягає в обчисленні на кожному кроці приросту $\Delta\mathbf{X}^{(k)}$ – кореня системи лінійних рівнянь

$$\left(\mathbf{W}^t(\mathbf{X}^{(k)})\mathbf{W}(\mathbf{X}^{(k)}) - \lambda^{(k)}\mathbf{1} \right) \Delta\mathbf{X}^{(k)} = \mathbf{W}^t(\mathbf{X}^{(k)})\mathbf{f}(\mathbf{X}^{(k)}), \quad (2.3)$$

де $\lambda^{(k)} \geq 0$ – свій для кожної ітерації коефіцієнт; $\mathbf{1}$ – одинична матриця; \mathbf{W} – матриця Якобі НССР (2.1);

$$\Delta\mathbf{X}^{(k)} = \left(\mathbf{W}^t(\mathbf{X}^{(k)})\mathbf{W}(\mathbf{X}^{(k)}) - \lambda^{(k)}\mathbf{1} \right)^{-1} \mathbf{W}^t(\mathbf{X}^{(k)})\mathbf{f}(\mathbf{X}^{(k)}). \quad (2.4)$$

Початкове значення коефіцієнта $\lambda^{(0)}$ обчислюють за формулою

$$\lambda^{(0)} \leq 10^{-6} \dots 10^{-3} \max\left(\text{diag}\left(\mathbf{W}^t(\mathbf{X}^{(k)})\mathbf{W}(\mathbf{X}^{(k)})\right)\right). \quad (2.5)$$

На всіх кроках ітераційного процесу необхідно намагатись збільшити $\lambda^{(k)}$, не порушуючи при цьому умови

$$F(\mathbf{X}^{(k+1)}) < F(\mathbf{X}^{(k)}), \quad (2.6)$$

де $F(\mathbf{X}^{(k)}) = \sum_{i=1}^m \mathbf{f}_i^2(\mathbf{X}^{(k)})$ – сума квадратів нев'язок рівнянь системи (2.2);

m – кількість рівнянь системи (2.2).

Ітераційний процес закінчується за виконання умови, коли приріст $\Delta\mathbf{X}^{(k)}$ чи сума квадратів нев'язок $F(\mathbf{X}^{(k)})$ стають меншими заданих значень.

Рівняння математичної моделі ЕТК можна формувати як в а.о., так і у відносних одиницях. Однак, з метою зменшення похибок обчислень, які можуть зростати внаслідок значної розбіжності числових значень параметрів

елементів і координат режиму, використано систему відносних одиниць.

У цій роботі рівняння математичної моделі ЕТК сформовані у відносних одиницях. Рівняння математичних моделей окремих елементів моделі сформовані у відносних одиницях із використанням характерної для відповідного елемента системи базових величин. Для зв'язку між математичними моделями однотипних елементів застосовано такі коефіцієнти переходу між системами базових величин.

$$k_{[ВЕЛИЧИНА],[ЕЛЕМЕНТ]_n} = \frac{[ВЕЛИЧИНА]_{[ЕЛЕМЕНТ]_n}}{[ВЕЛИЧИНА]_{[ЕЛЕМЕНТ]_б}}, \quad (2.7)$$

де [ВЕЛИЧИНА] – назва фізичної величини;

[ЕЛЕМЕНТ] – назва однотипного елемента моделі;

n – порядковий номер однотипного елемента моделі;

$k_{[ВЕЛИЧИНА],[ЕЛЕМЕНТ]_n}$ – коефіцієнт переходу між системами базових [ВЕЛИЧИН] для n-го однотипного [ЕЛЕМЕНТА] моделі;

$[ВЕЛИЧИНА]_{[ЕЛЕМЕНТ]_n}$ – базове значення [ВЕЛИЧИНИ] для n-го однотипного [ЕЛЕМЕНТА] моделі (як правило – номінальне значення);

$[ВЕЛИЧИНА]_{[ЕЛЕМЕНТ]_б}$ – спільне для всіх однотипних [ЕЛЕМЕНТІВ] моделі базове значення [ВЕЛИЧИНИ].

Надалі, за спільне для всіх однотипних елементів моделі базове значення величини обиратимемо базове значення цієї величини для 1-го з них:

$$[ВЕЛИЧИНА]_{[ЕЛЕМЕНТ]_б} = [ВЕЛИЧИНА]_{[ЕЛЕМЕНТ]_б_1}. \quad (2.8)$$

Окремо слід зазначити, що в подальшому коефіцієнти зв'язку між системами базових величин будуть уведені лише в рівняння математичних моделей помпи та двигунів, оскільки вони завжди зв'язані між собою спільним валом, а номінальні частоти обертання помп і двигунів досить часто дещо відрізняються. У подальшому в рівняннях математичних моделей окремих елементів зазначені коефіцієнти зв'язку не введено (з метою уникнення надмірного перевантаження викладу); вони будуть вводиться за потребою під час формування математичної моделі конкретного об'єкта.

2.2 Математичні моделі складових електротехнічного комплексу "електропостачальна система – помпова станція"

2.2.1 Відцентрова помпа

Основні припущення.

1. Робоче колесо помпи обертається з усталеною частотою.
2. Температурний режим помпи є усталеним, що означає незмінність температури робочої рідини внаслідок будь-якого теплообміну зі зовнішнім середовищем.
3. Робоча рідина помпи є однорідною.
4. Робоча рідина помпи є нестисливою (її густина є сталою).
5. Зображальні вектори об'ємної витрати та напору робочої рідини на виході робочого колеса відцентрової помпи є колінеарними [93, 94].
6. Параметри електричної заступної схеми відцентрової помпи визначаються за методикою [93, 94].

Відцентрова помпа, просторова будова якої показана на рисунку 2.1 [93, 94], складається з нерухомих підводу, спіральної та прямої (вихідної) частин відводу, рухомого обертового робочого колеса. Вектори швидкості \mathbf{c} елемента рідини й сили \mathbf{F} , яка діє на нього, та відповідні ним зображальні вектори напору й витрати (надалі – "вектори") можна розглядати в площинах двох систем координат: 1) жорстко зв'язаній з підводом і відводом нерухомій системі x - y , 2) жорстко зв'язаній з обертовим робочим колесом рухомій системі d - q .

У підводі рідина рухається перпендикулярно до площини x - y і є нерухомою в цій системі; тому в точці 1 проєкції векторів на осі x - y рівні нулю. У прямій частині відводу рідина рухається тільки вздовж осі y ; тому в точці 3 проєкції векторів на вісь x рівні нулю, а на вісь y є сталими в часі. Якщо еквівалентувати ділянки з рідиною круглими трубопроводами зі сталими поперечними перерізами, то можна вважати, що зміна координат режиму рідини відбувається лише під час її руху від точки 1 до точки 3. На цій ділянці робоче колесо, яке змушує рухатись елемент рідини 2, здійснює

один повний оберт. Відповідно до цього вектори, показані в рухомій точці 2, рухаються разом з робочим колесом у системі координат $x-y$ і є нерухомими в системі координат $d-q$.

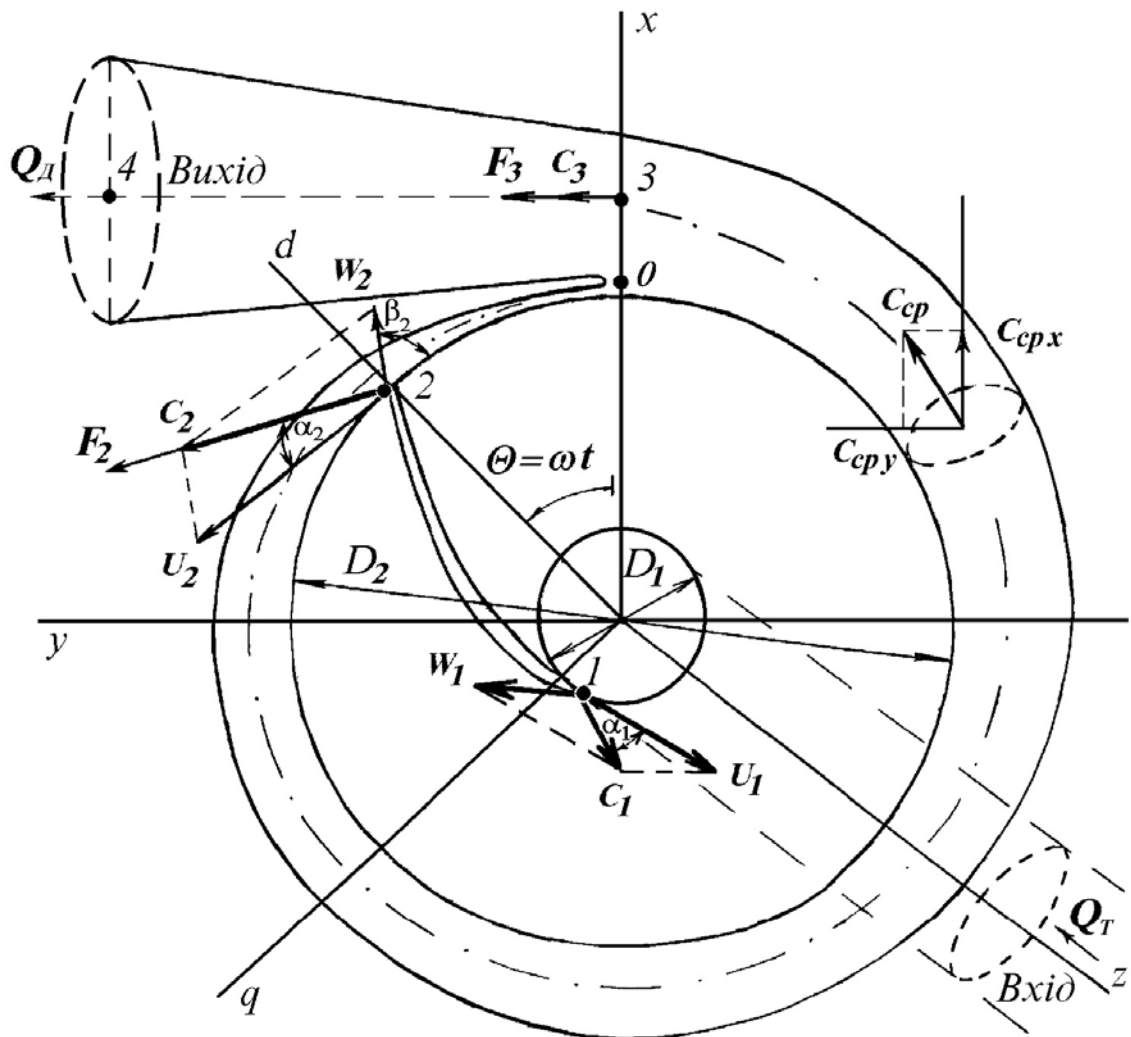


Рис. 2.1 Просторова будова відцентрової помпи

Згідно [93, 94] проекції векторів елемента рідини, показані в рухомій точці 2, на осі $x-y$ змінюються в часі і є гармонійними функціями кута повороту робочого колеса. Рух рідини в спіральному відводі на ділянці від точки 1 до точки 3 описується в системі координат $x-y$ диференціальними рівняннями з періодичними коефіцієнтами у вигляді змінних у часі дисипативного опору та гідравлічної індуктивності.

Згідно [93, 94] проекції векторів елемента рідини, показані в рухомій точці 2, на осі $d-q$ є сталими в часі й не залежать від кута повороту робочого колеса. Рух рідини в спіральному відводі на ділянці від точки 1 до точки 3

описується в системі координат $d-q$ диференційними рівняннями зі сталими коефіцієнтами у вигляді сталих дисипативного опору та гідравлічної індуктивності. Це дозволяє застосувати метод ЕГДА для математичного моделювання ВП, значно спрощує визначення параметрів її елементів і розв'язання системи рівнянь ММ.

Зважаючи на наведене, з метою формалізації формування ММ усталених режимів узагальненого ЕТК за основу взято розгорнуту заступну схему ВП [92, 93, 94, 96], зображену на рисунку 2.2.

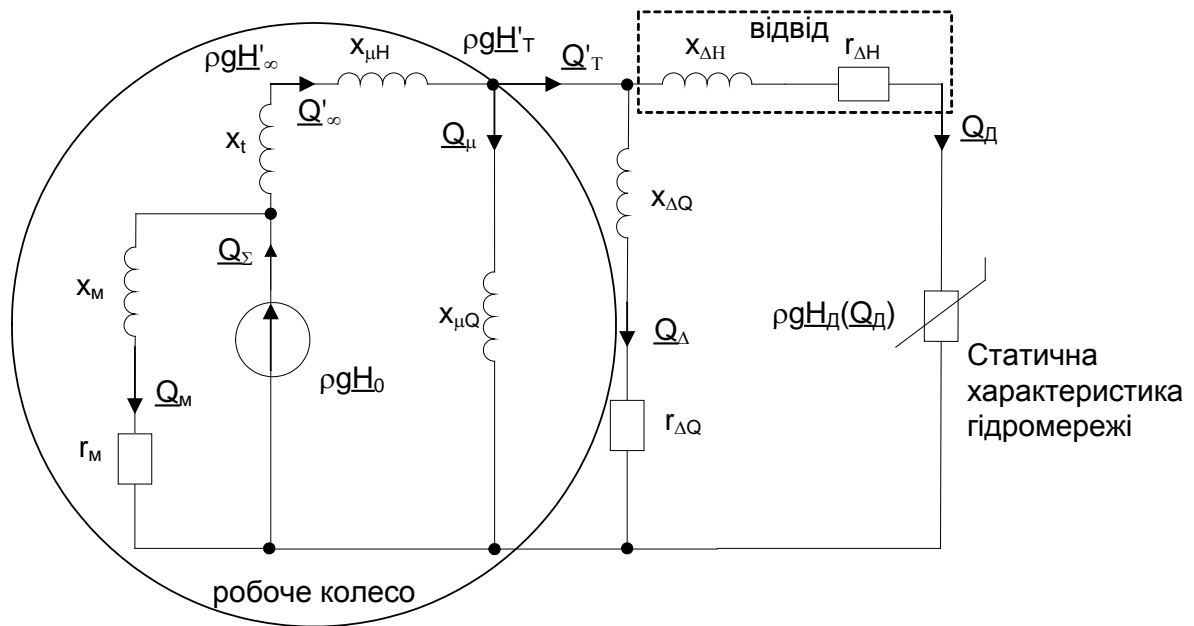


Рис. 2.2 Заступна електрична схема відцентрової помпи

Рівняння ММ усталених режимів ВП складені на підставі ЕГДА з урахуванням усіх дисипативних втрат енергії в елементах помпи (дифузори, спіральному відводі, ущільненнях тощо), що враховується дисипативними гідроопорами. Інерційні властивості рідини, які не спричиняють дисипативних втрат енергії в елементах помпи, враховані в реактивних гідроопорах заступної схеми.

Наведені [93, 94] рівняння ММ усталених режимів ВП, записані в методі законів Кірхгофа в а.о. в комплексній формі, мають такий вигляд:

$$\underline{Q}_{\Sigma_i} - \underline{Q}_{M_i} - \underline{Q}'_{\infty_i} = 0; \quad (2.9)$$

$$\underline{Q}'_{\infty_i} - \underline{Q}_{\mu_i} - \underline{Q}'_{T_i} = 0; \quad (2.10)$$

$$\underline{Q}'_{T_i} - \underline{Q}_{\Delta_i} - \underline{Q}_{d_i} = 0; \quad (2.11)$$

$$\left(r_{M_i} + jx_{M_i} \right) \underline{Q}_{M_i} = \rho g \underline{H}_{0_i}; \quad (2.12)$$

$$j \left(x_{t_i} + x_{\mu H_i} \right) \underline{Q}'_{\infty_i} + jx_{\mu Q_i} \underline{Q}_{\mu_i} = \rho g \underline{H}_{0_i}; \quad (2.13)$$

$$\left(r_{\Delta Q_i} + jx_{\Delta Q_i} \right) \underline{Q}_{\Delta_i} - jx_{\mu Q_i} \underline{Q}_{\mu_i} = 0; \quad (2.14)$$

$$\left(r_{\Delta Q_i} + jx_{\Delta Q_i} \right) \underline{Q}_{\Delta_i} - \left(r_{\Delta H_i} + jx_{\Delta H_i} \right) \underline{Q}_{d_i} = \rho g \underline{H}_{d_i}, \quad (2.15)$$

де для ВП i -го агрегата:

\underline{Q}_{M_i} – розрахункові об'ємні втрати рідини, спричинені силами дискового тертя та гідравлічним гальмуванням;

\underline{Q}_{μ_i} – розрахункові об'ємні втрати рідини, спричинені скінченною кількістю лопатей;

\underline{Q}_{Δ_i} – розрахункові об'ємні втрати рідини через ущільнення;

\underline{Q}_{Σ_i} – сумарні розрахункові об'ємні витрати рідини;

$\underline{Q}'_{\infty_i}$ – розрахункові об'ємні витрати рідини ідеалізованої (без втрат та з нескінченною кількістю лопатей) ВП;

\underline{Q}'_{T_i} – розрахункові об'ємні витрати рідини теоретичної (без втрат та зі скінченною кількістю лопатей) ВП;

\underline{H}_{d_i} – дійсний напір рідини реальної ВП;

\underline{Q}_{d_i} – дійсна об'ємна витрата рідини;

\underline{H}_{0_i} – розрахунковий напір ідеалізованої ВП;

r_{M_i}, x_{M_i} – дисипативний і реактивний гідроопори, що відображають механічні втрати енергії внаслідок дискового тертя та гідравлічного гальмування;

$r_{\Delta H_i}, x_{\Delta H_i}$ – дисипативний і реактивний гідроопори, що відображають гідравлічні втрати в спіральному відводі;

$r_{\Delta Q_i}, x_{\Delta Q_i}$ – дисипативний і реактивний гідроопори, що відображають вплив зворотних зв'язків через ущільнення на тиск рідини;

x_{ti} – внутрішній реактивний гідроопір;

$x_{\mu Qi}$, $x_{\mu Ni}$ – реактивні гідроопори, що враховують відповідно вплив скінченої кількості лопатей робочого колеса на її тиск і об'ємну витрату рідини.

Із метою формалізації запису рівнянь записуємо рівняння (2.9)..(2.15) у площині дійсних чисел у жорстко зв'язаних із робочим колесом $d-q$ координатах у в.о. з використанням такої системи основних базових величин:

$$\omega_{ВПб_i} = \omega_{ВПрном_i} ; \quad (2.16)$$

$$H_{ВП.б_i} = H_{ВПн_i} ; \quad (2.17)$$

$$Q_{ВП.б_i} = Q_{ВПн_i} ; \quad (2.18)$$

$$M_{ВПб_i} = S_{ВПб_i} / \omega_{ВПб_i} = \rho g H_{ВПн_i} Q_{ВПн_i} / \omega_{ВПб_i} ; \quad (2.19)$$

$$Z_{ВПб_i} = \rho g H_{ВПн_i} / Q_{ВПн_i} ; \quad (2.20)$$

$$k_{vб_i} = k_{vном_i} , \quad (2.21)$$

де для ВП i -го агрегата:

$\omega_{ВПрном_i}$ – номінальна частота обертання робочого колеса;

$H_{ВПн_i}$, $Q_{ВПн_i}$, $S_{ВПн_i}$, $Z_{ВПн_i}$ – відповідно номінальні гідравлічний напір, об'ємна витрата рідини, потужність і гідроопір;

$k_{vном_i}$ – кінематична в'язкість робочої рідини за номінальних умов;

ρ , g – відповідно густина рідини та пришвидшення вільного падіння.

В результаті, з урахуванням (2.16)..(2.19), отримуємо у в.о. (в позначеннях за винятком частоти ω та в'язкості k_v не застосовуємо знак * для уникнення громіздкості запису):

$$Q_{\Sigma d_i} - Q_{M d_i} - Q'_{\infty d_i} = 0 ; \quad (2.22)$$

$$Q_{\Sigma q_i} - Q_{M q_i} - Q'_{\infty q_i} = 0 , \quad (2.23)$$

$$Q'_{\infty d_i} - Q_{\mu d_i} - Q'_{T d_i} = 0 ; \quad (2.24)$$

$$Q'_{\infty q_i} - Q_{\mu q_i} - Q'_{T q_i} = 0 ; \quad (2.25)$$

$$Q'_{T d_i} - Q_{\Delta d_i} - Q_{\Delta d_i} = 0 ; \quad (2.26)$$

$$Q'_{Tq_i} - Q_{dq_i} - Q_{\Delta q_i} = 0; \quad (2.27)$$

$$r_{M_i} Q_{Md_i} - x_{M_i} Q_{Mq_i} - H_{0d_i} = 0; \quad (2.28)$$

$$x_{M_i} Q_{Md_i} + r_{M_i} Q_{Mq_i} - H_{0q_i} = 0; \quad (2.29)$$

$$(x_{t_i} + x_{\mu H_i}) Q'_{\infty q_i} + x_{\mu Q_i} Q_{\mu q_i} + H_{0d_i} = 0; \quad (2.30)$$

$$(x_{t_i} + x_{\mu H_i}) Q'_{\infty d_i} + x_{\mu Q_i} Q_{\mu d_i} - H_{0q_i} = 0; \quad (2.31)$$

$$x_{\mu Q_i} Q_{\mu q_i} + r_{\Delta Q_i} Q_{\Delta d_i} - x_{\Delta Q_i} Q_{\Delta q_i} = 0; \quad (2.32)$$

$$r_{\Delta Q_i} Q_{\Delta q_i} + x_{\Delta Q_i} Q_{\Delta d_i} - x_{\mu Q_i} Q_{\mu d_i} = 0; \quad (2.33)$$

$$x_{\Delta H_i} Q_{dq_i} - r_{\Delta H_i} Q_{dd_i} + r_{\Delta Q_i} Q_{\Delta d_i} - x_{\Delta Q_i} Q_{\Delta q_i} - H_{dd_i} = 0; \quad (2.34)$$

$$x_{\Delta Q_i} Q_{\Delta d_i} + r_{\Delta Q_i} Q_{\Delta q_i} - x_{\Delta H_i} Q_{dd_i} - r_{\Delta H_i} Q_{dq_i} - H_{dq_i} = 0, \quad (2.35)$$

де індексами $d-q$ позначено відповідні проекції зображальних векторів координат режиму ВП на осі $d-q$.

Згідно [93, 94], індуктивні гідроопори x_{k_i} ВП i -го агрегата, що входять до складу рівнянь (2.12)..(2.15) і (2.22)..(2.35) в усталених режимах є прямо пропорційними до частоти обертання ω_{p_i} робочого колеса ВП i -го агрегата:

$$x_{k_i} = \omega_{p_i} M_{k_i}, \quad (2.36)$$

де M_{k_i} – відповідна гідроіндуктивність.

За методикою [93, 94] номінальні значення $x_{кном_i}$ індуктивних гідроопорів обчислюються за номінальної частоти $\omega_{ВПрном_i}$:

$$x_{кном_i} = \omega_{ВПрном_i} M_{k_i}. \quad (2.37)$$

Таким чином, отримуємо формулу для обчислення індуктивних гідроопорів x_{k_i} для відмінної від номінальної частоти обертання:

$$x_{k_i} = x_{кном_i} \omega_{p_i} / \omega_{ВПрном_i} = x_{кном_i} \omega_{p_i} / \omega_{ВПб_i} = \omega_{p^*b_i} x_{кном_i}, \quad (2.38)$$

де $\omega_{p^*b_i}$ – поточне значення частоти обертання робочого колеса ВП i -го агрегату у в.о. (2.16).

Згідно [93, 94], активні гідроопори r_{k_i} ВП i -го агрегата, що входять до складу рівнянь (2.12)..(2.15) і (2.28)..(2.35) в усталених режимах є прямо

пропорційними до кінематичної в'язкості робочої рідини k_{v_i} помпи. За методикою [93, 94] значення r_{k_i} гідроопорів обчислюються для в'язкості робочої рідини ВП за номінальних умов робочої рідини. Але в'язкість робочої рідини може відрізнятись від номінального значення залежно від температури та інших факторів [218]. Тому, з метою врахування впливу в'язкості робочої рідини на усталені режими агрегату, аналогічно до (2.38) отримуємо формулу для обчислення активних гідроопорів у разі відхилення фактичної в'язкості рідини від номінального значення:

$$r_{k_i} = k_{v^*b_i} r_{kном_i} \quad (2.39)$$

де $k_{v^*b_i} = k_{v_i} / k_{vб}$ – поточне значення в'язкості робочої рідини у в.о. відцентрової помпи i -го агрегату за номінальних умов.

Рівняння (2.12)..(2.15) і (2.28)..(2.35) записані для номінальної частоти обертання робочого колеса помпи. Згідно [93, 94], модуль розрахункового напору H_0 ідеалізованої ВП є прямо пропорційним квадрату частоти обертання робочого колеса. Тому, на підставі експериментально підтвердженої гіпотези про автотельність усталених режимів відцентрових гідромашин [94] для частотно керованої ВП зв'язок модуля фазору \underline{H}_0 з його проекціями на ортогональні обертові d - q осі та відносною коловою частотою обертання робочого колеса встановлено рівнянням:

$$\sqrt{H_{0d_i}^2 + H_{0q_i}^2} - \omega_{p^*b_i}^2 H_{0ном_i} = 0, \quad (2.40)$$

де $H_{0ном_i}$ – розрахунковий напір ідеалізованої ВП i -го агрегату в неробочому режимі з номінальною коловою частотою обертання робочого колеса.

Установлюючи зв'язок зображальних векторів витрат і напорів з їхніми проекціями на ортогональні обертові осі d - q , отримуємо рівняння реальної ВП i -го агрегату, якими слід доповнити систему (2.22)..(2.35):

$$Q_{dd_i} - \sqrt{Q_{dd_i}^2 + Q_{dq_i}^2} \cos(\Psi_{0Q_{di}}) = 0; \quad (2.41)$$

$$Q_{dq_i} - \sqrt{Q_{dd_i}^2 + Q_{dq_i}^2} \sin(\Psi_{0Q_{di}}) = 0; \quad (2.42)$$

$$H_{дd_i} - \sqrt{H_{дd_i}^2 + H_{дq_i}^2} \cos(\Psi_{0H_{дi}}) = 0; \quad (2.43)$$

$$H_{дq_i} - \sqrt{H_{дd_i}^2 + H_{дq_i}^2} \sin(\Psi_{0H_{дi}}) = 0, \quad (2.44)$$

де $\sqrt{Q_{дd_i}^2 + Q_{дq_i}^2} = Q_{дi}$ – дійсна об'ємна витрата рідини;

$\sqrt{H_{дd_i}^2 + H_{дq_i}^2} = H_{дi}$ – дійсний напір;

$\Psi_{0Q_{дi}}$, $\Psi_{0H_{дi}}$ – відповідно початкові фази зображальних векторів дійсної об'ємної витрати та дійсного напору.

Керуючись припущенням про колінеарність зображальних векторів об'ємної витрати $Q_{дi}$ та напору $H_{дi}$ рідини на виході робочого колеса ВП ($\Psi_{0Q_{дi}} = \Psi_{0H_{дi}} = \Psi_{0QH_{дi}}$), остаточно отримуємо рівняння:

$$Q_{дi} - \sqrt{Q_{дd_i}^2 + Q_{дq_i}^2} \cos(\Psi_{0QH_{дi}}) = 0; \quad (2.45)$$

$$H_{дd_i} Q_{дq_i} - H_{дq_i} Q_{дd_i} = 0, \quad (2.46)$$

якими доповнюємо систему (2.22)..(2.35).

Таким чином, отримуємо математичну модель усталених режимів ВП i -го агрегата, яка складається з 18 рівнянь (2.22)..(2.35), (2.45),(2.46) з урахуванням (2.38)..(2.40):

$$Q_{\Sigma d_i} - Q_{мd_i} - Q'_{\infty d_i} = 0; \quad (2.47)$$

$$Q_{\Sigma q_i} - Q_{мq_i} - Q'_{\infty q_i} = 0, \quad (2.48)$$

$$Q'_{\infty d_i} - Q_{\mu d_i} - Q'_{T d_i} = 0; \quad (2.49)$$

$$Q'_{\infty q_i} - Q_{\mu q_i} - Q'_{T q_i} = 0; \quad (2.50)$$

$$Q'_{T d_i} - Q_{дd_i} - Q_{\Delta d_i} = 0; \quad (2.51)$$

$$Q'_{T q_i} - Q_{дq_i} - Q_{\Delta q_i} = 0; \quad (2.52)$$

$$k_{v*\delta_i} r_{мном_i} Q_{мd_i} - \omega_{p*\delta_i} x_{мном_i} Q_{мq_i} - H_{0d_i} = 0; \quad (2.53)$$

$$\omega_{p*\delta_i} x_{мном_i} Q_{мd_i} + k_{v*\delta_i} r_{мном_i} Q_{мq_i} - H_{0q_i} = 0; \quad (2.54)$$

$$\omega_{p*\delta_i} (x_{тном_i} + x_{\mu Hном_i}) Q'_{\infty q_i} + \omega_{p*\delta_i} x_{\mu Qном_i} Q_{\mu q_i} + H_{0d_i} = 0; \quad (2.55)$$

$$\omega_{p^* \delta_i} \left(X_{\text{тнoм}_i} + X_{\mu \text{ннoм}_i} \right) Q'_{\infty d_i} + \omega_{p^* \delta_i} X_{\mu \text{Qнoм}_i} Q_{\mu d_i} - H_{0q_i} = 0; \quad (2.56)$$

$$\omega_{p^* \delta_i} X_{\mu \text{Qнoм}_i} Q_{\mu q_i} + k_{v^* \delta_i} r_{\Delta \text{Qнoм}_i} Q_{\Delta d_i} - \omega_{p^* \delta_i} X_{\Delta \text{Qнoм}_i} Q_{\Delta q_i} = 0; \quad (2.57)$$

$$k_{v^* \delta_i} r_{\Delta \text{Qнoм}_i} Q_{\Delta q_i} + \omega_{p^* \delta_i} X_{\Delta \text{Qнoм}_i} Q_{\Delta d_i} - \omega_{p^* \delta_i} X_{\mu \text{Qнoм}_i} Q_{\mu d_i} = 0; \quad (2.58)$$

$$\omega_{p^* \delta_i} X_{\Delta \text{ннoм}_i} Q_{\Delta q_i} - k_{v^* \delta_i} r_{\Delta \text{ннoм}_i} Q_{\Delta d_i} + k_{v^* \delta_i} r_{\Delta \text{Qнoм}_i} Q_{\Delta d_i} - \omega_{p^* \delta_i} X_{\Delta \text{Qнoм}_i} Q_{\Delta q_i} - H_{\Delta d_i} = 0; \quad (2.59)$$

$$\omega_{p^* \delta_i} X_{\Delta \text{Qнoм}_i} Q_{\Delta d_i} + k_{v^* \delta_i} r_{\Delta \text{Qнoм}_i} Q_{\Delta q_i} - \omega_{p^* \delta_i} X_{\Delta \text{ннoм}_i} Q_{\Delta d_i} - k_{v^* \delta_i} r_{\Delta \text{ннoм}_i} Q_{\Delta q_i} - H_{\Delta q_i} = 0; \quad (2.60)$$

$$\sqrt{H_{0d_i}^2 + H_{0q_i}^2} - H_{0\text{нoм}_i} \omega_{p^* \delta_i}^2 = 0; \quad (2.61)$$

$$Q_{\Delta d_i} - \sqrt{Q_{\Delta d_i}^2 + Q_{\Delta q_i}^2} \cos(\Psi_{0\text{QH}_{\Delta d_i}}) = 0; \quad (2.62)$$

$$H_{\Delta d_i} Q_{\Delta q_i} - H_{\Delta q_i} Q_{\Delta d_i} = 0; \quad (2.63)$$

$$\sqrt{H_{\Delta d_i}^2 + H_{\Delta q_i}^2} - H(Q_{\Delta d_i}) = 0 \quad (2.64)$$

де $\Psi_{0\text{QH}_{\Delta d_i}}$ – може набувати довільних значень.

Для однозначного розв'язку системи рівнянь (2.47)..(2.64) необхідно задати значення будь-якої одної невідомої. В результаті ми можемо отримати функційні залежності координат усталеного режиму чи необхідних за певними критеріями значень параметрів елементів від заданої невідомої.

Розмаїття методів керування режимами ВП докладно розглянуто в 2.3 .Тут обмежимося лише тими, застосування яких необхідно врахувати в математичній моделі відцентрової помпи. Розглянемо два методи: конструкційна зміна параметрів помпи та зміна умов функціонування помпи. Конструкційна зміна параметрів помпи не потребує окремого опису, оскільки вона відображається в зміні параметрів заступної схеми самої помпи, обчислення яких не є задачею даної роботи. Зміна умов функціонування помпи відображається в зовнішніх пристроях, які впливають на режим ВП.

Основними способами зміни умов функціонування помпи є частотне керування двигуном агрегату та зміна характеристик гідромережі шляхом дроселювання, байпасування та керування всмоктувальною засувкою [51, 52, 134, 212]. Економічна доцільність упровадження частотно керованого електроприводу ВП залежить від вартості електроенергії й устаткування,

технологічного графіка витрат робочої рідини, кількості та параметрів спільно працюючих агрегатів [4, 6, 15, 93, 94, 121, 142, 143, 186]. Тому, незважаючи на високу ефективність частотного керування гідравлічними режимами ПС, виняткове його застосування не завжди є економічно доцільним. Крім того, дроселювання та байпасування є поширеними способами керування режимами помпи, що необхідно відобразити в ММ.

Застосування всмоктувальної засувки i -ї помпи зумовлює фіктивне збільшення висоти всмоктування на $\Delta H_{з_i}$ в а.о. [212]:

$$\Delta H_{з_i} = \xi_{з_i} Q_{д_i}^2 / (2gA_{з_i}^2), \quad (2.65)$$

де $A_{з_i}$ – площа вільного поперечного перерізу всередині корпуса всмоктувальної засувки;

$\xi_{з_i}$ – коефіцієнт опору всмоктувальної засувки, значення якого для різних ступенів відкриття засувки наведено в таблиці 2.1 [212].

Таблиця 2.1

Залежність коефіцієнта опору всмоктувальної засувки від ступеня її відкриття

Ступінь відкриття всмоктувальної засувки	8/8	6/8	4/8	2/8	1/8
Коефіцієнт опору всмоктувальної засувки	0,09	0,41	3,27	22,08	83,0

Керування всмоктувальною засувкою є, насамперед, відсутність помпажу, стала висота всмоктування, зменшення витрат енергії в помпі внаслідок зниження її напірної характеристики (зменшується значення Q_d за нульового напору, а значення H_d за нульової витрати не змінюється), простота й невелика вартість. Однак, збільшення висоти всмоктування i , внаслідок цього – розрідження у всмоктувальному патрубку понад критичне значення зумовлює кавітацію, порушує стійкість, створює небезпеку зриву роботи й значно скорочує термін експлуатації ВП. Тому цей спосіб регулювання широко не застосовується [134] й не враховується в ММ.

Зважаючи на викладене, вбачається доцільним відобразити дроселювання та байпасування в складі математичної моделі ВП, оскільки дросельні засувки та байпаси встановлюються безпосередньо на виходах

гідротрактів pomp, причому, можливе комбіноване їхнє застосування.

Кількість рівнянь ММ моделі помпи можна зменшити до 9-и порівняно з 18-и шляхом еквівалентного перетворення схеми, що на рисунку 2.2. з урахуванням дроселя та байпаса отримуємо перетворену заступну схему ВП:

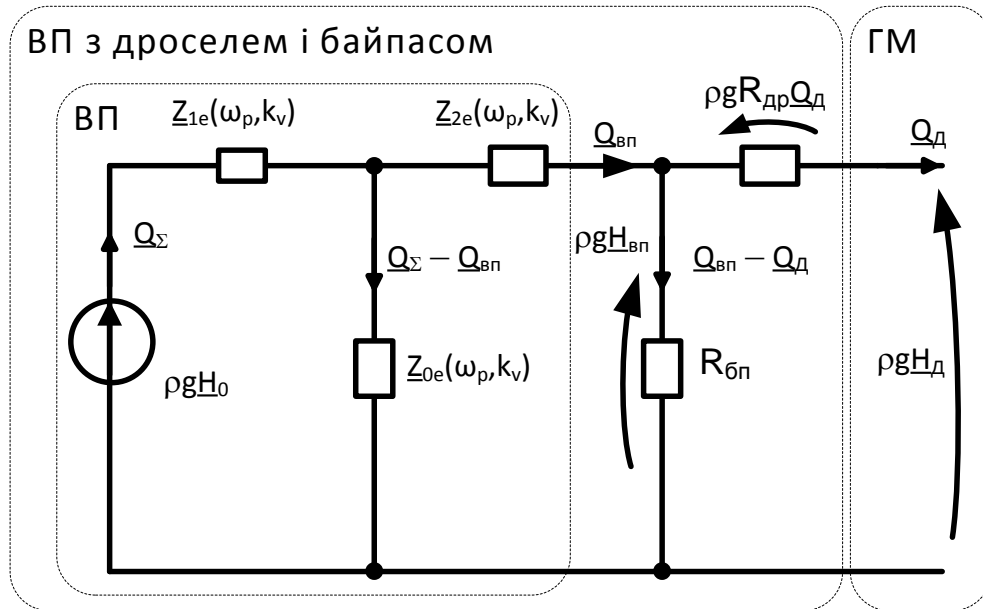


Рис. 2.3 Перетворена заступна схема відцентрової помпи

На підставі цієї схеми сформовано перетворену ММ помпи i -го ВПТА:

$$(R_{0ei} + R_{1ei})Q_{\Sigma di} - (X_{0ei} + X_{1ei})Q_{\Sigma qi} - R_{0ei}Q_{вп di} + X_{0ei}Q_{вп qi} - H_{0di} = 0; \quad (2.66)$$

$$(X_{0ei} + X_{1ei})Q_{\Sigma di} + (R_{0ei} + R_{1ei})Q_{\Sigma qi} - X_{0ei}Q_{вп di} - R_{0ei}Q_{вп qi} - H_{0qi} = 0; \quad (2.67)$$

$$-R_{0ei}Q_{\Sigma di} + X_{0ei}Q_{\Sigma qi} + (R_{0ei} + R_{2ei})Q_{вп di} - (X_{0ei} + X_{2ei})Q_{вп qi} + H_{вп di} = 0; \quad (2.68)$$

$$-X_{0ei}Q_{\Sigma di} - R_{0ei}Q_{\Sigma qi} + (X_{0ei} + X_{2ei})Q_{вп di} + (R_{0ei} + R_{2ei})Q_{вп qi} + H_{вп qi} = 0; \quad (2.69)$$

$$\sqrt{H_{0di}^2 + H_{0qi}^2} - H_{0ном i} (k_{\omega, ВП i} \omega_p * \delta_i)^2 = 0; \quad (2.70)$$

$$Q_{вп di} - \sqrt{Q_{вп di}^2 + Q_{вп qi}^2} \cos(\Psi_{0QHВП i}) = 0; \quad (2.71)$$

$$Q_{вп di} H_{вп qi} - Q_{вп qi} H_{вп di} = 0; \quad (2.72)$$

$$\sqrt{H_{вп di}^2 + H_{вп qi}^2} - R_{др i} Q_{д i} - H_{д i} = 0; \quad (2.73)$$

$$\sqrt{Q_{вп di}^2 + Q_{вп qi}^2} - \frac{H_{д i}}{R_{бп i}} - Q_{д i} = 0, \quad (2.74)$$

де $k_{\omega, ВП i} = \omega_{\delta i} / \omega_{ВП \delta i}$ – коефіцієнт зв'язку між системами базових величин ВП

та двигуна за частотою обертання спільного вала; ω_{σ_i} – базове значення частоти, за якого обчислюється $\omega_{p*\sigma_i}$;

Q_{d_i} , H_{d_i} – відповідно дійсна об’ємна витрата рідини та дійсний напір з урахуванням дроселя та байпаса реальної відцентрової помпи i -го агрегата; $R_{др_i}$, $R_{бп_i}$ – еквівалентні дисипативні гідроопори дроселя та байпаса, які є функціями кутів повороту [8, 56, 57] засувки i , в кінцевому випадку, залежать від дійсних об’ємної витрати та напору Q_{d_i} , H_{d_i} рідини;

$\sqrt{Q_{впд_i}^2 + Q_{впқ_i}^2} = Q_{вп_i}$ та $\sqrt{H_{впд_i}^2 + H_{впқ_i}^2} = H_{вп_i}$ – відповідно дійсна об’ємна витрата рідини та дійсний напір реальної ВП i -го агрегату без урахування дроселя та байпаса;

R_{lei} , X_{lei} , R_{2ei} , X_{2ei} , R_{0ei} , X_{0ei} – еквівалентні дисипативні та індуктивні гідроопори ВП. Ці опори виражаються через опори схеми, що на рисунку 2.2, внаслідок її еквівалентного перетворення в схему, що на рис. 2.3, і є функціями в’язкості робочої рідини $k_{v*\sigma_i}$ та частоти обертання робочого колеса ВП $\omega_{p*\sigma_i}$, що необхідно враховувати під час диференціювання системи рівнянь (2.66)..(2.74). Їхній вираз наведено в (2.77).

У матрично-векторній формі рівняння (2.66)..(2.74) перетвореної математичної моделі ВП i -го агрегату набувають вигляду:

$$\mathbf{f}_{вп_i}(\mathbf{X}_{вп_i}) = \mathbf{0}, \quad (2.75)$$

де $\vec{\mathbf{X}}_{вп_i} = (R_{др_i}, R_{бп_i}, Q_{\Sigma d_i}, Q_{\Sigma q_i}, Q_{впд_i}, Q_{впқ_i}, Q_{d_i}, H_{0d_i}, H_{0q_i}, H_{впд_i}, H_{впқ_i}, H_{d_i}, \omega_{r*\sigma_i})_t$ – вектор-стовпець координат режиму ВП i -го агрегата.

Матриця Якобі $\mathbf{W}_{вп_i}$ системи рівнянь (2.66)..(2.74) ВП i -го агрегату має вигляд (2.76). Для однозначного розв’язання системи 9 рівнянь (2.66)..(2.74) з 13 невідомими необхідно доповнити цю систему ММ гідромережі, ММ керування двома засувками. У результаті отримуємо систему з 12 рівнянь з 13 невідомими.

$$\mathbf{W}_{\text{вп}_i} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & W_{13\text{вп}_i} & W_{14\text{вп}_i} & -R_{0ei} & X_{0ei} & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & W_{1,13\text{вп}_i} \\ 0 & 0 & W_{23\text{вп}_i} & W_{24\text{вп}_i} & -X_{0ei} & -R_{0ei} & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & W_{2,13\text{вп}_i} \\ 0 & 0 & -R_{0ei} & X_{0ei} & W_{35\text{вп}_i} & W_{36\text{вп}_i} & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & W_{3,13\text{вп}_i} \\ 0 & 0 & -X_{0ei} & -R_{0ei} & W_{45\text{вп}_i} & W_{46\text{вп}_i} & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & W_{4,13\text{вп}_i} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & W_{58\text{вп}_i} & W_{59\text{вп}_i} & 0 & 0 & 0 & W_{5,13\text{вп}_i} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & W_{65\text{вп}_i} & W_{66\text{вп}_i} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & H_{\text{вп}qi} & -H_{\text{вп}di} & 0 & 0 & 0 & -Q_{\text{вп}qi} & Q_{\text{вп}di} & 0 & 0 \\ -Q_{\text{д}_i} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & W_{8,10\text{вп}_i} & W_{8,11\text{вп}_i} & -1 & 0 \\ 0 & H_{\text{д}_i}/R_{\text{бп}_i}^2 & 0 & 0 & W_{95\text{вп}_i} & W_{96\text{вп}_i} & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1/R_{\text{бп}_i} & 0 \end{pmatrix}, \quad (2.76)$$

де $W_{13\text{вп}_i} = R_{0ei} + R_{1ei}$; $W_{14\text{вп}_i} = -X_{0ei} - X_{1ei}$; $W_{1,13\text{вп}_i} = Q_{\text{Sdi}} dR_{1ei}/d\omega_{p^*\text{б}_i} - Q_{\text{Sqi}} dX_{1ei}/d\omega_{p^*\text{б}_i} + (Q_{\text{Sdi}} - Q_{\text{д}_i}) dR_{0ei}/d\omega_{p^*\text{б}_i} - (Q_{\text{Sqi}} - Q_{\text{д}_i}) dX_{0ei}/d\omega_{p^*\text{б}_i}$; $W_{23\text{вп}_i} = X_{0ei} + X_{1ei}$; $W_{24\text{вп}_i} = R_{0ei} + R_{1ei}$; $W_{2,13\text{вп}_i} = Q_{\text{Sqi}} dR_{1ei}/d\omega_{p^*\text{б}_i} + Q_{\text{Sdi}} dX_{1ei}/d\omega_{p^*\text{б}_i} + (Q_{\text{Sqi}} - Q_{\text{д}_i}) dR_{0ei}/d\omega_{p^*\text{б}_i} + (Q_{\text{Sdi}} - Q_{\text{д}_i}) dX_{0ei}/d\omega_{p^*\text{б}_i}$; $W_{35\text{вп}_i} = R_{0ei} + R_{2ei}$; $W_{36\text{вп}_i} = -X_{0ei} - X_{2ei}$; $W_{3,13\text{вп}_i} = Q_{\text{д}_i} dR_{2ei}/d\omega_{p^*\text{б}_i} + Q_{\text{д}_i} dX_{2ei}/d\omega_{p^*\text{б}_i} - (Q_{\text{Sdi}} - Q_{\text{д}_i}) dR_{0ei}/d\omega_{p^*\text{б}_i} + (Q_{\text{Sqi}} - Q_{\text{д}_i}) dX_{0ei}/d\omega_{p^*\text{б}_i}$; $W_{45\text{вп}_i} = X_{0ei} + X_{2ei}$; $W_{46\text{вп}_i} = R_{0ei} + R_{2ei}$; $W_{4,13\text{вп}_i} = Q_{\text{д}_i} dR_{2ei}/d\omega_{p^*\text{б}_i} + Q_{\text{д}_i} dX_{2ei}/d\omega_{p^*\text{б}_i} + (Q_{\text{д}_i} - Q_{\text{Sqi}}) dR_{0ei}/d\omega_{p^*\text{б}_i} + (Q_{\text{д}_i} - Q_{\text{Sdi}}) dX_{0ei}/d\omega_{p^*\text{б}_i}$; $W_{58\text{вп}_i} = H_{0di}/\sqrt{H_{0d_i}^2 + H_{0q_i}^2}$; $W_{5,13\text{вп}_i} = -2H_{0\text{ном}_i} k_{w.\text{вп}_i} \omega_{p^*\text{б}_i}^2$; $W_{59\text{вп}_i} = H_{0qi}/\sqrt{H_{0d_i}^2 + H_{0q_i}^2}$; $W_{65\text{вп}_i} = 1 - Q_{\text{вп}di} \cos(\Psi_{0QH_{\text{вп}_i}})/\sqrt{Q_{\text{вп}di}^2 + Q_{\text{вп}qi}^2}$; $W_{66\text{вп}_i} = Q_{\text{вп}qi} \times \cos(\Psi_{0QH_{\text{вп}_i}})/\sqrt{Q_{\text{вп}di}^2 + Q_{\text{вп}qi}^2}$; $W_{8,10\text{вп}_i} = H_{\text{вп}di}/\sqrt{H_{0d_i}^2 + H_{0q_i}^2}$; $W_{8,11\text{вп}_i} = H_{\text{вп}qi}/\sqrt{H_{\text{вп}di}^2 + H_{\text{вп}qi}^2}$; $W_{95\text{вп}_i} = Q_{\text{вп}di}/\sqrt{Q_{\text{вп}di}^2 + Q_{\text{вп}qi}^2}$; $W_{96\text{вп}_i} = Q_{\text{вп}qi}/\sqrt{Q_{\text{вп}di}^2 + Q_{\text{вп}qi}^2}$.

$$R_{ke_i} = \text{Re}(Z_{ke_i}); X_{1e_i} = \text{Im}(Z_{ke_i}); k = 0..2, \quad (2.77)$$

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{1e_i} = & \left(k_{\omega.BП_i} \omega_{p^* \delta_i} (x_{тнoм_i} + x_{\mu Hнoм_i}) (k_{v^* \delta_i} r_{мнoм_i} + jk_{\omega.BП_i} \omega_{p^* \delta_i} x_{мнoм_i}) \right) / \left(k_{\omega.BП_i} \omega_{p^* \delta_i} \times \right. \\ & \times (x_{мнoм_i} + x_{тнoм_i} + x_{\mu Hнoм_i} + x_{\mu Qнoм_i} (k_{v^* \delta_i} r_{\Delta Qнoм_i} + jk_{\omega.BП_i} \omega_{p^* \delta_i} x_{\Delta Qнoм_i})) / k_{v^* \delta_i} r_{\Delta Qнoм_i} + \\ & \left. + jk_{\omega.BП_i} \omega_{p^* \delta_i} (x_{\Delta Qнoм_i} + x_{\mu Qнoм_i}) \right) - jk_{v^* \delta_i} r_{мнoм_i} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{2e_i} = & k_{v^* \delta_i} r_{\Delta Hнoм_i} + jk_{\omega.BП_i} \omega_{p^* \delta_i} x_{\Delta Hнoм_i} + \left(k_{\omega.BП_i} \omega_{p^* \delta_i} \right)^2 x_{\mu Qнoм_i} (x_{тнoм_i} + x_{\mu Hнoм_i}) \times \\ & \times (k_{\omega.BП_i} \omega_{p^* \delta_i} x_{\Delta Qнoм_i} - jk_{v^* \delta_i} r_{\Delta Qнoм_i}) / \left((k_{\omega.BП_i} \omega_{p^* \delta_i} (x_{\Delta Qнoм_i} + x_{\mu Qнoм_i}) - jk_{v^* \delta_i} r_{\Delta Qнoм_i}) \times \right. \\ & \times k_{\omega.BП_i} \omega_{p^* \delta_i} (x_{тнoм_i} + x_{\mu Hнoм_i} + x_{\mu Qнoм_i} (k_{v^* \delta_i} r_{\Delta Qнoм_i} + jk_{\omega.BП_i} \omega_{p^* \delta_i} x_{\Delta Qнoм_i})) / (k_{v^* \delta_i} r_{\Delta Qнoм_i} + \\ & \left. + jk_{\omega.BП_i} \omega_{p^* \delta_i} (x_{\mu Qнoм_i} + x_{\Delta Qнoм_i})) \right) - jk_{v^* \delta_i} r_{мнoм_i} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{0e_i} = & k_{\omega.BП_i} \omega_{p^* \delta_i} x_{\mu Qнoм_i} (k_{v^* \delta_i} r_{мнoм_i} + jk_{\omega.BП_i} \omega_{p^* \delta_i} x_{мнoм_i}) (k_{v^* \delta_i} r_{\Delta Qнoм_i} + \\ & + jk_{\omega.BП_i} \omega_{p^* \delta_i} x_{\Delta Qнoм_i}) / \left((k_{v^* \delta_i} r_{\Delta Qнoм_i} + jk_{\omega.BП_i} \omega_{p^* \delta_i} (x_{\mu Qнoм_i} + x_{\Delta Qнoм_i})) k_{\omega.BП_i} \omega_{p^* \delta_i} \times \right. \\ & \times (x_{мнoм_i} + x_{тнoм_i} + x_{\mu Hнoм_i} + x_{\mu Qнoм_i} (k_{v^* \delta_i} r_{\Delta Qнoм_i} + jk_{\omega.BП_i} \omega_{p^* \delta_i} x_{\Delta Qнoм_i})) / (k_{v^* \delta_i} r_{\Delta Qнoм_i} + \\ & \left. + jk_{\omega.BП_i} \omega_{p^* \delta_i} (x_{\Delta Qнoм_i} + x_{\mu Qнoм_i})) \right) - jk_{v^* \delta_i} r_{мнoм_i} \end{aligned}$$

Цю математичну модель ВП було використано, зокрема, для дослідження впливу параметрів pomp на усталені режими спільно працюючих електроприводних ВПТА з послідовним [234] та паралельним [42] сполучення гідротрактів pomp.

На рисунку 2.4 зображено сімейство напірно-витратних характеристик відцентрової помпи 14 НДсН за різних частот обертання робочого колеса. На рисунках 2.5 зображені три варіанти статичної механічної характеристики цієї ж помпи: 1 – за умови сталого гідравлічного опору зовнішньої гідромережі, а також – два граничних: 2 – за умови сталої номінальної об’ємної витрати на виході помпи, 3 – за умови сталого номінального напору на виході помпи. Розрахунки здійснювались шляхом розв’язання системи рівнянь (2.66)..(2.74) за умови, що $R_{др}=0$ та $R_{бп}=\infty$. Паспортні дані відцентрової помпи 14 НДсН і параметри її заступної схеми (рис. 2.2) наведено в таблиці 4.9.

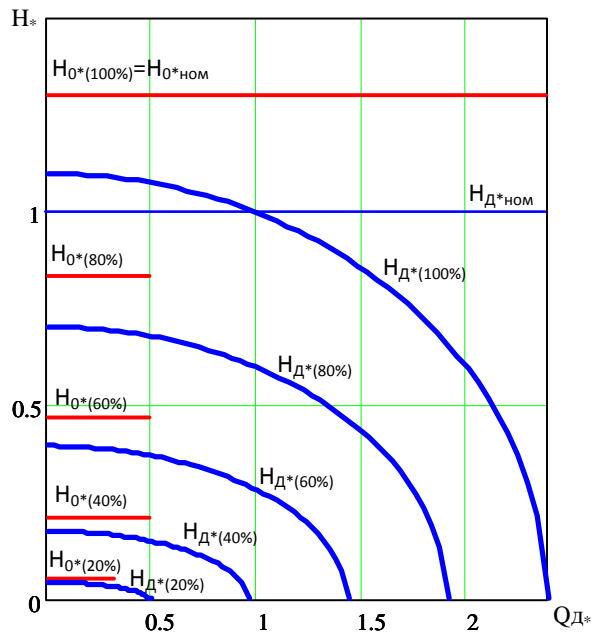


Рис. 2.4 Сімейство статичних напірно-витратних характеристик відцентрової помпи 14 НДсН за різних (%) частот обертання робочого колеса

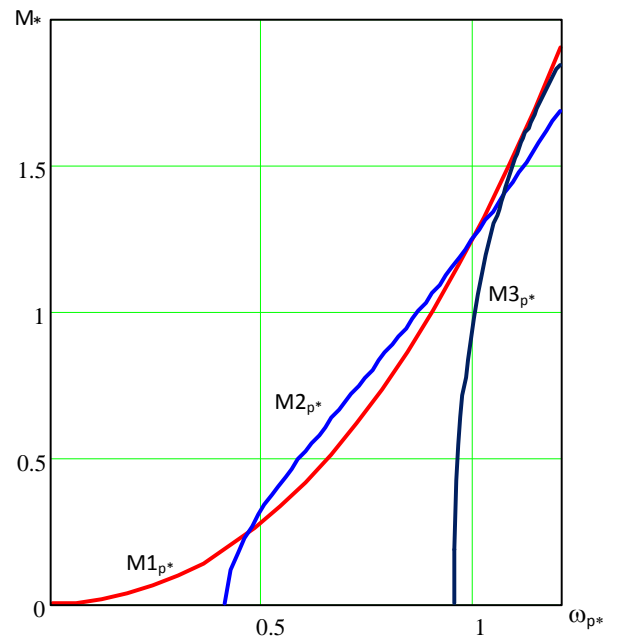


Рис. 2.5 Статичні механічні характеристики відцентрової помпи 14 НДсН за різних варіантів зовнішньої гідравлічної мережі

Як видно з рисунку 2.5 позначена через $M_{1р*}$ "вентиляторна" механічна характеристика ВП, використання якої є загальноприйнятим у більшості випадків під час моделювання роботи електроприводу ВП, є лише частковим випадком серед безлічі можливих. Це дає підстави зробити висновок про неможливість представлення у загальному випадку ВП у вигляді момента опору з "вентиляторною" механічною характеристикою під час моделювання роботи електроприводу.

2.2.2 Гідравлічна мережа

Основні припущення.

1. Температурний режим ГМ є усталеним, що означає незмінність температури робочої рідини внаслідок будь-якого теплообміну зі зовнішнім середовищем.
2. Робоча рідина є однорідною.
3. ГМ представлена сукупністю скінченої кількості ділянок із зосередженими параметрами.

Гідромережа, яка, зазвичай, складається з трубопроводів, запірної арматури, пристроїв зміни напору та витрати, споживачів рідини, тощо, є складною підсистемою з розподіленими в просторі параметрами, а її математичне моделювання є окремою науковою задачею. Вибір тої чи іншої математичної моделі залежить від виду та призначення гідромережі чи самої моделі [8, 52, 54, 61, 79, 104, 124, 132, 198, 205]. Для вирішення поставлених задач у даній дисертаційній роботі використано сформовану на підставі електрогідродинамічної аналогії математичну модель [79] розгалуженої гідромережі з урахуванням її просторової будови та споживачів рідини.

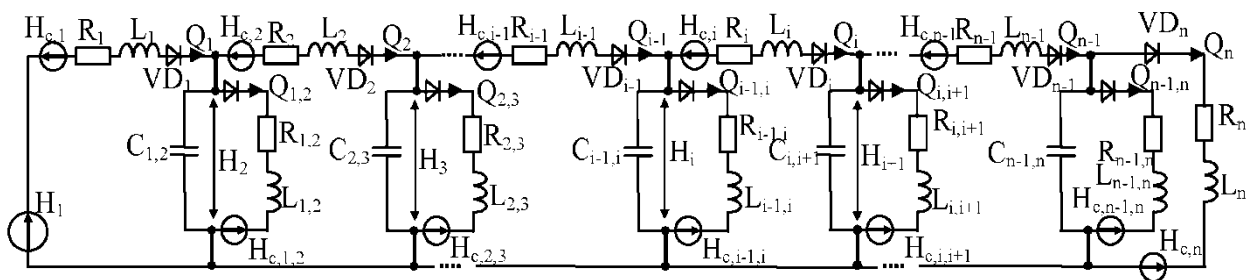


Рис. 2.6 Заступна схема гідромережі [79]

Згідно [79] у загальному випадку на кожній ділянці трубопроводу виникають пропорційні квадрату об'ємної витрати рідини втрати напору на внутрішніх дисипативних гідроопорах $R_{Гі}$, які в заступній схемі увімкнені послідовно. Статичні протинапори $H_{Cі}$ ділянок характеризують геодезичні перепади висот їхніх початку й кінця. Поступове зменшення витрати вздовж трубопроводу, яке виникає внаслідок втрат чи використання рідини споживачами, враховується шляхом уведення в заступну схему паралельно увімкнених дисипативних гідроопорів $R_{Гі,i+1}$. Статичні протинапори $H_{Cі,i+1}$ характеризують геодезичні перепади висот місць відгалуження трубопроводу та місць споживання рідини. Крім того, в заступну схему введено гідроіндуктивності, що враховують неможливість миттєвої зміни швидкості руху рідини, гідроємності, що враховують неможливість миттєвої зміни напору, та гідравлічні діоди, які забезпечують адекватність моделювання напрямку руху робочої рідини.

В усталених режимах усі гідроіндуктивності заступної схеми

перетворюються в елементи з нульовим опором, гідродіоди – в елементи з нульовим чи нескінченним (залежно від напрямку руху рідини) опором, а гідроємності – в елементи з нескінченним опором. Таким чином, наведена у [79] заступна схема перетворюється для ustalених режимів ГМ у таку схему:

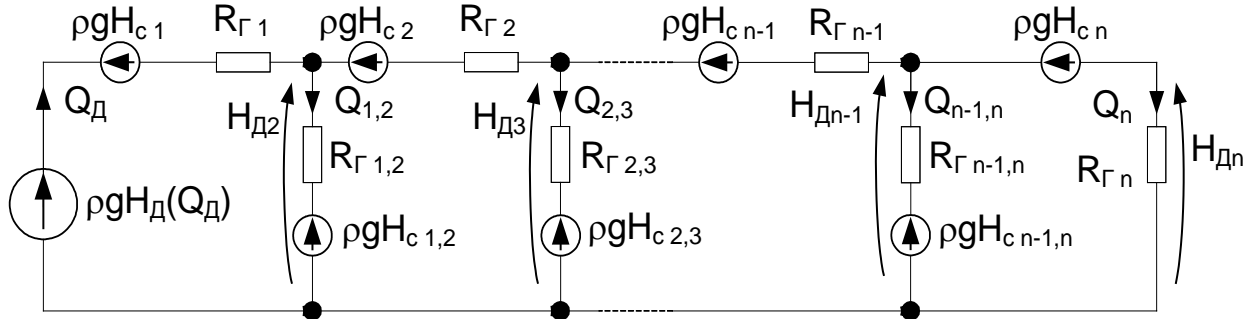


Рис. 2.7. Заступна електрична схема гідромережі в ustalених режимах

На цій схемі гідроопором $R_{\Gamma i}$ позначено споживача рідини в кінці трубопроводу, $H_{c i}$ – статичні протинапори ділянок трубопроводу; гідрооперами $R_{\Gamma i, i+1}$ – втрати рідини або еквівалентні гідроопераи відгалужень трубопроводу. $H_{c i, i+1}$ – статичні протинапори місць відгалуження трубопроводу та місць споживання рідини. Слід зазначити, що коли $i, i+1$ -е відгалуження на схемі моделює втрати рідини, то статичний протинапір в цьому відгалуженні відсутній. Записані в а.о. у методі законів Кірхгофа рівняння ММ ustalених режимів ГМ набувають вигляду:

$$\rho g (H_{д} - H_{c 1} - H_{c 1,2}) - R_{\Gamma 1} Q_{д}^2 - R_{\Gamma 1,2} Q_{1,2}^2 = 0; \quad (2.78)$$

$$Q_{д} - Q_{1,2} - Q_2 = 0; \quad (2.79)$$

$$\rho g (H_{д2} - H_{c 1,2}) - R_{\Gamma 1,2} Q_{1,2}^2 = 0 \quad (2.80)$$

$$\rho g (H_{c 1,2} - H_{c 2} - H_{c 2,3}) - R_{\Gamma 1,2} Q_{1,2}^2 - R_{\Gamma 2} Q_2^2 - R_{\Gamma 2,3} Q_{2,3}^2 = 0; \quad (2.81)$$

$$Q_2 - Q_{2,3} - Q_3 = 0; \quad (2.82)$$

$$\rho g (H_{д3} - H_{c 2,3}) - R_{\Gamma 2,3} Q_{2,3}^2 = 0 \quad (2.83)$$

.....; (...)

$$\rho g (H_{c n-2, n-1} - H_{c n-1} - H_{c n-1, n}) - R_{\Gamma n-2, n-1} Q_{n-2, n-1}^2 - R_{\Gamma n-1} Q_{n-1}^2 - R_{\Gamma n-1, n} Q_{n-1, n}^2 = 0; \quad (2.84)$$

$$Q_{n-1} - Q_{n-1,n} - Q_n = 0; \tag{2.85}$$

$$\rho g (H_{д3} - H_{c_{n-1,n}}) - R_{\Gamma_{n-1,n}} Q_{n-1,n}^2 = 0; \tag{2.86}$$

$$\rho g (H_{c_{n-1,n}} - H_{c_n}) - R_{\Gamma_{n-1,n}} Q_{n-1,n}^2 - R_{\Gamma_n} Q_n^2 = 0. \tag{2.87}$$

Із метою зменшення кількості рівнянь ММ гідромережі та формалізації запису, з урахуванням впливу в'язкості k_v робочої рідини на дисипативний гідроопір згідно (2.39) та, прийнявши за базові значення номінальні напір та витрату, перетворюємо систему (2.78)..(2.87) до такого вигляду (в позначеннях за винятком в'язкості k_v у подальшому не застосовуємо знак * для уникнення громіздкості запису):

$$H_{д} - H_{c_1} - H_{c_{1,2}} - k_{v*6} (R_{\Gamma_1} Q_{д}^2 - R_{\Gamma_{1,2}} (Q_{д} - Q_2)^2) = 0; \tag{2.88}$$

$$H_{c_{1,2}} - H_{c_2} - H_{c_{2,3}} - k_{v*6} [R_{\Gamma_{1,2}} (Q_{д} - Q_2)^2 - R_{\Gamma_2} Q_2^2 - R_{\Gamma_{2,3}} (Q_2 - Q_3)^2] = 0; \tag{2.89}$$

.....; (.....)

$$H_{c_{n-2,n-1}} - H_{c_{n-1}} - H_{c_{n-1,n}} - k_{v*6} [R_{\Gamma_{n-2,n-1}} (Q_{n-2} - Q_{n-1})^2 - R_{\Gamma_{n-1}} Q_{n-1}^2 - R_{\Gamma_{n-1,n}} (Q_{n-1} - Q_n)^2] = 0; \tag{2.90}$$

$$H_{c_{n-1,n}} - H_{c_n} - k_{v*6} [R_{\Gamma_{n-1,n}} (Q_{n-1} - Q_n)^2 - R_{\Gamma_n} Q_n^2] = 0. \tag{2.91}$$

Розрахунок напорів та витрат рідини в усіх точках ГМ є окремою задачею, що не розглядається в даному дослідженні. Тому вбачається доцільним еквівалентувати схему, що на рис. 2.7 одним еквівалентним гідроопором R_{Γ} і одним еквівалентним статичним протинапором $H_{ст}$:

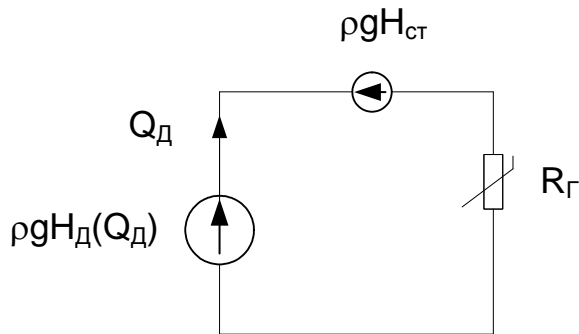


Рис. 2.8 Еквівалентна заступна схема гідромережі в усталених режимах

Рівняння усталених режимів ГМ у в.о. набуває такого вигляду:

$$H_d - H_c - k_{v*б} R_\Gamma Q_d^2 = 0. \quad (2.92)$$

У разі сталих конфігурації та параметрів гідромережі, для номінального режиму можна записати: $1 - H_c - k_{v*б} R_\Gamma I^2 = 0$, звідки $R_\Gamma = (1 - H_c) / k_{v*б}$. Після підстановки цього виразу в (2.92) отримуємо: $H_d = H_c + (1 - H_c) Q_d^2$.

Таким чином, остаточно отримуємо спрощену ММ усталених режимів ГМ у вигляді її статичної напірної характеристики:

$$H_d - H_c - (1 - H_c) Q_d^2 = 0, \quad (2.93)$$

а в матрично-векторній формі рівняння (2.93) спрощеної ММ усталених режимів ГМ набуває вигляду:

$$\mathbf{f}_{\Gamma M}(\mathbf{X}_{\Gamma M}) = \mathbf{0}, \quad (2.94)$$

де $\mathbf{X}_{\Gamma M} = (Q_d, H_d)_t$.

Матриця Якобі $\mathbf{W}_{\Gamma M}$ рівняння (2.94) гідромережі має вигляд:

$$\mathbf{W}_{\Gamma M} = \left\| -2(1 - H_c) Q_d \mid 1 \right\|. \quad (2.95)$$

Окремо слід зазначити, за наявності даних щодо гідроопорів та статичних протинапорів ГМ згідно схеми, що на рис. 2.7, можна успішно використати математичну модель гідромережі як у вигляді рівнянь (2.78)..(2.87), так і у вигляді рівнянь (2.88)..(2.91). Структура матриці Якобі системи рівняння рівнянь (2.78)..(2.87) чи (2.88)..(2.91) залежить від конфігурації та параметрів конкретної гідромережі.

2.2.3 Асинхронний двигун

Основні припущення.

1. Рівняння ММ асинхронного двигуна записані на підставі узагальнених рівнянь асинхронної машини [147, 202].
2. Температурний режим є усталеним.
3. Обвитки мають зосереджені параметри.
4. Вебер-амперна характеристики магнітної системи є нелінійною.

5. Вплив форми осердя на розподіл магнітного поля не враховується.

6. Режим є симетричний.

Рівняння математичної моделі АД i -го ВПТА сформовані в $d-q$ координатах, які жорстко зв'язані з обертовим магнітним полем статора АД у в.о. з використанням такої системи основних базових величин:

$$\omega_{Д.б_i} = \omega_{\text{synhr}_i}; \quad (2.96)$$

$$U_{АД.б_i} = \sqrt{2/3} U_{АД.н_i}; \quad (2.97)$$

$$M_{АД.б_i} = S_{АД.б_i} / \omega_{Д.б_i} = P_{АД.н_i} / (\eta_{АД.н_i} \cos \varphi_{АД.н_i} \omega_{Д.б_i}); \quad (2.98)$$

$$Z_{АД.б_i} = U_{АД.б_i} / I_{АД.б_i} = U_{АД.н_i}^2 \eta_{АД.н_i} \cos \varphi_{АД.н_i} \omega_{Д.б_i} / P_{АД.н_i}, \quad (2.99)$$

де ω_{synhr_i} – синхронна частота АД i -го ВПТА; $U_{АД.н_i}$, $P_{АД.н_i}$, $\eta_{АД.н_i}$, $\cos \varphi_{АД.н_i}$ – відповідно номінальні значення лінійної напруги, потужності, ККД та коефіцієнта потужності АД i -го ВПТА.

Аналіз наведених у [85, 177, 180, 202] одноконтурних математичних моделей насиченого АД в $d-q$ координатах показав їхню недостатню ефективність для розрахунку відмінних від номінальних усталених режимів асинхронних ВПТА. Векторні (зокрема [164, 167]) та Bond Graph [247, 92, 95, 101, 102] моделі АД є потужним інструментом для дослідження динамічних режимів. Крім того, актуальним є питання розроблення спеціалізованих для частотного керування АД [13], математичне моделювання яких потребує врахування окремих конструкційних особливостей. У цій роботі запропонована удосконалена математична модель насиченого АД на підставі його двоконтурної заступної схеми з урахуванням витіснення струму в роторі [69, 173, 174]. Оскільки в рівняннях присутня частота обертання спільного валу з ВП, під час запису рівнянь у в.о. необхідно ввести згідно (2.7), (2.8) коефіцієнт зв'язку між базовими значеннями частоти двигуна та помпи i -го ВПТА:

$$k_{\omega_i} = \omega_{ВП.б_i} / \omega_{Д.б_i}; \quad (2.100)$$

Таким чином, у в.о. рівняння математичної моделі усталених режимів

асинхронного двигуна i -го ВПТА матимуть вигляд:

$$r_{s_i} I_{sd_i} - \omega_{s^* \delta_i} (x_{s_i} I_{sq_i} + \Psi_{\delta q_i}) - U_{sd_i} = 0; \quad (2.101)$$

$$r_{s_i} I_{sq_i} + \omega_{s^* \delta_i} (x_{s_i} I_{sd_i} + \Psi_{\delta d_i}) - U_{sq_i} = 0; \quad (2.102)$$

$$\omega_{s^* \delta_i} r_{1r_i} I_{1rd_i} - (\omega_{s^* \delta_i} - k_{\omega_i} \omega_{r^* \delta_i}) (x_{1r_i} I_{1rq_i} - \Psi_{\delta q_i}) = 0; \quad (2.103)$$

$$\omega_{s^* \delta_i} r_{1r_i} I_{1rq_i} + (\omega_{s^* \delta_i} - k_{\omega_i} \omega_{r^* \delta_i}) (x_{1r_i} I_{1rd_i} - \Psi_{\delta d_i}) = 0; \quad (2.104)$$

$$\omega_{s^* \delta_i} r_{2r_i} I_{2rd_i} - (\omega_{s^* \delta_i} - k_{\omega_i} \omega_{r^* \delta_i}) (x_{2r_i} I_{2rq_i} - \Psi_{\delta q_i}) = 0; \quad (2.105)$$

$$\omega_{s^* \delta_i} r_{2r_i} I_{2rq_i} + (\omega_{s^* \delta_i} - k_{\omega_i} \omega_{r^* \delta_i}) (x_{2r_i} I_{2rd_i} - \Psi_{\delta d_i}) = 0; \quad (2.106)$$

$$I_{sd_i} - (I_{1rd_i} + I_{2rd_i}) - R_{mh_i} (\Psi_{\delta d_i}, \Psi_{\delta q_i}) \Psi_{\delta d_i} + \omega_{s^* \delta_i} \Psi_{\delta q_i} / R_{a_i} = 0; \quad (2.107)$$

$$I_{sq_i} - (I_{1rq_i} + I_{2rq_i}) - R_{mh_i} (\Psi_{\delta d_i}, \Psi_{\delta q_i}) \Psi_{\delta q_i} - \omega_{s^* \delta_i} \Psi_{\delta d_i} / R_{a_i} = 0, \quad (2.108)$$

де для АД i -го ВПТА:

r_{s_i}, x_{s_i} – еквівалентні резистанс і індуктанс обвиток статора;

$r_{1r_i}, r_{2r_i}, x_{1r_i}, x_{2r_i}$ – зведені до статора резистанси обвиток ротора та індуктанси розсіяння обвиток ротора двоконтурної Т– подібної заступної схеми АД;

$I_{sd_i}, I_{sq_i}, I_{1rd_i}, I_{1rq_i}, I_{2rd_i}, I_{2rq_i}$ – відповідно струми статора та зведені до нього струми ротора в d - q координатах;

$\Psi_{\delta d_i}, \Psi_{\delta q_i}$ – зведені до первинної обвитки статора потокозчеплення від магнітного потоку повітряного проміжку в d - q координатах;

$U_{sm_i} = \sqrt{U_{sd_i}^2 + U_{sq_i}^2}$ – амплітудне значення фазної напруги живлення статора в d - q координатах;

$\omega_{s^* \delta_i}$ – відносна колова частота напруги живлення статора;

R_{a_i} – еквівалентний резистанс, який враховує втрати активної енергії у сталевому осерді;

$R_{mh_i} (\Psi_{\delta d_i}, \Psi_{\delta q_i})$ – нелінійний статичний магнітний опір головного магнітного кола двигуна [11, 36, 70, 138, 165, 208].

Початкова фаза Ψ_{0Us_i} зображального вектора напруги U_{sm_i} обвитки статора може приймати довільне значення. Тому, доповнюємо систему

(2.101)..(2.108) таким рівнянням:

$$U_{sd_i} - \sqrt{U_{sd_i}^2 + U_{sq_i}^2} \cos \Psi_{0U_{s_i}} = 0. \quad (2.109)$$

Нелінійний статичний магнітний опір головного магнітного кола АД апроксимовано поліномом на підставі даних [208]:

$$R_{m_{n_i}}(\Psi_{\delta d_i}, \Psi_{\delta q_i}) = I_{m_{n_i}} \left(a_0 + a_2 (\Psi_{\delta d_i}^2 + \Psi_{\delta q_i}^2) + a_4 (\Psi_{\delta d_i}^2 + \Psi_{\delta q_i}^2)^4 \right), \quad (2.110)$$

де $a_0=0,82$; $a_2=0,148$; $a_4=0,044$; $I_{m_{n_i}} = 1/(x_{\sigma_i} + x_{a_i})$; x_{σ_i} ; x_{a_i} – відносні значення індуктансів розсіяння та намагнічення двигуна в номінальному режимі. Зазначимо, що згідно [168] вплив частоти напруги на них стає суттєвим за частот понад 100 Гц. Тому можна знехтувати цим впливом.

Електричні втрати активної потужності в обвитці ротора АД i -го ВПТА визначаються з виразу:

$$\Delta P_{r_i} = r_{1r_i} (I_{1rd_i}^2 + I_{1rq_i}^2) + r_{2r_i} (I_{2rd_i}^2 + I_{2rq_i}^2). \quad (2.111)$$

У матрично-векторній формі рівняння (2.101)..(2.109), математичної моделі усталених режимів АД i -го ВПТА набувають вигляду:

$$\mathbf{f}_{AD_i}(\mathbf{X}_{AD_i}) = \mathbf{0}, \quad (2.112)$$

де $\mathbf{X}_{AD_i} = (\omega_{r^*b_i}, \omega_{s^*b_i}, I_{sdi}, I_{sqi}, I_{1rds_i}, I_{1rq_i}, I_{2rd_i}, I_{2rq_i}, U_{sd_i}, U_{sq_i}, \Psi_{\delta d_i}, \Psi_{\delta q_i})_t$.

Матриця Якобі \mathbf{W}_{AD_i} рівняння (2.112) має вигляд (2.113).

Для однозначного розв'язання системи (2.101)..(2.109) з 9 рівнянь з 12 невідомими її необхідно доповнити одним рівнянням механічного зв'язку з помпою та одним рівнянням керування електромагнітними координатами режиму АД, про що йдеться в 2.3. У результаті отримуємо систему з 11 рівнянь з 12 невідомими (12-а невідома – частота обертання спільного вала i -го агрегату задається гідравлічним режимом системи).

$$\mathbf{W}_{A\Delta_i} = \begin{pmatrix} 0 & W_{12A\Delta_i} & \mathbf{r}_{s_i} & -\omega_{s^*\delta_i} X_{s_i} & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & -\omega_{s^*\delta_i} \\ 0 & W_{22A\Delta_i} & \omega_{s^*\delta_i} X_{s_i} & \mathbf{r}_{s_i} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & \omega_{s^*\delta_i} & 0 \\ W_{31A\Delta_i} & W_{32A\Delta_i} & 0 & 0 & \omega_{s^*\delta_i} \mathbf{r}_{1r_i} & W_{36A\Delta_i} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & W_{3,12A\Delta_i} \\ W_{41A\Delta_i} & W_{42A\Delta_i} & 0 & 0 & W_{45A\Delta_i} & \omega_{s^*\delta_i} \mathbf{r}_{1r_i} & 0 & 0 & 0 & 0 & W_{4,11A\Delta_i} & 0 \\ W_{51A\Delta_i} & W_{52A\Delta_i} & 0 & 0 & 0 & 0 & \omega_{s^*\delta_i} \mathbf{r}_{2r_i} & W_{58A\Delta_i} & 0 & 0 & 0 & W_{5,12A\Delta_i} \\ W_{61A\Delta_i} & W_{62A\Delta_i} & 0 & 0 & 0 & 0 & W_{67A\Delta_i} & \omega_{s^*\delta_i} \mathbf{r}_{2r_i} & 0 & 0 & W_{6,11A\Delta_i} & 0 \\ 0 & \Psi_{\delta_{q_i}} / R_{a_i} & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & W_{7,11A\Delta_i} & W_{7,12A\Delta_i} \\ 0 & 0 & -\Psi_{\delta_{d_i}} / R_{a_i} & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & W_{8,11A\Delta_i} & W_{8,12A\Delta_i} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & W_{99A\Delta_i} & W_{9,10A\Delta_i} & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad (2.113)$$

де $W_{12A\Delta_i} = -x_{s_i} I_{sq_i} - \Psi_{\delta_{q_i}}$; $W_{22A\Delta_i} = x_{s_i} I_{sd_i} + \Psi_{\delta_{d_i}}$; $W_{22A\Delta_i} = x_{s_i} I_{sd_i} + \Psi_{\delta_{d_i}}$; $W_{31A\Delta_i} = k_{\omega_i} (x_{1r_i} I_{1rq_i} - \Psi_{\delta_{q_i}})$; $W_{32A\Delta_i} = r_{1r_i} I_{1rd_i} - x_{1r_i} \times I_{1rq_i} + \Psi_{\delta_{q_i}}$; $W_{36A\Delta_i} = -(\omega_{s^*\delta_i} - k_{\omega_i} \omega_{r^*\delta_i}) x_{1r_i}$; $W_{41A\Delta_i} = -k_{\omega_i} (x_{1r_i} I_{1rd_i} - \Psi_{\delta_{d_i}})$; $W_{42A\Delta_i} = r_{1r_i} I_{1rq_i} + x_{1r_i} I_{1rd_i} - \Psi_{\delta_{d_i}}$; $W_{45A\Delta_i} = (\omega_{s^*\delta_i} - k_{\omega_i} \omega_{r^*\delta_i}) x_{1r_i}$; $W_{51A\Delta_i} = k_{\omega_i} (x_{2r_i} I_{2rq_i} - \Psi_{\delta_{q_i}})$; $W_{52A\Delta_i} = r_{2r_i} I_{2rd_i} - x_{2r_i} I_{2rq_i} + \Psi_{\delta_{q_i}}$; $W_{61A\Delta_i} = -k_{\omega_i} (x_{2r_i} I_{2rd_i} - \Psi_{\delta_{d_i}})$; $W_{62A\Delta_i} = r_{2r_i} I_{2rq_i} + x_{2r_i} I_{2rd_i} - \Psi_{\delta_{d_i}}$; $W_{58A\Delta_i} = -(\omega_{s^*\delta_i} - k_{\omega_i} \omega_{r^*\delta_i}) x_{2r_i}$; $W_{67A\Delta_i} = (\omega_{s^*\delta_i} - k_{\omega_i} \omega_{r^*\delta_i}) x_{2r_i}$; $W_{3,12A\Delta_i} = \omega_{s^*\delta_i} - k_{\omega_i} \omega_{r^*\delta_i}$; $W_{99A\Delta_i} = 1 - U_{sd_i} \times \cos \Psi_{0U_{s_i}} / \sqrt{U_{sd_i}^2 + U_{sq_i}^2}$; $W_{9,10A\Delta_i} = U_{sq_i} \cos \Psi_{0U_{s_i}} / \sqrt{U_{sd_i}^2 + U_{sq_i}^2}$; $W_{4,11A\Delta_i} = -\omega_{s^*\delta_i} + k_{\omega_i} \omega_{r^*\delta_i}$; $W_{5,12A\Delta_i} = \omega_{s^*\delta_i} - k_{\omega_i} \omega_{r^*\delta_i}$; $W_{7,11A\Delta_i} = -\Psi_{\delta_{d_i}} \partial R_{m\mathbb{H}_i}(\Psi_{\delta_{d_i}}, \Psi_{\delta_{q_i}}) / \partial \Psi_{\delta_{d_i}} - R_{m\mathbb{H}_i}(\Psi_{\delta_{d_i}}, \Psi_{\delta_{q_i}})$; $W_{7,12A\Delta_i} = -\Psi_{\delta_{d_i}} \partial R_{m\mathbb{H}_i}(\Psi_{\delta_{d_i}}, \Psi_{\delta_{q_i}}) / \partial \Psi_{\delta_{q_i}} + \omega_{s^*\delta_i} / R_{a_i}$; $W_{8,11A\Delta_i} = -\Psi_{\delta_{q_i}} \partial R_{m\mathbb{H}_i}(\Psi_{\delta_{d_i}}, \Psi_{\delta_{q_i}}) / \partial \Psi_{\delta_{d_i}} - \omega_{s^*\delta_i} / R_{a_i}$; $W_{8,12A\Delta_i} = -\Psi_{\delta_{q_i}} \partial R_{m\mathbb{H}_i}(\Psi_{\delta_{d_i}}, \Psi_{\delta_{q_i}}) / \partial \Psi_{\delta_{q_i}} - R_{m\mathbb{H}_i}(\Psi_{\delta_{d_i}}, \Psi_{\delta_{q_i}})$; $W_{6,11A\Delta_i} = -\omega_{s^*\delta_i} + k_{\omega_i} \omega_{r^*\delta_i}$.

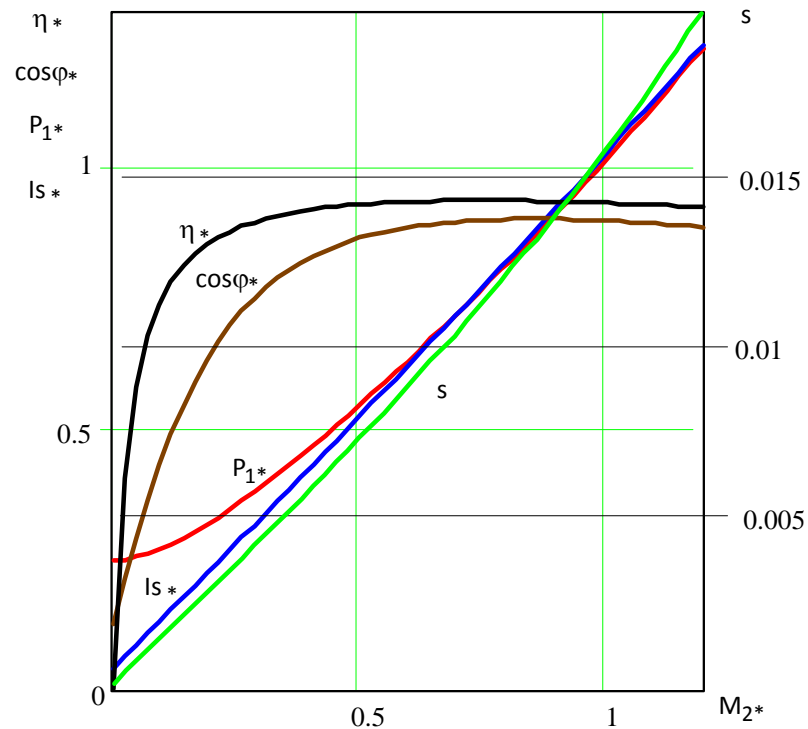


Рис. 2.9 Робочі характеристики асинхронного двигуна 4АН355М6У3

На рисунку 2.9 зображено робочі характеристики асинхронного двигуна 4АН355М6У3, отриманих в результаті розв'язання системи рівнянь (2.101)..(2.109) за номінальної частоти напруги обвитки статора. Паспортні дані й параметри двигуна наведено в таблиці 4.11.

2.2.4 Синхронний двигун

Основні припущення.

1. Рівняння ММ синхронного двигуна записані на підставі узагальнених рівнянь синхронної машини [147, 202, 203].
2. Температурний режим є усталеним.
3. Обвитки мають зосереджені параметри.
4. Вебер-амперна характеристики магнітної системи є нелінійною.
5. Вплив форми осердя на розподіл магнітного поля не враховується.
6. Струм збудження є сталим.
7. Втрати енергії в обвитці збудження не враховуються.
8. Режим є симетричний.

Рівняння ММ усталених режимів синхронного двигуна i -го ВПТА

сформовані в $d-q$ координатах, які жорстко зв'язані з обертовим магнітним полем СД у в.о. з використанням такої системи основних базових величин :

$$\omega_{д.б_i} = \omega_{synhr_i} = \omega_{ном_i} ; \quad (2.114)$$

$$U_{СД.б_i} = \sqrt{2/3} U_{СД.н_i} ; \quad (2.115)$$

$$M_{СД.б_i} = S_{СД.б_i} / \omega_{д.б_i} = P_{СД.н_i} / (\eta_{СД.н_i} \cos \varphi_{СД.н_i} \omega_{д.б_i}) ; \quad (2.116)$$

$$Z_{СД.б_i} = U_{СД.б_i} / I_{СД.б_i} = U_{СД.н_i}^2 \eta_{СД.н_i} \cos \varphi_{СД.н_i} \omega_{д.б_i} / P_{СД.н_i} , \quad (2.117)$$

де $\omega_{ном_i}$ – номінальна частота СД i -го ВПТА; $U_{СД.н_i}$, $P_{СД.н_i}$, $\eta_{СД.н_i}$, $\cos \varphi_{СД.н_i}$ – відповідно номінальні значення лінійної напруги, потужності, коефіцієнта корисної дії та коефіцієнта потужності СД i -го ВПТА.

Аналіз [214, 233, 240, 2, 32, 50, 100, 197, 203] показує, що математичні моделі насиченого СД представлені в цих працях, орієнтовані на дослідження перехідних процесів, а їхня адаптація для аналізу усталених режимів не є ефективною. Крім того, актуальним є питання розроблення спеціалізованих для частотного керування електродвигунів [13], математичне моделювання яких потребує врахування окремих конструкційних особливостей.

У цій роботі за основу взято математичну модель синхронного двигуна, запропоновану в [220] і використану в [219, 221].

Оскільки в рівняннях присутня частота обертання спільного валу з ВП, під час запису рівнянь у в.о. необхідно ввести коефіцієнт (2.100) переходу між базовими значеннями частоти СД та ВП i -го агрегата. У в.о. рівняння ММ усталених режимів СД i -го ВПТА мають вигляд:

$$r_{s_i} I_{sd_i} - k_{\omega_i} \omega_{r*б_i} (x_{s_i} I_{sq_i} + \Psi_{\delta q_i}) - U_{sd_i} = 0 ; \quad (2.118)$$

$$r_{s_i} I_{sq_i} + k_{\omega_i} \omega_{r*б_i} (x_{s_i} I_{sd_i} + \Psi_{\delta d_i}) - U_{sq_i} = 0 ; \quad (2.119)$$

$$I_{sd_i} + I_{f_i} - R_{mb_i} (\Psi_{\delta d_i}, \Psi_{\delta q_i}) \Psi_{\delta d_i} + k_{\omega_i} \omega_{r*б_i} \Psi_{\delta q_i} / R_{a_i} = 0 ; \quad (2.120)$$

$$I_{sq_i} - R_{mb_i} (\Psi_{\delta d_i}, \Psi_{\delta q_i}) \Psi_{\delta q_i} - k_{\omega_i} \omega_{r*б_i} \Psi_{\delta d_i} / R_{a_i} = 0 ; \quad (2.121)$$

$$U_{sq_i} I_{sd_i} - U_{sd_i} I_{sq_i} - (U_{sd_i} I_{sd_i} + U_{sq_i} I_{sq_i}) \operatorname{tg} \varphi_{s_i} = 0 ; \quad (2.122)$$

де для СД i -го ВПТА:

I_{sdi}, I_{sqi} , – струм статора в $d-q$ координатах; I_{fi} – струм збудження;

$\Psi_{\delta d_i}, \Psi_{\delta q_i}$ – зведені до первинної обвитки статора потокозчеплення від магнітного потоку повітряного проміжку в $d-q$ координатах;

$U_{sm_i} = \sqrt{U_{sd_i}^2 + U_{sq_i}^2}$ – амплітудне значення фазної напруги живлення обвитки статора в $d-q$ координатах;

r_{si}, x_{si} – резистанс обвитки статора та індуктанс розсіяння обвитки статора;

R_{ai} – еквівалентний резистанс, який враховує втрати активної енергії у сталевому осерді;

φ_{si} – кут між зображальними векторами струму та напруги обвитки статора (він визначає коефіцієнт потужності $\cos\varphi_{si}$);

$R_{mb_i}(\Psi_{\delta d_i}, \Psi_{\delta q_i})$ – нелінійний статичний магнітний опір головного магнітного кола двигуна [11, 208].

У розроблюваній ММ усталених режимів ЕТК повинна фігурувати частота напруги обвитки статора СД. Тому доповнюємо систему (2.118)..(2.122) таким рівнянням:

$$k_{\omega_i} \omega_{r^* \sigma_i} - \omega_{s^* \sigma_i} = 0 \quad (2.123)$$

Нелінійний статичний магнітний опір головного магнітного кола СД апроксимовано поліномом на підставі даних [208]:

$$R_{mb_i}(\Psi_{\delta d_i}, \Psi_{\delta q_i}) = I_{mn_i} \left(a_0 + a_2 (\Psi_{\delta d_i}^2 + \Psi_{\delta q_i}^2) + a_4 (\Psi_{\delta d_i}^2 + \Psi_{\delta q_i}^2)^4 \right), \quad (2.124)$$

де $a_0=0,82$; $a_2=0,148$; $a_4=0,044$; $I_{mn_i} = 1/(x_{\sigma_i} + x_{a_i})$; x_{σ_i} , x_{a_i} – відносні значення індуктансів розсіяння та намагнічення СД в номінальному режимі. Зазначимо, що згідно [168] вплив частоти на цей параметр стає суттєвим за частот понад 100 Гц. Тому в даному випадку нехтуємо цим впливом.

Електричні втрати активної потужності в обвитці збудження СД i -го ВПТА визначаються з виразу:

$$\Delta P_{f_i} = r_{f_i} I_{f_i}^2, \quad (2.125)$$

де r_{f_i} – резистанс обвитки збудження СД i -го ВПТА.

У матрично-векторній формі рівняння (2.118)..(2.123) ММ усталених режимів СД i -го ВПТА набувають вигляду:

$$\mathbf{f}_{\text{СД}_i}(\mathbf{X}_{\text{СД}_i}) = \mathbf{0}, \quad (2.126)$$

де $\mathbf{X}_{\text{СД}_i} = (\omega_{r^*b_i}, \omega_{s^*b_i}, I_{f_i}, I_{sd_i}, I_{sq_i}, \Psi_{\delta_i}, \Psi_{\delta_{qi}}, U_{sd_i}, U_{sq_i}, \varphi_{s_i})_t$.

Матриця Якобі $\mathbf{W}_{\text{АД}_i}$ рівняння (2.126) має вигляд (2.127).

$$\mathbf{W}_{\text{СД}_i} = \quad (2.127)$$

$$\begin{vmatrix} \mathbf{W}_{11\text{СД}_i} & 0 & 0 & r_{s_i} & \mathbf{W}_{15\text{СД}_i} & 0 & \mathbf{W}_{17\text{СД}_i} & -1 & 0 & 0 \\ \mathbf{W}_{21\text{СД}_i} & 0 & 0 & \mathbf{W}_{24\text{СД}_i} & r_{s_i} & \mathbf{W}_{26\text{СД}_i} & 0 & 0 & -1 & 0 \\ \mathbf{W}_{31\text{СД}_i} & 0 & 1 & 1 & 0 & \mathbf{W}_{36\text{СД}_i} & \mathbf{W}_{37\text{СД}_i} & 0 & 0 & 0 \\ \mathbf{W}_{41\text{СД}_i} & 0 & 0 & 0 & 1 & \mathbf{W}_{46\text{СД}_i} & \mathbf{W}_{47\text{СД}_i} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mathbf{W}_{54\text{СД}_i} & \mathbf{W}_{55\text{СД}_i} & 0 & 0 & \mathbf{W}_{58\text{СД}_i} & \mathbf{W}_{59\text{СД}_i} & \mathbf{W}_{5,10\text{СД}_i} \\ k_{\omega_i} & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix},$$

де $\mathbf{W}_{11\text{СД}_i} = -k_{\omega_i} (x_{s_i} I_{sq_i} + \Psi_{\delta_{qi}})$; $\mathbf{W}_{15\text{СД}_i} = -k_{\omega_i} \omega_{r^*b_i} x_{s_i}$; $\mathbf{W}_{21\text{СД}_i} = k_{\omega_i} (x_{s_i} I_{sd_i} + \Psi_{\delta_i})$;

$\mathbf{W}_{24\text{СД}_i} = k_{\omega_i} \omega_{r^*b_i} x_{s_i}$; $\mathbf{W}_{31\text{СД}_i} = k_{\omega_i} \Psi_{\delta_{qi}} / R_{a_i}$; $\mathbf{W}_{41\text{СД}_i} = -k_{\omega_i} \Psi_{\delta_i} / R_{a_i}$;

$\mathbf{W}_{54\text{СД}_i} = U_{sq_i} - U_{sd_i} \sin \varphi_{s_i}$; $\mathbf{W}_{55\text{СД}_i} = -U_{sd_i} - U_{sq_i} \sin \varphi_{s_i}$; $\mathbf{W}_{17\text{СД}_i} = -k_{\omega_i} \omega_{r^*b_i}$;

$\mathbf{W}_{26\text{СД}_i} = k_{\omega_i} \omega_{r^*b_i}$; $\mathbf{W}_{36\text{СД}_i} = -\Psi_{\delta_i} \partial R_{mb_i} (\Psi_{\delta_i}, \Psi_{\delta_{qi}}) / \partial \Psi_{\delta_i} - R_{mb_i} (\Psi_{\delta_i}, \Psi_{\delta_{qi}})$;

$\mathbf{W}_{37\text{СД}_i} = -\Psi_{\delta_i} \partial R_{mb_i} (\Psi_{\delta_i}, \Psi_{\delta_{qi}}) / \partial \Psi_{\delta_{qi}} + k_{\omega_i} \omega_{r^*b_i} / R_{a_i}$;

$\mathbf{W}_{46\text{СД}_i} = -\Psi_{\delta_{qi}} \partial R_{mb_i} (\Psi_{\delta_i}, \Psi_{\delta_{qi}}) / \partial \Psi_{\delta_i} - k_{\omega_i} \omega_{r^*b_i} / R_{a_i}$;

$\mathbf{W}_{47\text{СД}_i} = -\Psi_{\delta_{qi}} \partial R_{mb_i} (\Psi_{\delta_i}, \Psi_{\delta_{qi}}) / \partial \Psi_{\delta_{qi}} - R_{mb_i} (\Psi_{\delta_i}, \Psi_{\delta_{qi}})$;

$\mathbf{W}_{58\text{СД}_i} = -I_{sq_i} - I_{sd_i} \sin \varphi_{s_i}$; $\mathbf{W}_{59\text{СД}_i} = I_{sd_i} - I_{sq_i} \sin \varphi_{s_i}$;

$\mathbf{W}_{5,10\text{СД}_i} = -(U_{sd_i} I_{sd_i} + U_{sq_i} I_{sq_i}) (1 + \text{tg}^2 \varphi_{s_i})$.

Для однозначного розв'язання системи (2.118)..(2.123) з 6 рівнянь з 10 невідомими її необхідно доповнити одним рівнянням механічного зв'язку з помпою та двома рівняннями керування електромагнітними координатами режиму синхронного двигуна, про що йдеться в 2.3 . У результаті отримуємо систему з 9 рівнянь з 10 невідомими (10-а невідома – частота обертання спільного вала i -го агрегату задається гідравлічним режимом системи).

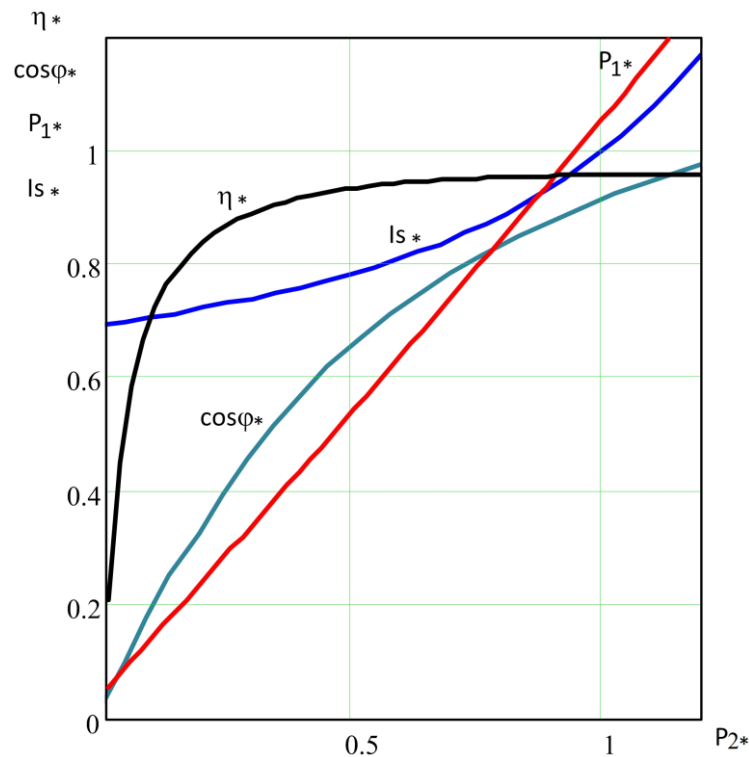


Рис. 2.10 Робочі характеристики синхронного двигуна СДТП-1600-2УХЛ4

На рисунку 2.10 зображено робочі характеристики синхронного двигуна СДТП-1600-2УХЛ4, отриманих в результаті розв'язання системи рівнянь (2.118)..(2.123) за номінальної частоти напруги обвитки статора. Паспортні дані й параметри двигуна наведено в таблиці 4.12.

2.2.5 Механічний зв'язок двигуна з помпою

Основні припущення.

1. Робоче колесо помпи, ротор двигуна та їхній спільний вал є абсолютно жорсткими й обертаються з усталеною швидкістю.
2. Виникають втрати енергії на тертя в підшипниках і вентилявання.
3. Температурний режим є усталеним.

Рівняння механічного зв'язку між двигуном та відцентровою помпою i -го агрегату встановлено на підставі балансу електромагнітного моменту двигуна з механічним моментом ВП за умови однакової частоти обертання їхніх спільного вала [48]. У загальному випадку, з урахуванням припущення про однаковість швидкостей обертання робочого колеса ВП, ротора двигуна i -го агрегату та їхнього спільного вала, в а.о. отримуємо:

$$M_{Д_i}(\omega_{p_i}) - \Delta M_{Д_i}(\omega_{p_i}) - M_{ВП_i}(\omega_{p_i}) = 0, \quad (2.128)$$

де $M_{Д_i}(\omega_{p_i}) = \Psi_{\delta d_i} I_{sq_i} - \Psi_{\delta q_i} I_{sd_i} - \Delta P_{r_i} / \omega_{p_i}$ – електромагнітний обертовий момент двигуна;

$\Delta P_{r_i} = r_{1r_i} (I_{1rds_i}^2 + I_{1rqs_i}^2) + r_{2r_i} (I_{2rds_i}^2 + I_{2rqs_i}^2)$ – втрати активної потужності в обвитці ротора асинхронного двигуна згідно (2.111) або $\Delta P_{r_i} = 0$ в обвитці збудження синхронного двигуна (див. основні припущення в 0);

$\Delta M_{Д_i}(\omega_{p_i})$ – механічний момент, який враховує втрати енергії на тертя в підшипниках і вентилявання двигуна під час обертання спільного валу; його можна апроксимувати квадратичною залежністю від частоти обертання спільного валу; у в.о. він рівний

$$\Delta M_{Д_i}(\omega_{p_i}) = k_{в.мех} \omega_{p^* \delta_i}^2, \quad (2.129)$$

де у випадку відсутності точних даних приймаємо $k_{в.мех_i} = 0,02$;

$M_{ВП_i}(\omega_{p_i}) = \rho g (H_{0di} Q_{\Sigma di} + H_{0qi} Q_{\Sigma qi}) / \omega_{p_i}$ – механічний момент опору ВП

Із урахуванням того, що за базові частоту та потужність для двигуна й для помпи приймаються, відповідно, різні значення, остаточно отримуємо рівняння механічного зв'язку між двигуном та ВП i -го агрегату у в.о.:

$$\begin{aligned} & \Psi_{\delta d_i} I_{sq_i} - \Psi_{\delta q_i} I_{sd_i} - \frac{r_{1r_i} (I_{1rds_i}^2 + I_{1rqs_i}^2) + r_{2r_i} (I_{2rds_i}^2 + I_{2rqs_i}^2)}{k_{\omega, Д_i} \omega_{p^* \delta_i}} - \\ & - k_{в.мех} k_{\omega, Д_i}^2 \omega_{p^* \delta_i}^2 - \frac{k_{М, Д_i} (H_{0di} Q_{\Sigma di} + H_{0qi} Q_{\Sigma qi})}{k_{\omega, Д_i} \omega_{p^* \delta_i}} = 0, \end{aligned} \quad (2.130)$$

де $k_{\omega, Д_i} = \omega_{\delta_i} / \omega_{Д\delta_i}$ – коефіцієнт зв'язку між системами базових величин помпи та двигуна за частотою обертання спільного валу; ω_{δ_i} – базове значення частоти, за якого обчислюється $\omega_{p^* \delta_i}$;

$k_{М, Д_i} = M_{ВП\delta_i} / M_{АД\delta_i}$ – коефіцієнт зв'язку між системами базових величин помпи та двигуна за обертовим моментом.

У матрично-векторній формі рівняння математичної моделі механічного зв'язку між АД та ВП i -го агрегату набуває вигляду:

$$\mathbf{f}_{\text{АДЗВ}_i}(\mathbf{X}_{\text{АДЗВ}_i}) = \mathbf{0}, \quad (2.131)$$

де $\mathbf{X}_{\text{АДЗВ}_i} = (\mathbf{H}_{0di}, \mathbf{H}_{0qi}, \mathbf{Q}_{\Sigma di}, \mathbf{Q}_{\Sigma qi}, \omega_{r^* \delta_i}, \mathbf{I}_{sdi}, \mathbf{I}_{sqi}, \mathbf{I}_{1rds_i}, \mathbf{I}_{1rqs_i}, \mathbf{I}_{2rds_i}, \mathbf{I}_{2rds_i}, \Psi_{\delta di}, \Psi_{\delta qi})_t$.

Матриця Якобі $\mathbf{W}_{\text{АДЗВ}_i}$ рівняння зв'язку (2.130) має вигляд:

$$\mathbf{W}_{\text{АДЗВ}_i} = \quad (2.132)$$

$$\begin{aligned} & \left\| \mathbf{W}_{11_i}, \mathbf{W}_{12_i}, \mathbf{W}_{13_i}, \mathbf{W}_{14_i}, \mathbf{W}_{15_i}, -\Psi_{\delta qi}, \Psi_{\delta di}, \mathbf{W}_{18_i}, \mathbf{W}_{19_i}, \mathbf{W}_{1,10_i}, \mathbf{W}_{1,11_i}, \mathbf{I}_{sqi}, -\mathbf{I}_{sdi} \right\| \\ \text{де } \mathbf{W}_{11_i} &= -\frac{k_{\text{М.Д}_i} \mathbf{Q}_{\Sigma di}}{k_{\omega, \text{Д}_i} \omega_{p^* \delta_i}}; \quad \mathbf{W}_{12_i} = -\frac{k_{\text{М.Д}_i} \mathbf{Q}_{\Sigma qi}}{k_{\omega, \text{Д}_i} \omega_{p^* \delta_i}}; \quad \mathbf{W}_{13_i} = -\frac{k_{\text{М.Д}_i} \mathbf{H}_{0di}}{k_{\omega, \text{Д}_i} \omega_{p^* \delta_i}}; \quad \mathbf{W}_{14_i} = -\frac{k_{\text{М.Д}_i} \mathbf{H}_{0qi}}{k_{\omega, \text{Д}_i} \omega_{p^* \delta_i}}; \\ \mathbf{W}_{15_i} &= \frac{r_{1r_i} (\mathbf{I}_{1rds_i}^2 + \mathbf{I}_{1rqs_i}^2) + r_{2r_i} (\mathbf{I}_{2rds_i}^2 + \mathbf{I}_{2rqs_i}^2) + k_{\text{М.Д}_i} (\mathbf{H}_{0di} \mathbf{Q}_{\Sigma di} + \mathbf{H}_{0qi} \mathbf{Q}_{\Sigma qi})}{k_{\omega, \text{Д}_i} \omega_{p^* \delta_i}^2} - 2k_{\text{в.мех}} k_{\omega, \text{Д}_i}^2 \omega_{p^* \delta_i}; \\ \mathbf{W}_{18_i} &= -\frac{2r_{1r_i} \mathbf{I}_{1rds_i}}{k_{\omega, \text{Д}_i} \omega_{p^* \delta_i}}; \quad \mathbf{W}_{19_i} = -\frac{2r_{1r_i} \mathbf{I}_{1rqs_i}}{k_{\omega, \text{Д}_i} \omega_{p^* \delta_i}}; \quad \mathbf{W}_{1,10_i} = -\frac{2r_{2r_i} \mathbf{I}_{2rds_i}}{k_{\omega, \text{Д}_i} \omega_{p^* \delta_i}}; \quad \mathbf{W}_{1,11_i} = -\frac{2r_{2r_i} \mathbf{I}_{2rqs_i}}{k_{\omega, \text{Д}_i} \omega_{p^* \delta_i}}. \end{aligned}$$

Рівняння механічного зв'язку між СД та помпою i -го агрегату у в.о. матимуть вигляд:

$$\Psi_{\delta di} \mathbf{I}_{sqi} - \Psi_{\delta qi} \mathbf{I}_{sdi} - k_{\text{в.мех}} k_{\omega, \text{Д}_i}^2 \omega_{p^* \delta_i}^2 - k_{\text{М.Д}_i} (\mathbf{H}_{0di} \mathbf{Q}_{\Sigma di} + \mathbf{H}_{0qi} \mathbf{Q}_{\Sigma qi}) / k_{\omega, \text{Д}_i} \omega_{p^* \delta_i} = 0. \quad (2.133)$$

У матрично-векторній формі рівняння математичної моделі механічного зв'язку між СД та ВП i -го агрегату набуває вигляду:

$$\mathbf{f}_{\text{СДЗВ}_i}(\mathbf{X}_{\text{СДЗВ}_i}) = \mathbf{0}, \quad (2.134)$$

де $\mathbf{X}_{\text{СДЗВ}_i} = (\mathbf{H}_{0di}, \mathbf{H}_{0qi}, \mathbf{Q}_{\Sigma di}, \mathbf{Q}_{\Sigma qi}, \omega_{r^* \delta_i}, \mathbf{I}_{sdi}, \mathbf{I}_{sqi}, \Psi_{\delta di}, \Psi_{\delta qi})_t$.

Матриця Якобі $\mathbf{W}_{\text{СДЗВ}_i}$ рівняння зв'язку (2.133) має вигляд:

$$\mathbf{W}_{\text{СДЗВ}_i} = \quad (2.135)$$

$$\begin{aligned} & \left\| \mathbf{W}_{11\text{СДЗВ}_i} \mid \mathbf{W}_{12\text{СДЗВ}_i} \mid \mathbf{W}_{13\text{СДЗВ}_i} \mid \mathbf{W}_{14\text{СДЗВ}_i} \mid \mathbf{W}_{15\text{СДЗВ}_i} \mid -\Psi_{\delta qi} \mid \Psi_{\delta di} \mid \mathbf{I}_{sqi} \mid -\mathbf{I}_{sdi} \right\|, \\ \text{де } \mathbf{W}_{11\text{СДЗВ}_i} &= -\frac{k_{\text{М.Д}_i} \mathbf{Q}_{\Sigma di}}{k_{\omega, \text{Д}_i} \omega_{p^* \delta_i}}; \quad \mathbf{W}_{12\text{СДЗВ}_i} = -\frac{k_{\text{М.Д}_i} \mathbf{Q}_{\Sigma qi}}{k_{\omega, \text{Д}_i} \omega_{p^* \delta_i}}; \quad \mathbf{W}_{13\text{СДЗВ}_i} = -\frac{k_{\text{М.Д}_i} \mathbf{H}_{0di}}{k_{\omega, \text{Д}_i} \omega_{p^* \delta_i}}; \\ \mathbf{W}_{14\text{СДЗВ}_i} &= -\frac{k_{\text{М.Д}_i} \mathbf{H}_{0qi}}{k_{\omega, \text{Д}_i} \omega_{p^* \delta_i}}; \quad \mathbf{W}_{15\text{СДЗВ}_i} = -2k_{\text{в.мех}} k_{\omega, \text{Д}_i}^2 \omega_{p^* \delta_i} + \frac{k_{\text{М.Д}_i} (\mathbf{H}_{0di} \mathbf{Q}_{\Sigma di} + \mathbf{H}_{0qi} \mathbf{Q}_{\Sigma qi})}{k_{\omega, \text{Д}_i} \omega_{p^* \delta_i}^2}. \end{aligned}$$

2.2.6 Двообвитковий трансформатор

Основні припущення.

1. Рівняння ММ реального двообвиткового трансформатора записані на підставі його класичної Т-подібної заступної схеми.

2. Температурний режим є усталеним.

3. Обвитки мають зосереджені параметри.

4. Вебер-амперна характеристики магнітної системи є нелінійною.

5. Режим є симетричний.

Рівняння ММ двообвиткового трансформаторів сформовані у в.о. з використанням такої системи основних базових величин:

$$\omega_{т\delta_i} = \omega_{нт_i} ; \quad (2.136)$$

$$U_{т\delta_i} = \sqrt{2/3} U_{внт_i} ; \quad (2.137)$$

$$I_{т.\delta_i} = \sqrt{2/3} (S_{нт_i} / U_{внт_i}) ; \quad (2.138)$$

$$S_{т.\delta_i} = S_{нт_i} , \quad (2.139)$$

$$Z_{т.\delta_i} = U_{т.\delta_i} / I_{т.\delta_i} \quad (2.140)$$

де $\omega_{нт_i}$, $U_{внт_i}$, $S_{нт_i}$ – відповідно, частота напруги обвиток, номінальні дієве значення лінійної напруги обвитки ВН та повна потужність i -го трансформатора. Усі величини та параметри зводяться до обвитки ВН, тому до складу рівнянь ММ не входять коефіцієнти трансформації.

Трансформатори представлені Т-подібними заступними схемами, усталені режими яких описуються в $d-q$ координатах у в.о. такими рівняннями [180]:

$$k_{т_i} U_{нд_i} + R_{нтт_i} I_{ндт_i} - \omega_{т*\delta_i} (x_{нтт_i} I_{нqt_i} + \Psi_{1qt_i}) = 0 ; \quad (2.141)$$

$$k_{т_i} U_{нq_i} + R_{нтт_i} I_{нqt_i} + \omega_{т*\delta_i} (x_{нтт_i} I_{ндт_i} - \Psi_{1дт_i}) = 0 ; \quad (2.142)$$

$$U_{вд_i} - R_{внт_i} I_{вдт_i} + \omega_{т*\delta_i} (x_{внт_i} I_{вqt_i} + \Psi_{1qt_i}) = 0 ; \quad (2.143)$$

$$U_{вq_i} - R_{внт_i} I_{вqt_i} - \omega_{т*\delta_i} (x_{внт_i} I_{вдт_i} + \Psi_{1дт_i}) = 0 ; \quad (2.144)$$

$$I_{\text{вд}i} - R_{\text{мт}i} \left(\Psi_{\text{1д}i}, \Psi_{\text{1q}i} \right) \Psi_{\text{1д}i} + \omega_{\text{т}*\delta_i} G_{\text{т}i} \Psi_{\text{1q}i} - I_{\text{нд}i} = 0; \quad (2.145)$$

$$I_{\text{вq}i} - R_{\text{мт}i} \left(\Psi_{\text{1д}i}, \Psi_{\text{1q}i} \right) \Psi_{\text{1q}i} - \omega_{\text{т}*\delta_i} G_{\text{ст}i} \Psi_{\text{1д}i} - I_{\text{нq}i} = 0, \quad (2.146)$$

де для i -го трансформатора:

$U_{\text{вд}i}, U_{\text{вq}i}, U_{\text{нд}i}, U_{\text{нq}i}$ – напруги, відповідно, обвиток ВН та НН напруг в d - q координатах;

$I_{\text{вд}i}, I_{\text{вq}i}, I_{\text{нд}i}, I_{\text{нq}i}$ – струми, відповідно, обвиток ВН та НН в d - q координатах;

$\sqrt{\Psi_{\text{1д}i}^2 + \Psi_{\text{1q}i}^2} = \Psi_{\text{1т}i}$ – зведене до первинної обвитки робоче потокозчеплення в d - q координатах;

$R_{\text{мт}i} \left(\Psi_{\text{1д}i}, \Psi_{\text{1q}i} \right)$ – нелінійний статичний магнітний опір фази магнітопроводу [208];

$R_{\text{внт}i}, x_{\text{внт}i}, R_{\text{ннт}i}, x_{\text{ннт}i}$ – відповідно резистанси та індуктивності розсіяння обвиток ВН та НН;

$G_{\text{т}i}$ – провідність, яка враховує втрати активної потужності в магнітопроводі;

$\omega_{\text{т}*\delta_i} = \omega_{\text{1т}i} / \omega_{\text{т}*\delta_i}$ – відносне значення частоти напруги обвиток.

Нелінійний статичний магнітний опір намагнічення трансформаторів апроксимовано поліномом, коефіцієнти якого визначені для еквівалентних синусоїд струму та потокозчеплення на підставі характеристики неробочого режиму, наведеної в [208] для миттєвих значень:

$$R_{\text{мт}i} \left(\Psi_{\text{1д}i}, \Psi_{\text{1q}i} \right) = I_{\text{мт}i} \left(b_0 \Psi_{\text{1т}i} + b_6 \Psi_{\text{1т}i}^3 + b_{10} \Psi_{\text{1т}i}^5 \right), \quad (2.147)$$

де $b_0 = 0,527176$; $b_6 = 0,231535$; $b_{10} = 0,241290$ згідно [208]; $I_{\text{мт}i}$ – у в.о. рівне поперечній магнітній провідності $b_{\text{т}i}$ i -го трансформатора. Значимо, що згідно [168] вплив частоти напруги на цей параметр стає суттєвим за частот понад 100 Гц. Тому в даному випадку нехтуємо цим впливом.

У матрично-векторній формі рівняння (2.141)..(2.146) ММ усталених режимів i -го трансформатора набувають вигляду:

$$\mathbf{f}_{\text{т}i} \left(\mathbf{X}_{\text{т}i} \right) = \mathbf{0}, \quad (2.148)$$

де $\mathbf{X}_{T_i} = (\omega_{T^*\delta_i}, I_{ндT_i}, I_{нqT_i}, I_{вдT_i}, I_{вqT_i}, \Psi_{1dT_i}, \Psi_{1qT_i}, U_{нд_i}, U_{нq_i}, U_{вд_i}, U_{вq_i})_t$ – вектор-стовпець координат режиму i -го трансформатора.

Матриця Якобі \mathbf{W}_{T_i} рівнянь (2.141)..(2.146) ММ усталених режимів i -го трансформатора має вигляд (2.149). Для однозначного розв'язання системи 6 рівнянь (2.141)..(2.146) з 11 невідомими необхідні значення ортогональних складових вторинних струмів і напруг трансформатора, а також – частоти (ці 5 змінних визначаються режимом двигуна i -го агрегата). Таким чином, розв'язанню підлягатиме система 6 рівнянь з 6 невідомими.

$$\mathbf{W}_{T_i} = \begin{pmatrix} W_{11T_i} & R_{ннт_i} & W_{13T_i} & 0 & 0 & 0 & \omega_{T^*\delta_i} & 1 & 0 & 0 & 0 \\ W_{21T_i} & W_{22T_i} & R_{ннт_i} & 0 & 0 & -\omega_{T^*\delta_i} & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ W_{31T_i} & 0 & 0 & -R_{внт_i} & W_{35T_i} & 0 & \omega_{T^*\delta_i} & 0 & 0 & 1 & 0 \\ W_{41T_i} & 0 & 0 & W_{44_i} & -R_{внт_i} & -\omega_{T^*\delta_i} & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ W_{51T_i} & -1 & 0 & 1 & 0 & W_{56_i} & W_{57_i} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ W_{61T_i} & 0 & -1 & 0 & 1 & W_{66_i} & W_{67_i} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad (2.149)$$

$$\begin{aligned} \text{де } W_{11T_i} &= -x_{ннт_i} I_{нqT_i} + \Psi_{1qT_i}; & W_{13T_i} &= \omega_{T^*\delta_i} x_{ннт_i}; & W_{21T_i} &= x_{ннт_i} I_{ндT_i} - \Psi_{1dT_i}; \\ W_{22T_i} &= \omega_{T^*\delta_i} x_{ннт_i}; & W_{31T_i} &= x_{внт_i} I_{вqT_i} + \Psi_{1qT_i}; & W_{35T_i} &= \omega_{T^*\delta_i} x_{внт_i}; \\ W_{41T_i} &= -x_{внт_i} I_{вдT_i} - \Psi_{1dT_i}; & W_{44_i} &= -\omega_{T^*\delta_i} x_{внт_i}; & W_{51T_i} &= G_{T_i} \Psi_{1qT_i}; \\ W_{56_i} &= -\Psi_{1dT_i} \partial R_{мT_i} (\Psi_{1dT_i}, \Psi_{1qT_i}) / \partial \Psi_{1dT_i} - R_{мT_i} (\Psi_{1dT_i}, \Psi_{1qT_i}); \\ W_{57_i} &= -\Psi_{1dT_i} \partial R_{мT_i} (\Psi_{1dT_i}, \Psi_{1qT_i}) / \partial \Psi_{1qT_i} + \omega_{T^*\delta_i} G_{T_i}; & W_{61T_i} &= -G_{ст_i} \Psi_{1dT_i}; \\ W_{66_i} &= -\Psi_{1qT_i} \partial R_{мT_i} (\Psi_{1dT_i}, \Psi_{1qT_i}) / \partial \Psi_{1dT_i} - \omega_{T^*\delta_i} G_{ст_i}; \\ W_{67_i} &= -\Psi_{1qT_i} \partial R_{мT_i} (\Psi_{1dT_i}, \Psi_{1qT_i}) / \partial \Psi_{1qT_i} - R_{мT_i} (\Psi_{1dT_i}, \Psi_{1qT_i}). \end{aligned}$$

2.2.7 Перетворювач частоти й напруги

Основні припущення.

1. У ПЧН виникають втрати активної та зміна реактивної потужностей.
2. Сам ПЧН забезпечує достатнє фільтрування гармонічних складових струму й напруги, а його вольт-амперна характеристика є достатньо

лінійною, що дозволяє не враховувати вплив спотворень кривих струму й напруги на координати режиму.

3. Температурний режим ПЧН є усталеним.

Забезпечення необхідних для відповідного режиму i -го агрегату значень напруги та частоти напруги статора двигуна цього агрегату здійснює перетворювач частоти та напруги.

Перетворювач частоти та напруги – це окремий пристрій, що складається з низки функціональних блоків (зокрема – випрямляча, інвертора, фільтрів гармонік) [53], схемотехнічне вирішення якого може бути найрізноманітнішим. Розроблення розгорнутих математичних моделей таких пристроїв є окремою науковою задачею, якій присвячена низка робіт ([220, 3, 147, 189, 190]), й не є завданням даного дослідження. Тому, з метою формалізації ММ та можливістю її подальшої адаптації до різних схемотехнічних вирішень ПЧН, вбачається доцільним представити його структурною схемою з урахуванням втрат активної та зміни реактивної потужностей в ньому:

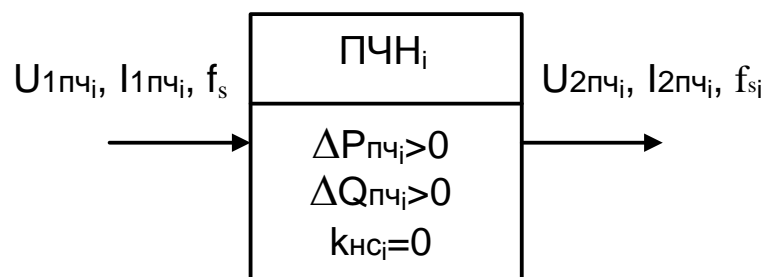


Рис. 2.11 Структурна схема перетворювача частоти й напруги

Таким чином, перетворювач частоти й напруги забезпечує перетворення напруги $U_{1пч_i}$ та струму $I_{1пч_i}$ зі стандартною частотою електромережі ω_s у напругу $U_{2пч_i}$ та струм $I_{2пч_i}$ з частотою ω_{s_i} , яка є частотою напруги статора двигуна i -го агрегата. При цьому, в ПЧН i -го агрегату виникають втрати активної $\Delta P_{пч_i}$ та реактивної ΔQ_i потужностей (останні в загальному випадку – додатні або від’ємні), а коефіцієнт несинусоїдності $k_{нс_i}$ рівний нулю.

Рівняння математичних моделей ПЧН i -го агрегату сформовані у в.о. з використанням такої системи основних базових величин:

$$U_{\text{пчнб}_i} = \sqrt{2/3} U_{1\text{н.пч}_i}; \quad (2.150)$$

$$I_{\text{пчнб}_i} = I_{1\text{н.пч}_i}; \quad (2.151)$$

$$S_{\text{пчнб}_i} = U_{\text{пчнб}_i} I_{\text{пчнб}_i}; \quad (2.152)$$

де $U_{1\text{н.пч}_i}$, $I_{1\text{н.пч}_i}$ – номінальні входні напруга та струм ПЧН.

Якщо припустити, що втрати активної та реактивної потужностей ПЧН є відомими, то узагальнені рівняння математичної моделі ПЧН i -го агрегата, сформовані на підставі балансу активної та реактивної потужностей, матимуть вигляд:

$$\left(U_{1\text{пчд}_i} I_{1\text{пчд}_i} + U_{1\text{пчq}_i} I_{1\text{пчq}_i} \right) - \Delta P_{\text{пч}_i} - k_{S_i} k_{U_i} k_{I_i} \left(U_{2\text{пчд}_i} I_{2\text{пчд}_i} + U_{2\text{пчq}_i} I_{2\text{пчq}_i} \right) = 0; \quad (2.153)$$

$$\left(U_{1\text{пчq}_i} I_{1\text{пчд}_i} - U_{1\text{пчд}_i} I_{1\text{пчq}_i} \right) - \Delta Q_{\text{пч}_i} - k_{S_i} k_{U_i} k_{I_i} \left(U_{2\text{пчq}_i} I_{2\text{пчд}_i} - U_{2\text{пчд}_i} I_{2\text{пчq}_i} \right) = 0, \quad (2.154)$$

де для ПЧН i -го агрегата:

$U_{1\text{пчд}_i}$, $U_{1\text{пчq}_i}$, $U_{2\text{пчд}_i}$, $U_{2\text{пчq}_i}$ – відповідно напруга живлення та напруга на виході в d - q координатах;

$I_{1\text{пчд}_i}$, $I_{1\text{пчq}_i}$, $I_{2\text{пчд}_i}$, $I_{2\text{пчq}_i}$ – відповідно струм живлення та струм на виході в d - q координатах;

$\Delta P_{\text{пч}_i}$, $\Delta Q_{\text{пч}_i}$ – втрати активної та реактивної потужностей у ПЧН;

$k_{S_i} = S_{\text{тб}_i} / S_{\text{пчнб}_i}$, $k_{U_i} = U_{\text{дб}_i} / U_{\text{тб}_i}$, $k_{I_i} = I_{\text{дб}_i} / I_{\text{тб}_i}$ – коефіцієнти зв'язку базових значень потужності, напруги та струму ПЧН, трансформатора (за наявності) та двигуна;

$S_{\text{тб}_i}$, $S_{\text{пчнб}_i}$ – базові значення потужностей трансформатора та ПЧН.

У матрично-векторній формі рівняння (2.153), (2.154) ММ усталених режимів ПЧН i -го агрегату набувають вигляду:

$$\mathbf{f}_{\text{пчн}_i}(\mathbf{X}_{\text{пчн}_i}) = \mathbf{0}, \quad (2.155)$$

де $\mathbf{X}_{\text{пчн}_i} = \left(I_{1\text{пчд}_i}, I_{1\text{пчq}_i}, I_{2\text{пчд}_i}, I_{2\text{пчq}_i}, U_{1\text{пчд}_i}, U_{1\text{пчq}_i}, U_{2\text{пчд}_i}, U_{2\text{пчq}_i} \right)_t$ – вектор-стовпець координат режиму ПЧН i -го агрегата.

Матриця Якобі $W_{\text{ПЧН}_i}$ рівняння (2.155) ММ усталених режимів ПЧН i -го агрегату має вигляд (2.156).

Для однозначного розв'язання системи 2 рівнянь (2.153)..(2.154) з 8 невідомими необхідні значення ортогональних складових вихідних струмів і напруг ПЧН (ці 4 змінні визначаються режимом двигуна i -го агрегата). З урахуванням того, що 2 ортогональні складові $U_{1\text{пчд}_i}$, $U_{1\text{пчq}_i}$ вхідної напруги ПЧН відомі, оскільки вона задається джерелом живлення, розв'язанню підлягатиме система 2 рівнянь з 2 невідомими.

$$W_{\text{ПЧН}_i} = \left\| \begin{array}{c|c|c|c|c|c|c|c} U_{1\text{пчд}_i} & U_{1\text{пчq}_i} & W_{13_i} & W_{14_i} & I_{1\text{пчд}_i} & I_{1\text{пчq}_i} & W_{17_i} & W_{18_i} \\ \hline U_{1\text{пчq}_i} & -U_{1\text{пчд}_i} & W_{23_i} & W_{24_i} & -I_{1\text{пчq}_i} & I_{1\text{пчд}_i} & W_{27_i} & W_{28_i} \end{array} \right\|, \quad (2.156)$$

де $W_{13_i} = -k_{S_i} k_{U_i} k_{I_i} U_{2\text{пчд}_i}$; $W_{14_i} = -k_{S_i} k_{U_i} k_{I_i} U_{2\text{пчq}_i}$; $W_{17_i} = -k_{S_i} k_{U_i} k_{I_i} I_{2\text{пчд}_i}$;
 $W_{18_i} = -k_{S_i} k_{U_i} k_{I_i} I_{2\text{пчq}_i}$; $W_{23_i} = -k_{S_i} k_{U_i} k_{I_i} U_{2\text{пчq}_i}$; $W_{24_i} = k_{S_i} k_{U_i} k_{I_i} U_{2\text{пчд}_i}$;
 $W_{27_i} = k_{S_i} k_{U_i} k_{I_i} I_{2\text{пчq}_i}$; $W_{28_i} = -k_{S_i} k_{U_i} k_{I_i} I_{2\text{пчд}_i}$.

2.2.8 Пристрій поперечної компенсації реактивної потужності

Основні припущення.

1. Температурний режим ПКП є усталеним.
2. У ПКП виникають втрати активної потужності.
3. Сам ПКП забезпечує достатнє фільтрування гармонічних складових струму й напруги, а його воль-амперна характеристика є достатньо лінійною, що дозволяє не враховувати вплив спотворень кривих струму й напруги на координати режиму.

4. Режим є симетричний.

Для зменшення втрат активної електроенергії та напруги застосовано поперечні компенсуючі пристрої. Рівняння математичних моделей ПКП сформовані у в.о. з використанням системи основних базових величин, яка застосована для інших елементів у місці приєднання цього пристрою:

$$Y_{b_i} = I_{b_i} / U_{b_i}. \quad (2.157)$$

У залежності від конкретних умов може бути доцільним застосування комбінації різних варіантів їхнього увімкнення. Оскільки тип ПКП і їхнє схемотехнічне вирішення можуть бути найрізноманітнішим, вони представлені у вигляді паралельного сполучення еквівалентних ємностей та активних провідностей:

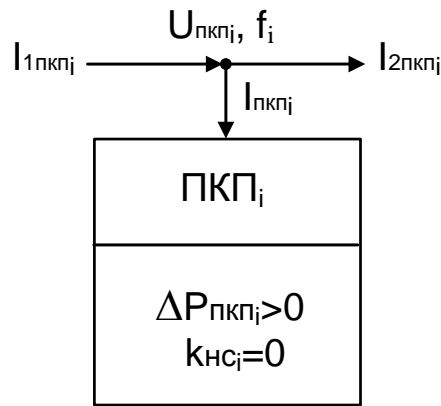


Рис. 2.12 Структурна схема поперечного компенсувального пристроя

У розширеному вигляді рівняння ММ i -го ПКП матимуть вигляд:

$$I_{пкпd_i} - G_{пкп_i} U_{пкпd_i} + \omega_{*бi} C_{пкп_i} U_{пкпq_i} = 0; \quad (2.158)$$

$$I_{пкпq_i} - G_{пкп_i} U_{пкпq_i} - \omega_{*бi} C_{пкп_i} U_{пкпd_i} = 0; \quad (2.159)$$

$$I_{1пкпd_i} - I_{2пкпd_i} - I_{пкпd_i} = 0; \quad (2.160)$$

$$I_{1пкпq_i} - I_{2пкпq_i} - I_{пкпq_i} = 0, \quad (2.161)$$

де для i -го ПКП:

$U_{пкпd_i}$, $U_{пкпq_i}$ – ортогональні складові напруги у вузлі приєднання;

$I_{1пкпd_i}$, $I_{1пкпq_i}$, $I_{2пкпd_i}$, $I_{2пкпq_i}$, $I_{пкпd_i}$, $I_{пкпq_i}$ – ортогональні складові струмів;

$\omega_{*бi}$ – відносне значення частоти напруги на затискачах;

$C_{пкп_i}$, $G_{пкп_i}$ – відносне значення еквівалентних ємності та провідності.

ПКП може бути ввімкнений у вузлі, в якому включно з ПКП сполучено три та більше віток. З метою зменшення кількості рівнянь моделі вбачається доцільним використати, відповідно, два рівнозначних варіанти рівнянь ПКП.

Для першого випадку (у вузлі включно з ПКП сполучено три вітки) рівняння (2.158)..(2.161) набувають вигляду:

$$I_{1\text{пкпд}_i} - I_{2\text{пкпд}_i} - G_{\text{пкп}_i} U_{\text{пкпд}_i} + \omega_{*\delta_i} C_{\text{пкп}_i} U_{\text{пкпд}_i} = 0; \quad (2.162)$$

$$I_{1\text{пкпд}_i} - I_{2\text{пкпд}_i} - G_{\text{пкп}_i} U_{\text{пкпд}_i} - \omega_{*\delta_i} C_{\text{пкп}_i} U_{\text{пкпд}_i} = 0, \quad (2.163)$$

У матрично-векторній формі рівняння (2.162) і (2.163) ММ усталених режимів i -го ПКП набувають вигляду:

$$\mathbf{f}_{\text{пкп}_i}(\mathbf{X}_{\text{пкп}_i}) = \mathbf{0}, \quad (2.164)$$

де $\mathbf{X}_{\text{пкп}_i} = (I_{1\text{пкпд}_i}, I_{1\text{пкпд}_i}, I_{2\text{пкпд}_i}, I_{2\text{пкпд}_i}, U_{\text{пкпд}_i}, U_{\text{пкпд}_i})_t$ вектор-стовпець координат режиму i -го ПКП.

Матриця Якобі $\mathbf{W}_{\text{пкп}_i}$ рівнянь (2.162) і (2.163) ММ усталених режимів i -го ПКП набуває вигляду:

$$\mathbf{W}_{\text{пкп}_i} = \left\| \begin{array}{cc|cc|c|c} 1 & 0 & -1 & 0 & G_{\text{пкп}_i} & \omega_{*\delta_i} C_{\text{пкп}_i} \\ 0 & 1 & 0 & -1 & \omega_{*\delta_i} C_{\text{пкп}_i} & -G_{\text{пкп}_i} \end{array} \right\|. \quad (2.165)$$

Для другого випадку (у вузлі включно з ПКП сполучено більше трьох віток) рівняння (2.158)..(2.161) набувають вигляду:

$$I_{\text{пкпд}_i} - G_{\text{пкп}_i} U_{\text{пкпд}_i} + \omega_{*\delta_i} C_{\text{пкп}_i} U_{\text{пкпд}_i} = 0; \quad (2.166)$$

$$I_{\text{пкпд}_i} - G_{\text{пкп}_i} U_{\text{пкпд}_i} - \omega_{*\delta_i} C_{\text{пкп}_i} U_{\text{пкпд}_i} = 0, \quad (2.167)$$

У матрично-векторній формі рівняння (2.166) і (2.167) ММ усталених режимів i -го ПКП набувають вигляду:

$$\mathbf{f}_{\text{пкп}_i}(\mathbf{X}_{\text{пкп}_i}) = \mathbf{0}, \quad (2.168)$$

де $\mathbf{X}_{\text{пкп}_i} = (I_{\text{пкпд}_i}, I_{\text{пкпд}_i}, U_{\text{пкпд}_i}, U_{\text{пкпд}_i})_t$ вектор-стовпець координат режиму i -го поперечного компенсуючого пристрою.

Матриця Якобі $\mathbf{W}_{\text{пкп}_i}$ рівнянь (2.166) і (2.167) набуває вигляду:

$$\mathbf{W}_{\text{пкп}_i} = \left\| \begin{array}{cc|c|c} 1 & 0 & G_{\text{пкп}_i} & \omega_{*\delta_i} C_{\text{пкп}_i} \\ 0 & 1 & \omega_{*\delta_i} C_{\text{пкп}_i} & -G_{\text{пкп}_i} \end{array} \right\| \quad (2.169)$$

2.2.9 Лінія електропересилання

Основні припущення.

1. Температурний режим ЛЕП є усталеним.
2. У ЛЕП виникають втрати активної та реактивної потужностей.
3. Поперечна активна провідність ЛЕП не враховується.
4. ЛЕП має зосереджені параметри.
5. Режим є симетричний.

Рівняння ММ усталених режимів i -ї ЛЕП сформовані у в.о. з використанням такої системи основних номінальних величин:

$$U_{12\sigma_i} = U_{12н_i} / \sqrt{3}; \quad (2.170)$$

$$Z_{12\sigma_i} = \sqrt{r_{12_i}^2 + x_{12_i}^2}; \quad (2.171)$$

$$I_{12\sigma_i} = U_{12\sigma_i} / Z_{12\sigma_i}, \quad (2.172)$$

де $U_{12н_i}$ – номінальне значення лінійної напруги i -ї ЛЕП;

r_{12} , x_{12} – поздовжні опори заступної схеми i -ї ЛЕП за номінальної частоти.

ЛЕП представлена П-подібною заступною схемою, що на рис. 2.13.

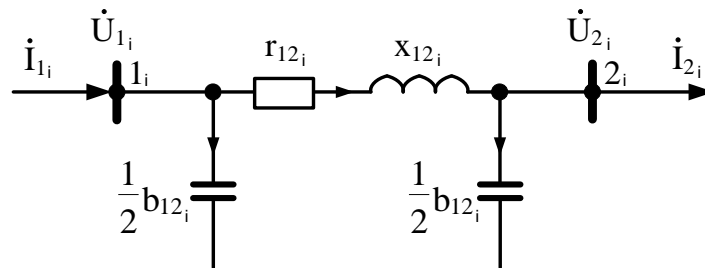


Рис. 2.13 Заступна схема лінії електропересилання

Рівняння ММ усталених режимів i -ї ЛЕП мають такий вигляд:

$$\dot{I}_i - j(-b_{12_i})\dot{U}_i / 2 - \left(\dot{U}_i - \dot{U}_{2_i} \right) / (r_{12_i} + jx_{12_i}) = 0; \quad (2.173)$$

$$\left(\dot{U}_i - \dot{U}_{2_i} \right) / (r_{12_i} + jx_{12_i}) - j(-b_{12_i})\dot{U}_{2_i} / 2 - \dot{I}_{2_i} = 0, \quad (2.174)$$

де b_{12_i} – поперечна ємнісна провідність заступної схеми i -ї ЛЕП за номінальної частоти.

В d - q координатах у в.о. з урахуванням впливу частоти струму й напруги на параметри, після деяких перетворень рівняння (2.173), (2.174) i -ї ЛЕП набувають вигляду:

$$z_{12_i}^2 I_{1d_i} - r_{12_i} U_{1d_i} - \omega_{12^*6_i} x_{12_i}^* U_{1q_i} + r_{12_i} U_{2d_i} + \omega_{12^*6_i} x_{12_i} U_{2q_i} = 0; \quad (2.175)$$

$$z_{12_i}^2 I_{1q_i} + \omega_{12^*6_i} x_{12_i}^* U_{1d_i} - r_{12_i} U_{1q_i} - \omega_{12^*6_i} x_{12_i} U_{2d_i} + r_{12_i} U_{2q_i} = 0; \quad (2.176)$$

$$z_{12_i}^2 I_{2d_i} - r_{12_i} U_{1d_i} - \omega_{12^*6_i} x_{12_i} U_{1q_i} + r_{12_i} U_{2d_i} + \omega_{12^*6_i} x_{12_i}^* U_{2q_i} = 0; \quad (2.177)$$

$$z_{12_i}^2 I_{2q_i} + \omega_{12^*6_i} x_{12_i} U_{1d_i} - r_{12_i} U_{1q_i} - \omega_{12^*6_i} x_{12_i}^* U_{2d_i} + r_{12_i} U_{2q_i} = 0, \quad (2.178)$$

де $z_{12_i}^2 = r_{12_i}^2 + \omega_{12^*6_i}^2 x_{12_i}^2$, $x_{12_i}^* = x_{12_i} + 0,5b_{12_i} (r_{12_i}^2 + \omega_{12^*6_i}^2 x_{12_i}^2) = x_{12_i} + 0,5b_{12_i} z_{12_i}^2$ – є функціями частоти.

Таким чином, рівняння (2.175)..(2.178) ММ усталених режимів i -ї ЛЕП у матрично-векторній формі набувають вигляду:

$$\mathbf{f}_{12_i}(\mathbf{X}_{12_i}) = \mathbf{0}, \quad (2.179)$$

де $\mathbf{X}_{12_i} = (\omega_{12^*6_i}, I_{1d_i}, I_{1q_i}, I_{2d_i}, I_{2q_i}, U_{1d_i}, U_{1q_i}, U_{2d_i}, U_{2q_i})_t$ – вектор-стовпець координат режиму i -ї ЛЕП.

Матриця Якобі \mathbf{W}_{12_i} рівнянь (2.175)..(2.178) ММ усталених режимів i -ї ЛЕП має такий вигляд:

$$\mathbf{W}_{12_i} = \begin{vmatrix} a_{11_i} & z_{12_i}^2 & 0 & 0 & 0 & -r_{12_i} & a_{17_i} & r_{12_i} & a_{19_i} \\ a_{21_i} & 0 & z_{12_i}^2 & 0 & 0 & a_{26_i} & -r_{12_i} & a_{28_i} & r_{12_i} \\ a_{31_i} & 0 & 0 & z_{12_i}^2 & 0 & -r_{12_i} & a_{37_i} & r_{12_i} & a_{39_i} \\ a_{41_i} & 0 & 0 & 0 & z_{12_i}^2 & a_{46_i} & -r_{12_i} & a_{48_i} & r_{12_i} \end{vmatrix}, \quad (2.180)$$

де $a_{11_i} = 2\omega_{12^*6_i} x_{12_i}^2 I_{1d_i} - (x_{12_i}^* - \omega_{12^*6_i}^2 b_{12_i} x_{12_i}^2) U_{1q_i} + x_{12_i} U_{2q_i}$; $a_{17_i} = -\omega_{12^*6_i} x_{12_i}^*$;

$a_{19_i} = \omega_{12^*6_i} x_{12_i}$; $a_{21_i} = 2\omega_{12^*6_i} x_{12_i}^2 I_{1q_i} + (x_{12_i}^* - \omega_{12^*6_i}^2 b_{12_i} x_{12_i}^2) U_{1d_i} - x_{12_i} U_{2d_i}$;

$a_{26_i} = \omega_{12^*6_i} x_{12_i}^*$; $a_{28_i} = -\omega_{12^*6_i} x_{12_i}$;

$a_{31_i} = 2\omega_{12^*6_i} x_{12_i}^2 I_{2d_i} - x_{12_i} U_{1q_i} + (x_{12_i}^* - \omega_{12^*6_i}^2 b_{12_i} x_{12_i}^2) U_{2q_i}$;

$a_{41_i} = 2\omega_{12^*6_i} x_{12_i}^2 I_{2q_i} + x_{12_i} U_{1d_i} - (x_{12_i}^* - \omega_{12^*6_i}^2 b_{12_i} x_{12_i}^2) U_{2d_i}$;

$a_{37_i} = -\omega_{12^*6_i} x_{12_i}$; $a_{39_i} = \omega_{12^*6_i} x_{12_i}^*$; $a_{46_i} = \omega_{12^*6_i} x_{12_i}$; $a_{48_i} = -\omega_{12^*6_i} x_{12_i}^*$.

2.2.10 Статичне навантаження

Основні припущення.

1. Температурний СН є усталеним.
2. СН є споживачем активної та реактивної енергії.
3. Саме СН забезпечує достатнє фільтрування гармонічних складових струму й напруги, а його воль-амперна характеристика є достатньо лінійною, що дозволяє не враховувати вплив спотворень кривих струму й напруги на координати режиму.
4. СН не є джерелом вищих гармонік.
5. Режим є симетричний.

Рівняння ММ усталених режимів СН, увімкненого в i -му вузлі, сформовані у в.о. з використанням такої системи основних номінальних величин:

$$U_{\text{наб}i} = U_{\text{навл}i} / \sqrt{3}; \quad (2.181)$$

$$S_{\text{наб}i} = \sqrt{P_{\text{навл}i}^2 + Q_{\text{навл}i}^2}, \quad (2.182)$$

де $U_{\text{навл}i}$, $P_{\text{навл}i}$, $Q_{\text{навл}i}$ – відповідно номінальна лінійна напруга, номінальні активна та реактивна потужності цього статичного навантаження.

Статичне навантаження в загальному вигляді представлено у вигляді статичних характеристик активної та реактивної потужностей за напругою:

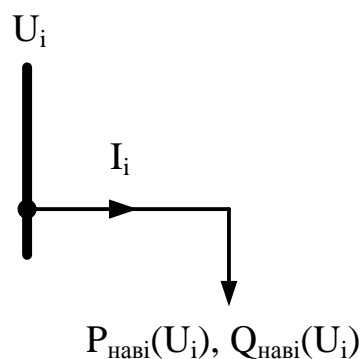


Рис. 2.14 Заступна схема статичного навантаження

Рівняння усталеного режиму увімкненого в i -му вузлі статичного навантаження в d - q координатах у в.о. матимуть вигляд:

$$I_{\text{наvd}_i} - \frac{P_{\text{нав}_i}(U_i)U_{d_i} - Q_{\text{нав}_i}(U_i)U_{q_i}}{U_i^2} = 0; \quad (2.183)$$

$$I_{\text{навq}_i} + \frac{P_{\text{нав}_i}(U_i)U_{q_i} + Q_{\text{нав}_i}(U_i)U_{d_i}}{U_i^2} = 0; \quad (2.184)$$

$$U_{d_i}^2 + U_{q_i}^2 - U_i^2 = 0, \quad (2.185)$$

де для ввімкненого в i -му вузлі статичного навантаження:

$P_{\text{нав}_i}(U_i)$, $Q_{\text{нав}_i}(U_i)$ – статичні характеристики активної та реактивної потужностей за напругою;

U_i , U_{d_i} , U_{q_i} – модуль і ортогональні складові напруги в i -му вузлі вмикання навантаження;

$I_{\text{наvd}_i}$, $I_{\text{навq}_i}$ – струм увімкненого в i -му вузлі навантаження в d - q координатах.

Таким чином, рівняння (2.183)..(2.185) усталених режимів увімкненого в i -му вузлі статичного навантаження в матрично-векторній формі набувають вигляду:

$$\mathbf{f}_{\text{нав}_i}(\mathbf{X}_{\text{нав}_i}) = \mathbf{0}, \quad (2.186)$$

де $\mathbf{X}_{\text{нав}_i} = (I_{\text{наvd}_i}, I_{\text{навq}_i}, U_{d_i}, U_{q_i}, U_i)_t$ – вектор-стовпець координат режиму увімкненого в i -му вузлі статичного навантаження.

Матриця Якобі $\mathbf{W}_{\text{нав}_i}$ рівнянь (2.183)..(2.185) усталених режимів увімкненого в i -му вузлі статичного навантаження має вигляд:

$$\mathbf{W}_{\text{нав}_i} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & \frac{P_{\text{нав}_i}(U_i)}{U_i^2} & \frac{Q_{\text{нав}_i}(U_i)}{U_i^2} & \frac{-a_i(U_i)U_{d_i} + b_i(U_i)U_{q_i}}{U_i^2} \\ 0 & 1 & \frac{Q_{\text{нав}_i}(U_i)}{U_i^2} & \frac{P_{\text{нав}_i}(U_i)}{U_i^2} & \frac{a_i(U_i)U_{q_i} + b_i(U_i)U_{d_i}}{U_i^2} \\ 0 & 0 & 2U_{d_i} & 2U_{q_i} & 2U_i \end{vmatrix}, \quad (2.187)$$

$$\text{де } a_i(U_i) = \frac{\partial P_{\text{нав}_i}(U_i)}{\partial U_i} - \frac{2P_{\text{нав}_i}(U_i)}{U_i}, \quad b_i(U_i) = \frac{\partial Q_{\text{нав}_i}(U_i)}{\partial U_i} - \frac{2Q_{\text{нав}_i}(U_i)}{U_i}.$$

2.2.11 Електроенергетична система живлення

Основні припущення.

1. Струм трифазного КЗ електроенергетична система живлення визначається її еквівалентними ЕРС та імпедансом.

2. Частота напруги ЕЕС є усталеною й рівна стандартному значенню.

3. ЕЕС має джерело синусоїдної ЕРС, а його воль-амперна характеристика є достатньо лінійною, що дозволяє не враховувати вплив спотворень кривих струму й напруги на координати режиму.

4. Режим є симетричний.

Рівняння ММ усталених режимів електроенергетичної системи живлення сформовані у в.о. з використанням такої системи основних номінальних величин:

$$U_{c_6} = U_{c_n} / \sqrt{3}; \quad (2.188)$$

$$S_{c_6} = S_{c_k}; \quad (2.189)$$

$$Z_{c_6} = \sqrt{3} U_{c_6}^2 / S_{c_6}, \quad (2.190)$$

де S_{c_k} , U_{c_n} – номінальна повна потужність трифазного короткого замикання та номінальне дієве значення лінійної напруги ЕЕС.

ЕЕС задано у вигляді джерела ЕРС та еквівалентного індуктанса; у в.о. її усталені режими описуються в $d-q$ координатах такими рівняннями:

$$E_{cd} - R_c I_{cd} + X_c I_{cq} - U_{cd} = 0; \quad (2.191)$$

$$E_{cq} - R_c I_{cq} - X_c I_{cd} - U_{cq} = 0, \quad (2.192)$$

де $E_c = \sqrt{E_{cd}^2 + E_{cq}^2}$ – дієве значення ЕРС системи в $d-q$ координатах;

R_c , X_c – еквівалентні, відповідно резистанс та індуктанс ЕЕС;

U_{cd} , U_{cq} – напруга на шинах підстанції в $d-q$ координатах;

$E_{cd} = E_c \cos \Psi_{0_{Ec}}$, де $\Psi_{0_{Ec}}$ – початкова фаза зображального вектора ЕРС.

Таким чином, рівняння (2.191), (2.192) ММ усталених режимів ЕЕС у матрично-векторній формі набувають вигляду:

$$\mathbf{f}_C(\mathbf{X}_C) = \mathbf{0}, \quad (2.193)$$

де $\mathbf{X}_C = (I_{cd}, I_{cq}, U_{cd}, U_{cq})_t$ вектор-стовпець координат режиму ЕЕС.

Матриця Якобі \mathbf{W}_C рівнянь (2.191), (2.192) має такий вигляд:

$$\mathbf{W}_C = \left\| \begin{array}{cc|cc} -R_c & X_c & -1 & 0 \\ -X_c & -R_c & 0 & -1 \end{array} \right\| \quad (2.194)$$

2.3 Керування напором та витратою агрегатів

Найефективніше керування багатоагрегатною помповою станцією можливе лише шляхом оптимального для кожного конкретного випадку поєднання різних способів керування [5, 12, 31, 38, 87, 88, 89, 108, 142, 143]. Розглянемо детальніше ці способи керування та їхнє застосування в розроблюваній математичній моделі.

2.3.1 Метод розрахунку розподілу робочої рідини між помпами агрегатів, що задає система керування двигунами

Якщо під час аналізу усталених режимів групи ВПТА не задати функцій розподілу витрат і напорів робочої рідини гідротрактів помп зі сполученими між собою гідротрактами, то існуватиме низка стійких режимів такої групи і, відповідно, з'являється неоднозначність розв'язку рівнянь стану. Це відбуватиметься тому, що одні й ті ж загальні напір і витрата можуть утворюватись безліччю комбінацій напорів і витрат агрегатів групи.

Розрахунок розподілу витрат і напорів здійснюється шляхом формування відповідних функцій керування [111]. У загальному випадку ці функції можуть бути складними залежностями як гідравлічних параметрів помп агрегатів, так і координат режиму гідравлічної мережі й ЕПС.

Багатомашинна схема займає територію, площа якої пропорційна кількості агрегатів зі значним обсягом трубопровідної обв'язки агрегатів.

Елементи трубопровідної обв'язки можуть бути окремо представлені у вигляді зовнішньої гідромережі (див. п. 2.2.2), що дає можливість знехтувати гідравлічними втратами енергії в них під час висвітлення даного питання.

Для однозначного розподілу сумарного тиску H_d та сумарної витрати Q_d робочої рідини між агрегатами групи необхідно задати функції керування тисками $F_{H_k}(p_H)$ кожної з pomp агрегатів, гідротракти яких сполучені послідовно та функції керування витратами $F_{Q_j}(p_Q)$ кожної з pomp агрегатів, гідротракти яких сполучені паралельно. Ці функції однозначно визначатимуть необхідні для забезпечення цього розподілу частоти обертання робочих коліс помпових агрегатів. Рівняння розподілу сумарного тиску та сумарної витрати робочої рідини між агрегатами групи мають вигляд:

$$H_{d_k} = F_{H_k}(p_H), \quad k = \overline{1, m}; \quad (2.195)$$

$$Q_{d_j} = F_{Q_j}(p_Q), \quad j = \overline{1, p}, \quad (2.196)$$

де p_H і p_Q – параметри цих функцій керування; в загальному випадку ними можуть бути будь-які параметри елементів, координати режиму ЕТК, споживачів рідини чи їхня комбінація [136].

Із метою формалізації формування функцій керування введемо поняття «елементарної» підгрупи агрегатів – тої, яка складається лише з одиничних агрегатів, сполучених між собою послідовно чи паралельно гідротрактами pomp. У свою чергу, спільні гідротракти елементарних підгруп агрегатів можуть бути також сполучені між собою й утворювати вже «неелементарні» підгрупи. У цьому випадку – аналогічно маємо справу з двома типами неелементарних підгруп.

1. «Послідовна» неелементарна підгрупа складається з послідовно сполучених між собою «паралельних» елементарних підгруп (віток), у кожній з яких гідротракти одиничних агрегатів сполучені паралельно. Ця неелементарна підгрупа перетворюється в елементарну, якщо в усіх послідовних вітках є лише по одному агрегату (рис. 2.15).

2. «Паралельна» неелементарна підгрупа складається з паралельно

сполучених між собою «послідовних» елементарних підгруп (віток), у кожній з яких гідротракти одиничних агрегатів сполучені послідовно. Ця неелементарна підгрупа перетворюється в елементарну, якщо в усіх з паралельних вітках є лише по одному агрегату (рис. 2.16).

Таким чином, для агрегатів і їх груп необхідно:

- 1) сформувавши функції керування для "послідовної" елементарної підгрупи;
- 2) сформувавши функції керування для "паралельної" елементарної підгрупи;
- 3) сформувавши функції керування для "послідовної" неелементарної підгрупи;
- 4) сформувавши функції керування для "паралельної" неелементарної підгрупи;
- 5) розробити алгоритм формування функцій керування для сполучених між собою неелементарних підгруп.

У [136] доведено, що на відміну від загальноприйнятої думки, далеко не завжди енергетично найефективнішим є застосування однакових за номінальним тиском і витратою паралельно сполучених гідротрактами агрегатів. Задача значно ускладнюється, якщо припустити аналогічне міркування щодо послідовно сполучених гідротрактами агрегатів. Таким чином, оптимізація режимів помпових агрегатів є окремою складною задачею. Її вирішення залежить від низки чинників, що враховуються під час розгляду кожного конкретного випадку; воно виходить за межі цієї роботи.

Зважаючи на викладені міркування, із невідомими в загальному випадку конкретними вимогами до системи керування, логічним буде встановлення таких функцій керування, за яких розподіл об'ємних витрат і напорів агрегатів здійснюється пропорційно до їхніх номінальних значень.

У цьому разі функції керування напором помпи k -го агрегату та витратою помпи j -го агрегату набувають такого вигляду:

$$F_{H_k}(\mathbf{p}_H) = k_{\text{роз.}H_k} H_d, \quad k = \overline{1, m}; \quad (2.197)$$

$$F_{Q_j}(\mathbf{p}_Q) = k_{\text{роз.}Q_j} Q_d, \quad j = \overline{1, n}, \quad (2.198)$$

де $k_{\text{роз.}H_k}$, $k_{\text{роз.}Q_j}$ – відповідно, сталі коефіцієнти розподілу загальних для групи сполучених гідротрактами агрегатів напору та витрати робочої рідини.

При цьому слід урахувувати, що координати режиму жодного з агрегатів не повинні перевищувати їхні номінальні значення з метою забезпечення тривалого безаварійного функціонування групи. Тому запропоновано метод формування спрощених функцій керування у вигляді сталих коефіцієнтів розподілу $k_{\text{роз.Н}_k}$ напорів і $k_{\text{роз.}Q_j}$ витрат.

Розрахунок коефіцієнтів розподілу необхідно розпочинати з виділення елементарних «паралельних» і «послідовних» підгруп агрегатів.

На першому етапі необхідно обчислити коефіцієнти розподілу об'ємних витрат і напорів робочої рідини pomp елементарних підгруп.

На другому етапі обчислюються коефіцієнти розподілу витрат і напорів рідини неелементарних підгруп, які складаються з елементарних.

1) Послідовне сполучення гідротрактів pomp елементарної підгрупи агрегатів. На рис. 2.15 зображено схему послідовного сполучення гідротрактів pomp елементарної підгрупи агрегатів. Послідовно сполучено між собою m гідротрактів pomp з такою нумерацією: $k=1,2,\dots,m$. У а.о. сумарний напір m послідовно сполучених гідротрактами агрегатів дорівнює сумі усіх їхніх напорів, а об'ємна витрата робочої рідини є однаковою для всіх агрегатів.

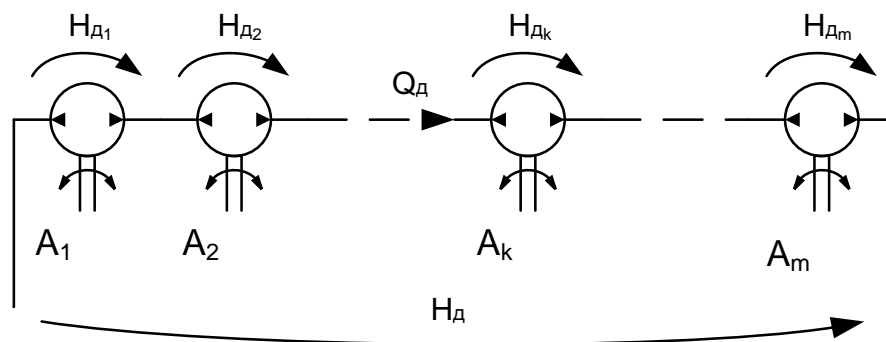


Рис. 2.15 Схема послідовного сполучення гідротрактів pomp елементарної підгрупи агрегатів

Напір робочої рідини помпи кожного з агрегатів повинен розподілятися пропорційно до його номінального напору й обернено пропорційно до суми номінальних напорів усіх m агрегатів. Крім цього, необхідно, щоб загальна

витрата робочої рідини не перевищувала жодної з номінальних витрат окремих pomp агрегатів підгрупи. Знаходимо в а.о. мінімальну номінальну об'ємну витрату pomp цієї підгрупи агрегатів:

$$Q_{\text{Дмін}}^{(\text{пос})} = \min(Q_{\text{Дном}_1}, Q_{\text{Дном}_2}, \dots, Q_{\text{Дном}_m}). \quad (2.199)$$

За цього значення спільної номінальної витрати для m послідовно сполучених гідротрактів кожна з відцентрових pomp матиме своє значення напору, в а.о., яке визначається її напірною характеристикою:

$$H_{\text{Дк}} = H_k(Q_{\text{Дмін}}^{(\text{пос})}) = H_k\left(\min(Q_{\text{Дном}_1}, Q_{\text{Дном}_2}, \dots, Q_{\text{Дном}_m})\right), \quad k = \overline{1, m}, \quad (2.200)$$

де $H_{\text{Дк}}$ – дійсний напір помпи k -го агрегату підгрупи у в.о.;

$H_k(Q_{\text{Дмін}}^{(\text{пос})})$ – напірна характеристика помпи k -го агрегату підгрупи у відносних номінальних одиницях помпи цього агрегату.

У а.о. сумарний напір m послідовно сполучених pomp агрегатів дорівнює сумі усіх їхніх напорів:

$$H_{\text{Д}}^{(\text{пос})} = \sum_{k=1}^m H_{\text{Дк}} = \sum_{k=1}^m \left(H_k \left(\min(Q_{\text{Дном}_1}, Q_{\text{Дном}_2}, \dots, Q_{\text{Дном}_m}) \right) \right), \quad (2.201)$$

У результаті, коефіцієнти розподілу напорів pomp агрегатів підгрупи визначаються таким чином:

$$k_{\text{роз.Нк}} = \frac{H_{\text{Дк}}}{H_{\text{Д}}^{(\text{пос})}} = \frac{H_k \left(\min(Q_{\text{Дном}_1}, Q_{\text{Дном}_2}, \dots, Q_{\text{Дном}_m}) \right)}{\sum_{k=1}^m \left(H_k \left(\min(Q_{\text{Дном}_1}, Q_{\text{Дном}_2}, \dots, Q_{\text{Дном}_m}) \right) \right)}, \quad k = \overline{1, m}. \quad (2.202)$$

Очевидно, що $\sum_{k=1}^m k_{\text{роз.Нк}} = 1$.

2) Паралельне сполучення гідротрактів pomp елементарної підгрупи агрегатів. На рис. 2.16 зображено схему паралельного сполучення гідротрактів pomp елементарної підгрупи агрегатів. Паралельно сполучено між собою n гідротрактів з такою нумерацією: $j=1, 2, \dots, n$. В а.о. сумарна витрата робочої рідини m паралельно сполучених агрегатів дорівнює сумі усіх їхніх витрат, а напір рідини є однаковим для всіх агрегатів.

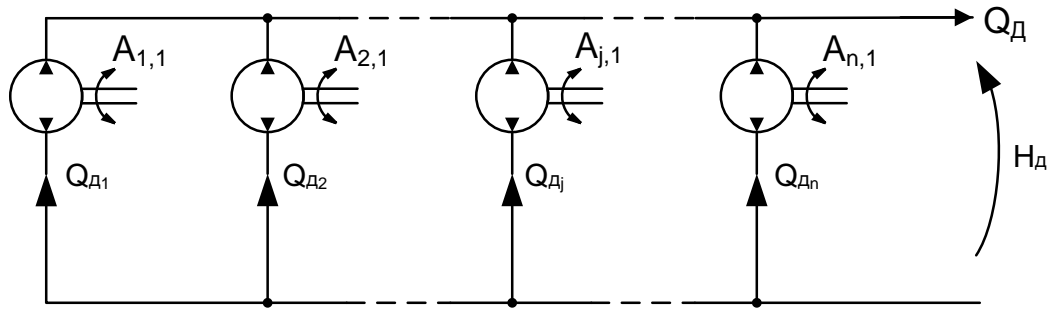


Рис. 2.16 Схема паралельного сполучення гідротрактів pomp елементарної підгрупи агрегатів

Витрати робочої рідини кожної з pomp повинні розподілятися пропорційно до їхніх номінальних витрат і обернено пропорційно до суми номінальних витрат усіх pomp n агрегатів. Крім цього, необхідно, щоб загальний напір не перевищував жодного з номінальних напорів pomp агрегатів. Знаходимо в а.о. мінімальний номінальний напір підгрупи:

$$H_{\text{Дмін}}^{(\text{пар})} = \min(H_{\text{Дном}_1}, H_{\text{Дном}_2}, \dots, H_{\text{Дном}_n}), \quad (2.203)$$

де $H_{\text{Дн}j}$ – номінальний напір помпи j -го агрегату підгрупи в а.о.

За цього значення спільного номінального напору для n паралельно сполучених гідротрактів, кожна з відцентрових pomp матиме своє значення витрати, в а.о., яке визначається її напірною характеристикою:

$$Q_{\text{Д}j} = Q_j(H_{\text{Дмін}}^{(\text{пар})}) = Q_j(\min(H_{\text{Дном}_1}, H_{\text{Дном}_2}, \dots, H_{\text{Дном}_n})), \quad j = \overline{1, n}, \quad (2.204)$$

де $Q_{\text{Д}j}$ – дійсний напір помпи j -го агрегату підгрупи в а.о.,

$Q_j(H_{\text{Дмін}}^{(\text{пар})})$ – напірна характеристика помпи j -го агрегату підгрупи.

Сумарна витрата n паралельно сполучених pomp агрегатів в а.о. дорівнює сумі усіх їхніх витрат:

$$Q_{\text{Д}}^{(\text{пар})} = \sum_{j=1}^n Q_{\text{Д}j} = \sum_{j=1}^n (Q_j(\min(H_{\text{Дном}_1}, H_{\text{Дном}_2}, \dots, H_{\text{Дном}_n}))), \quad (2.205)$$

У результаті, коефіцієнти розподілу витрат pomp агрегатів підгрупи визначаються таким чином:

$$k_{\text{роз.}Q_j} = \frac{Q_{D_j}}{Q_D^{(\text{пар})}} = \frac{Q_j \left(\min \left(H_{D_{\text{ном}_1}}, H_{D_{\text{ном}_2}}, \dots, H_{D_{\text{ном}_n}} \right) \right)}{\sum_{j=1}^n \left(Q_j \left(\min \left(H_{D_{\text{ном}_1}}, H_{D_{\text{ном}_2}}, \dots, H_{D_{\text{ном}_n}} \right) \right) \right)}, \quad j = \overline{1, n}. \quad (2.206)$$

Очевидно, що $\sum_{j=1}^n k_{\text{роз.}Q_j} = 1$.

3) Послідовне сполучення гідротрактів неелементарної підгрупи агрегатів. У загальному випадку така підгрупа може складатись з послідовно сполучених між собою двох типів елементарних підгруп – із паралельним чи послідовним сполученням гідротрактів pomp агрегатів. У а.о. сумарний напір m послідовно гідротрактами підгруп дорівнює сумі усіх їхніх напорів, а об'ємна витрата робочої рідини є однаковою для всіх підгруп. Обчислення здійснюються за тим самим алгоритмом, що і для елементарних підгруп. Нехай послідовно сполучено між собою n^* елементарних підгруп із паралельним гідротрактів pomp агрегатів з такою нумерацією: $j^* = 1, 2, \dots, n^*$ та m^* елементарних підгруп із послідовним гідротрактів pomp агрегатів з такою нумерацією: $k^* = 1, 2, \dots, m^*$.

Отже, в а.о. сумарна номінальна витрата послідовно сполучених елементарних підгруп визначається таким чином:

$$Q_{D_n}^{*(\text{пос})} = \min \left(Q_{D_{n_1}}, Q_{D_{n_2}}, \dots, Q_{D_{n_{m^*}}} \right), \quad (2.207)$$

де $Q_{D_{n_1}}, Q_{D_{n_2}}, \dots, Q_{D_{n_{m^*}}}$ – номінальні витрати елементарних підгруп в а.о., обчислені за формулами (2.199) чи, відповідно, (2.205).

За цього значення спільної номінальної витрати для m^* послідовно сполучених гідротрактів елементарних підгруп сумарне значення напору H_D^* неелементарної групи дорівнює сумі:

- мінімальних номінальних напорів елементарних підгруп, гідротракти pomp яких сполучені паралельно, згідно з формулою (2.203):

$$H_D^{*(\text{пар})} = \sum_{j^*=1}^{n^*} H_{D_{j^*}}^{*(\text{пар})} = \sum_{j^*=1}^{n^*} \left(\min \left(H_{D_{\text{ном}_1}}, H_{D_{\text{ном}_2}}, \dots, H_{D_{\text{ном}_n}} \right) \right)_{j^*}; \quad (2.208)$$

• напорів елементарних підгруп, гідротракти pomp яких сполучені послідовно, згідно формули (2.201):

$$H_D^{*(\text{пос})} = \sum_{k^*=1}^{m^*} H_{D_{k^*}} = \sum_{k^*=1}^{m^*} \left(\sum_{k=1}^m H_{D_k} \right) = \sum_{k^*=1}^{m^*} \left(\sum_{k=1}^m \left(H_k \left(\min(Q_{D_{\text{ном}_1}}, Q_{D_{\text{ном}_2}}, \dots, Q_{D_{\text{ном}_m}}) \right) \right)_{k^*} \right), \quad (2.209)$$

тобто:

$$H_D^* = H_D^{*(\text{пар})} + H_D^{*(\text{пос})} = \sum_{j^*=1}^{n^*} \left(\min(H_{D_{\text{ном}_1}}, H_{D_{\text{ном}_2}}, \dots, H_{D_{\text{ном}_n}}) \right)_{j^*} + \sum_{k^*=1}^{m^*} \left(\sum_{k=1}^m \left(H_k \left(\min(Q_{D_{\text{ном}_1}}, Q_{D_{\text{ном}_2}}, \dots, Q_{D_{\text{ном}_m}}) \right) \right)_{k^*} \right). \quad (2.210)$$

Тому коефіцієнти розподілу напорів між помпами елементарних підгруп агрегатів дорівнюють:

$$k_{\text{роз.}H_{j^*}}^* = H_{D_{j^*}}^* / H_D^*, \quad j^* = \overline{1, n^*}; \quad k_{\text{роз.}H_{k^*}}^* = H_{D_{k^*}}^* / H_D^*, \quad k^* = \overline{1, m^*}. \quad (2.211)$$

$$\text{Очевидно, що } \sum_{j^*=1}^{n^*} k_{\text{роз.}H_{j^*}}^* + \sum_{k^*=1}^{m^*} k_{\text{роз.}H_{k^*}}^* = 1.$$

4) Паралельне сполучення гідротрактів неелементарної підгрупи агрегатів. У загальному така підгрупа може складатись із паралельно сполучених між собою двох типів елементарних підгруп – із послідовним чи паралельним сполученням гідротрактів pomp агрегатів. У а.о. сумарна об'ємна витрата робочої рідини m паралельно сполучених гідротрактами підгруп дорівнює сумі усіх їхніх витрат, а напір робочої рідини є однаковим для всіх підгруп. Обчислення здійснюються за тим самим алгоритмом, що і для елементарних підгруп. Нехай послідовно сполучено між собою m^* елементарних підгруп із послідовним гідротрактів pomp агрегатів з такою нумерацією: $k^*=1, 2, \dots, m^*$ та n^* елементарних підгруп із паралельним гідротрактів pomp агрегатів з такою нумерацією: $j^*=1, 2, \dots, n^*$.

Отже, в а.о. сумарний номінальний напір паралельно сполучених елементарних підгруп визначається таким чином:

$$H_{D_n}^{*(\text{пар})} = \min(H_{D_{n_1}}, H_{D_{n_2}}, \dots, H_{D_{n_{m^*}}}), \quad (2.212)$$

де $H_{D_{n_1}}, H_{D_{n_2}}, \dots, H_{D_{n_{m^*}}}$ – номінальні напори елементарних підгруп в а.о.,

обчислені за формулами (2.201) чи, відповідно, (2.203).

За цього значення спільного номінального напору для n^* паралельно сполучених гідротрактів елементарних підгруп кожна з них матиме своє значення витрати Q_D^* неелементарної групи дорівнює сумі:

- витрат елементарних підгруп, гідротракти pomp яких сполучені послідовно, згідно формули (2.199):

$$Q_D^{*(\text{пос})} = \sum_{k^*=1}^{m^*} Q_{D_k^*}^{*(\text{пос})} = \sum_{k^*=1}^{m^*} \left(\min(Q_{D_{\text{НОМ}_1}}, Q_{D_{\text{НОМ}_2}}, \dots, Q_{D_{\text{НОМ}_m}})_{k^*} \right); \quad (2.213)$$

- мінімальних номінальних витрат елементарних підгруп, гідротракти pomp яких сполучені паралельно, згідно формули (2.204):

$$Q_D^{*(\text{пар})} = \sum_{j^*=1}^{n^*} Q_{D_j^*}^{*(\text{пар})} = \sum_{j^*=1}^{n^*} \left(\sum_{j=1}^n \left(Q_j \left(\min(H_{D_{\text{НОМ}_1}}, H_{D_{\text{НОМ}_2}}, \dots, H_{D_{\text{НОМ}_n}}) \right) \right)_{j^*} \right), \quad (2.214)$$

тобто:

$$Q_D^* = Q_D^{*(\text{пос})} + Q_D^{*(\text{пар})} = \sum_{k^*=1}^{m^*} \left(\min(Q_{D_{\text{НОМ}_1}}, Q_{D_{\text{НОМ}_2}}, \dots, Q_{D_{\text{НОМ}_m}})_{k^*} \right) + \sum_{j^*=1}^{n^*} \left(\sum_{j=1}^n \left(Q_j \left(\min(H_{D_{\text{НОМ}_1}}, H_{D_{\text{НОМ}_2}}, \dots, H_{D_{\text{НОМ}_n}}) \right) \right)_{j^*} \right). \quad (2.215)$$

Коефіцієнти розподілу напорів між помпами елементарних підгруп визначаються за формулами:

$$k_{\text{роз.}Q_k^*}^* = Q_{D_k^*}^* / Q_D^*, \quad k^* = \overline{1, m^*}; \quad k_{\text{роз.}Q_j^*}^* = Q_{D_j^*}^* / Q_D^*, \quad j^* = \overline{1, n^*}. \quad (2.216)$$

$$\text{Очевидно, що } \sum_{k^*=1}^{m^*} k_{\text{роз.}Q_k^*}^* + \sum_{j^*=1}^{n^*} k_{\text{роз.}Q_j^*}^* = 1.$$

5) Подальше обчислення коефіцієнтів розподілу об'ємних витрат і напорів робочої рідини здійснюється за наведеним вище алгоритмом, аж до найбільшої неелементарної підгрупи агрегатів, яка збігається зі заданою схемою сполучення їхніх гідротрактів.

Остаточні значення коефіцієнтів розподілу визначаються добутком відповідних коефіцієнтів розподілу напорів і витрат pomp агрегатів, обчислених для елементарних підгруп на першому етапі, й коефіцієнтів

розподілу напорів та витрат відповідних елементарних підгруп, обчислених для неелементарних підгруп на другому етапі.

Слід зазначити, що у формулах (2.200), (2.208), (2.209), (2.204), (2.213), (2.214) обчислюються конкретні числові значення напорів і витрат за напірними характеристиками pomp. У результаті отримуються сталі коефіцієнти розподілу. У залежності від поставленої мети в кожному конкретному разі можна задати змінні параметри відцентрових pomp, внаслідок чого коефіцієнти розподілу перетворяться у відповідні функційні залежності. Кожний такий конкретний випадок потребує окремого аналізу.

2.3.2 Математична модель гідравлічних зв'язків багатоагрегатної групи pomp і гідромережі та керування розподілом робочої рідини

Основні припущення.

1. Температурний режим є усталеним.
2. Робоча рідина є однорідною.
3. Жодні втрати під час запису рівнянь зв'язку не враховуються.

Зв'язок між усіма ВП агрегатів і ГМ встановлюється на підставі конфігурації гідравлічної частини та обчислених за методом, викладеним у п. 2.3.1, функцій керування тисками $F_{H_k}(\mathbf{p}_H)$ кожної з pomp агрегатів, гідротракти яких сполучені послідовно та функції керування витратами $F_{Q_j}(\mathbf{p}_Q)$ кожної з pomp агрегатів, гідротракти яких сполучені паралельно [223, 8, 46, 47, 49]. Рівняння стану ГМ і кожної з ВП сформовані у в.о. згідно 2.2.1. Рівняння розподілу робочої рідини (2.195) і (2.196) між агрегатами групи перепишемо у в.о. з використанням таких коефіцієнтів переходу між системами базових величин згідно з (2.7), (2.8):

$$k_{Q,VP_{ji}} = \frac{Q_{VP,6_{ji}}}{Q_{VP,6}}; k_{H,VP_{ji}} = \frac{H_{VP,6_{ji}}}{H_{VP,6}}; k_{Q,GM} = \frac{Q_{GM,6}}{Q_{VP,6}}; k_{H,GM} = \frac{H_{GM,6}}{H_{VP,6}}. \quad (2.217)$$

Візьмемо за основу схему сполучення ВПТА, що показана на рис. 2.17. На цій схемі зображено неелементарну групу агрегатів, яка складається з паралельно сполучених гідротрактами p елементарних підгруп. Нумерація

цих підгруп така: $j=1,2,\dots,p$. Кожна j -а елементарна підгрупа складається з різної кількості m_j послідовно сполучених гідротрактами агрегатів.

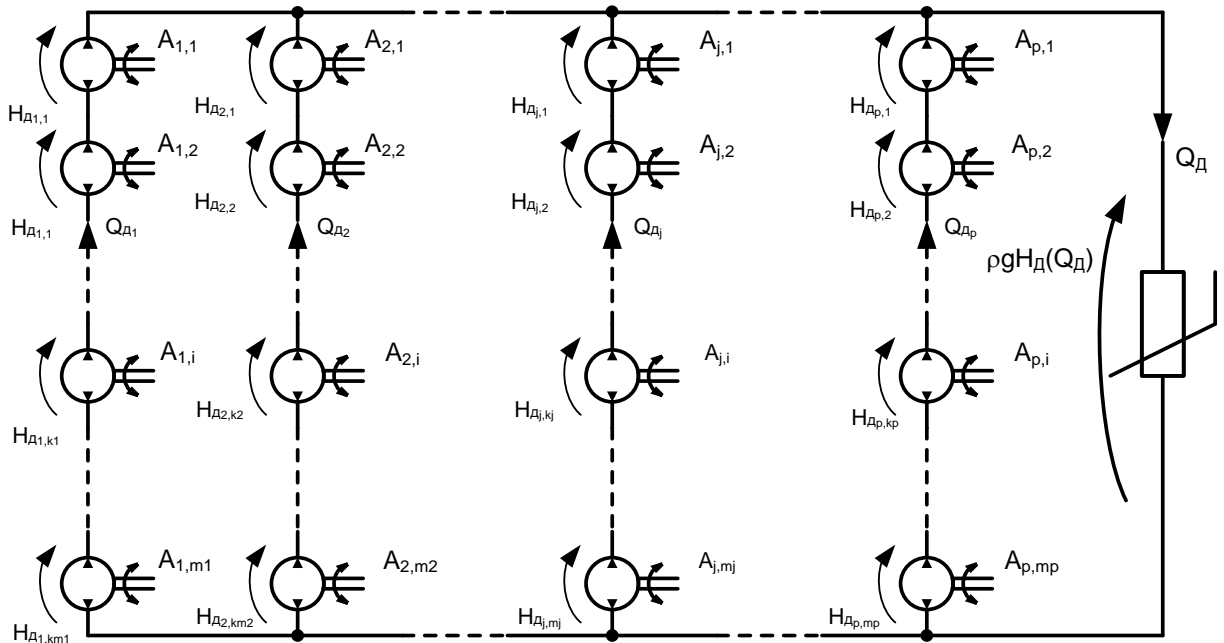


Рис. 2.17 Схема комбінованого сполучення гідротрактів pomp агрегатів
Нумерація цих агрегатів у кожній з груп така: $i=1,2,\dots, m_j$. Таким чином,

вся неелементарна група складається з $n = \sum_{j=1}^p m_j$ агрегатів. Надалі для

кожного i -го агрегату A , який розміщений у j -й підгрупі застосовано позначення $A_{i,j}$. Окремо слід зауважити, що під агрегатом $A_{i,j}$ можна також розглядати й неелементарну підгрупу агрегатів.

Із урахуванням того, що в кожній j -й підгрупі витрати послідовно сполучених гідротрактами агрегатів є однакові, рівняння зв'язку між гідромережею та всією групою агрегатів за витратою достатньо записати, використавши по одному (довільному) агрегату j -ї підгрупи. Воно встановлюється на підставі балансу витрат і має такий вигляд:

$$\sum_{j=1}^p (k_{Q,ВП,j} Q_{D,j,i}) - k_{Q,ГМ} Q_D = 0, \quad i - \text{довільне: } 1 \text{ рівняння.} \quad (2.218)$$

Зв'язок між гідромережею та всією групою агрегатів за напором встановлюється на підставі балансу напорів. Для цього, з урахуванням двох попередніх виразів, достатньо записати одне рівняння для довільної i -ї

підгрупи паралельно сполучених гідротрактами агрегатів:

$$\sum_{i=1}^{m_j} (k_{H.VП_{j,i}} H_{d_{j,i}}) - k_{H.ГМ} H_d = 0, \quad j - \text{довільне} : 1 \text{ рівняння.} \quad (2.219)$$

Із урахуванням того, що в кожній j -й підгрупі витрати послідовно сполучених гідротрактами агрегатів є однакові, рівняння розподілу витрат між агрегатами всієї групи достатньо записати, використавши по одному (довільному) агрегату j -ї підгрупи. Воно матиме такий вигляд:

$$k_{Q.VП_{j,i}} Q_{d_{j,i}} - k_{Q.ГМ} F_{Q_j}(\mathbf{p}_{Q_j}) = 0, \quad j = \overline{1, p-1}, \quad i - \text{довільне} : p-1 \text{ рівнянь.} \quad (2.220)$$

Рівняння розподілу напорів послідовно сполучених гідротрактами агрегатів для j -ї групи матиме вигляд:

$$k_{H.VП_{j,i}} H_{d_{j,i}} - k_{H.ГМ} F_{H_{j,i}}(\mathbf{p}_{H_{j,i}}) = 0, \quad j = \overline{1, p}, \quad i = \overline{1, m_j - 1} : n-p \text{ рівнянь.} \quad (2.221)$$

Рівність витрат m_j послідовно сполучених гідротрактами агрегатів у кожній j -й підгрупі відображається таким рівнянням:

$$k_{Q.VП_{j,i}} Q_{d_{j,i}} - k_{Q.VП_{j,i+1}} Q_{d_{j,i+1}} = 0, \quad j = \overline{1, p}, \quad i = \overline{1, m_j - 1} : n-p \text{ рівнянь.} \quad (2.222)$$

Рівність напорів усіх p паралельно сполучених гідротрактами підгруп агрегатів відображається таким рівнянням:

$$\sum_{i=1}^{m_j} (k_{H.VП_{j,i}} H_{d_{j,i}}) - \sum_{i=1}^{m_{j+1}} (k_{H.VП_{j+1,i}} H_{d_{j+1,i}}) = 0, \quad j = \overline{1, p-1} : p-1 \text{ рівнянь.} \quad (2.223)$$

Отже, для зображеної на рис. 2.17 схеми комбінованого сполучення гідротрактами pomp агрегатів отримуємо таку кількість рівнянь зв'язку:

$$(n-p) + (p-1) + 1 + (p-1) + (n-p) + 1 = 2n.$$

У разі використання спрощених функцій керування витратами та напорами ВПТА у вигляді коефіцієнтів розподілу (2.198), (2.197) маємо:

$$F_{Q_j}(\mathbf{p}_{Q_j}) = k_{\text{роз.}Q_j} Q_d; \quad (2.224)$$

$$F_{H_{j,i}}(\mathbf{p}_{H_{j,i}}) = k_{\text{роз.}H_{j,i}} H_d. \quad (2.225)$$

У матрично-векторній формі рівняння (2.218)..(2.221) математичної моделі гідравлічних зв'язків багатоагрегатної системи набувають вигляду:

$$\mathbf{f}_{зв}(\mathbf{X}_{зв}) = \mathbf{0}, \quad (2.226)$$

де $\mathbf{X}_{зв} = (Q_d, H_d, Q_d, H_d)_t$ – вектор-стовпець координат режиму багатоагрегатної системи pomp і гідромережі;

$$\mathbf{Q}_d = (Q_{d_{1,1}}, \dots, Q_{d_{1,m_1}}, Q_{d_{2,1}}, \dots, Q_{d_{2,m_2}}, \dots, Q_{d_{j,1}}, \dots, Q_{d_{j,m_j}}, \dots, Q_{d_{p,1}}, \dots, Q_{d_{p,m_p}});$$

$$\mathbf{H}_d = (H_{d_{1,1}}, \dots, H_{d_{1,m_1}}, H_{d_{2,1}}, \dots, H_{d_{2,m_2}}, \dots, H_{d_{j,1}}, \dots, H_{d_{j,m_j}}, \dots, H_{d_{p,1}}, \dots, H_{d_{p,m_p}}).$$

З метою формалізації ММ представляємо матрицю Якобі $\mathbf{W}_{зв}$ системи рівнянь (2.226) гідравлічних зв'язків у такому вигляді:

$$\mathbf{W}_{зв} = \underbrace{\left\| \mathbf{W}_{HQ_d} \mid \mathbf{W}_{HQ_{agr}} \right\|}_{\substack{4n \\ \text{СТОВПЦІВ}}} \left. \vphantom{\mathbf{W}_{зв}} \right\} 2n \text{ рядків}, \quad (2.227)$$

$$\text{де } \mathbf{W}_{HQ_d} = \begin{vmatrix} \mathbf{W}_{HQ_d}^{(2.218)} \\ \mathbf{W}_{HQ_d}^{(2.219)} \\ \mathbf{W}_{HQ_d}^{(2.220)} \\ \mathbf{W}_{HQ_d}^{(2.221)} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{vmatrix}; \quad \mathbf{W}_{HQ_{agr}} = \begin{vmatrix} \mathbf{W}_{HQ_{agr}}^{(2.218)} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{W}_{HQ_{agr}}^{(2.219)} \\ \mathbf{W}_{HQ_{agr}}^{(2.220)} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{W}_{HQ_{agr}}^{(2.221)} \\ \mathbf{W}_{HQ_{agr}}^{(2.222)} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{W}_{HQ_{agr}}^{(2.223)} \end{vmatrix}, \quad (2.228)$$

$$\text{де } \mathbf{W}_{HQ_d}^{(2.218)} = \left\| -k_{Q_{ГМ}} \mid 0 \right\|; \quad \mathbf{W}_{HQ_d}^{(2.219)} = \left\| 0 \mid -k_{H_{ГМ}} \right\|;$$

$$\mathbf{W}_{HQ_{agr}}^{(2.218)} = \left\| k_{Q_{ВП_{1,1}}} \mid 0 \mid \dots \mid k_{Q_{ВП_{2,1}}} \mid 0 \mid \dots \mid \dots \mid k_{Q_{ВП_{p,1}}} \mid 0 \mid \dots \mid 0 \right\|;$$

$$\mathbf{W}_{HQ_{agr}}^{(2.219)} = \left\| k_{H_{ВП_{1,1}}} \mid \dots \mid k_{H_{ВП_{1,m_1}}} \mid 0 \mid \dots \mid 0 \right\|;$$

$$\mathbf{W}_{H_d}^{(2.221)} = \text{diag}(k_{H_{ВП_{j,i}}}), \quad j = \overline{1, p}, \quad i = \overline{1, m_j - 1};$$

$$\mathbf{W}_{Q_d}^{(2.220)} = \text{diag} \left[\left\| \begin{array}{cccc} k_{Q_{ВП_{j,1}}} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 0 \end{array} \right\| \right], \quad j = \overline{1, p-1};$$

$$\mathbf{W}_{\text{HQд}}^{(2,220)} = \left\| \begin{array}{c|c} -k_{\text{Q.ГМ}} k_{\text{роз. Q}_1} & 0 \\ \hline 0 & 0 \\ \hline \dots & \dots \\ \hline -k_{\text{Q.ГМ}} k_{\text{роз. Q}_2} & 0 \\ \hline 0 & 0 \\ \hline \dots & \dots \\ \hline -k_{\text{Q.ГМ}} k_{\text{роз. Q}_{p-1}} & 0 \\ \hline 0 & 0 \\ \hline \dots & \dots \\ \hline 0 & 0 \end{array} \right\| ; \mathbf{W}_{\text{HQд}}^{(2,221)} = \left\| \begin{array}{c|c} 0 & -k_{\text{H.ГМ}} k_{\text{роз. H}_{1,1}} \\ \hline \dots & \dots \\ \hline 0 & -k_{\text{H.ГМ}} k_{\text{роз. H}_{1,m_j-1}} \\ \hline 0 & -k_{\text{H.ГМ}} k_{\text{роз. H}_{2,1}} \\ \hline \dots & \dots \\ \hline 0 & -k_{\text{H.ГМ}} k_{\text{роз. H}_{p,m_j-1}} \end{array} \right\| ;$$

$$\mathbf{W}_{\text{Hд}}^{(2,222)} = \text{diag} \left(\left\| k_{\text{Q.ВП}_{j,i}} \quad \left| \quad -k_{\text{Q.ВП}_{j,i+1}} \right. \right\| \right), \quad j = \overline{1, p}, \quad i = \overline{1, m_j - 1};$$

$$\mathbf{W}_{\text{Qд}}^{(2,223)} = \text{diag} \left(\left\| k_{\text{H.ВП}_{j,1}} \quad \left| \quad \dots \quad \left| \quad k_{\text{H.ВП}_{j,m_j}} \quad \left| \quad k_{\text{H.ВП}_{j+1,1}} \quad \left| \quad \dots \quad \left| \quad k_{\text{H.ВП}_{j+1,m_{j+1}}} \right. \right. \right. \right\| \right), \quad j = \overline{1, p-1}.$$

2.3.3 Частотне керування двигунами помпових агрегатів

Отримані в [221, 48] результати аналізу усталених режимів агрегату асинхронний (синхронний) двигун – ВП без урахування функції керування електромагнітними координатами режиму електродвигуна вказують на можливість існування декількох стійких режимів з різними техніко-економічними показниками. Тому ММ усталених режимів таких агрегатів необхідно доповнити рівняннями функцій керування електромагнітними режимами двигунів для отримання єдиного розв’язку [43, 44].

Реалізація частотного керування агрегатами можлива як скалярним, так і значно ефективнішим векторним способом [219, 13, 35, 53, 90, 99, 106, 114, 117, 126, 140, 145, 148..159, 166, 178, 181..185, 90, 91, 199, 201]. Переваги векторного керування виявляються, насамперед, у динамічних режимах. Зважаючи на те, що математичне моделювання динамічних режимів не здійснюється в даній роботі, а також те, що метою є створення узагальненої математичної моделі, для аналізу впливу на режими агрегату АД – ВП виконано порівняння семи різних скалярних функцій керування напругою та

частотою напруги обвитки статора АД [219, 43, 44, 45, 90, 178]:

- 1) функції керування М. Костенка [91];
- 2) шляхом підтримання сталим потокозчеплення від магнітного потоку повітряного проміжку [43, 44];
- 3) шляхом оптимізації потокозчеплення від магнітного потоку повітряного проміжку з метою підтримання максимального значення ККД АД [67];
- 4) шляхом оптимізації ковзання за умови мінімізації втрат активної потужності в АД [67];
- 5) шляхом оптимізації ковзання за умови мінімізації споживаної активної потужності АД [67];
- 6) шляхом оптимізації ковзання за умови мінімізації стуму статора АД [67];
- 7) запропонованої модифікованої функції [43, 44].

Слід зазначити, що згідно [67] функції (4), (5) і (6) застосовуються лише для оптимізації режиму частотного електроприводу за сталої частоти струму статора. Однак, вбачається доцільним дослідити поведінку агрегату під час застосування зазначених функцій за умови керованої частоти.

Розглянемо детальніше перелічені функції керування електромагнітними режимами асинхронного двигуна в усталених режимах.

- 1) Керування напругою та частотою напруги обвитки статора АД згідно з функцією керування М. Костенка [91] має вигляд:

$$U_s / U_{sn} = \omega_s \sqrt{M_{em} / M_{emn}} / \omega_{sn}, \quad (2.229)$$

де U_s – дієве значення напруги статора АД, ω_s – частота напруги статора АД, M_{em} – електромагнітний момент АД.

Для використаної в цій роботі математичної моделі АД i -го агрегата, сформованої у в.о., рівняння (2.229) набере вигляду:

$$\sqrt{\frac{2}{3}} \sqrt{U_{sd_i}^2 + U_{sq_i}^2} - \omega_{s*} \sigma_i \sqrt{\frac{(1 - s_{АДН_i}) \left(\Psi_{\delta d_i} I_{sq_i} - \Psi_{\delta q_i} I_{sd_i} - \frac{\Delta P_{r_i}}{\omega_{r*} \sigma_i} \right)}{\eta_{АДН_i} \cos \varphi_{АДН_i}}} = 0, \quad (2.230)$$

де U_{sdi} , U_{sqi} – лінійна напруга статора АД; ω_s , ω_b – відповідно частота напруги статора та базова частота АД; ΔP_{ri} – електричні втрати активної потужності в обвитці ротора АД; I_{sdi} , I_{sqi} – струм статора АД в d-q координатах; $\Psi_{\delta di}$, $\Psi_{\delta qi}$ – потокозчеплення від магнітного потоку повітряного проміжку АД в d-q координатах.

2) Керування напругою та частотою напруги обвитки статора АД шляхом підтримання сталим потокозчеплення від магнітного потоку повітряного проміжку [43, 44]. Для використаної в цій роботі математичної моделі АД, сформованої у в.о., ця функція керування має вигляд:

$$\Psi_{\delta di}^2 + \Psi_{\delta qi}^2 - \Psi_g^2 = 0, \quad (2.231)$$

що передбачає підтримання в усіх режимах АД потокозчеплення зі сталим значенням Ψ_g .

3) Керування напругою та частотою напруги обвитки статора АД шляхом оптимізації потокозчеплення від магнітного потоку повітряного проміжку з метою підтримання максимального значення ККД АД [67]. Для використаної в цій роботі математичної моделі АД, сформованої у в.о. ця функція керування має вигляд:

$$\Psi_{\delta di}^2 + \Psi_{\delta qi}^2 - \frac{k_{var} \left((I_{1rds_i} + I_{2rd_i})^2 + (I_{1rq_i} + I_{2rq_i})^2 \right)}{k_{a_i} + k_{st_i} \omega_{pi}^{\beta_i}} = 0, \quad (2.232)$$

де для асинхронного двигуна i -го агрегата:

k_a , k_{st} , k_{var} – відповідно коефіцієнти втрат потужності від намагнічувального струму, в сталі магнітопроводу та змінних втрат АД [67]; β – показник степені, значення якого залежить від марки електротехнічної сталі, з якої виготовлено осердя АД, і може бути в межах (1,2..1,5) [67].

4) Керування напругою та частотою напруги обвитки статора АД шляхом оптимізації ковзання та мінімізації втрат активної потужності в АД:

$$(\omega_s - \omega_r) / \omega_s = R_r \sqrt{(X_a^2 / R_a + R_s) / (R_s + R_r)} / X_a. \quad (2.233)$$

Для використаної в цій роботі математичної моделі АД, сформованої у в.о. ця функція керування має вигляд:

$$1 - \omega_{p^*b_i} \omega_{ВПb_i} / (\omega_{s^*b_i} \omega_{АДb_i}) - R_r \sqrt{(X_{a_i}^2 / R_{a_i} + r_{s_i}) / (r_{s_i} + R_r)} / X_{a_i} = 0, \quad (2.234)$$

де для асинхронного двигуна i -го агрегата:

$$X_{a_i} = \omega_{s^*b_i} / R_{mH_i} (\psi_{\delta d_i}, \psi_{\delta q_i}),$$

$$R_r = \frac{\left(r_{1r_i} r_{2r_i} - \left(1 - \frac{k_{\omega_i} \omega_{r^*b_i}}{\omega_{s^*b_i}} \right)^2 x_{1r_i} x_{2r_i} \right) (r_{1r_i} + r_{2r_i}) + \left(1 - \frac{k_{\omega_i} \omega_{r^*b_i}}{\omega_{s^*b_i}} \right)^2 (r_{1r_i} x_{2r_i} + x_{1r_i} r_{2r_i}) (x_{1r_i} + x_{2r_i})}{(r_{1r_i} + r_{2r_i})^2 + \left(1 - \frac{k_{\omega_i} \omega_{r^*b_i}}{\omega_{s^*b_i}} \right)^2 (x_{1r_i} + x_{2r_i})^2}.$$

5) Керування напругою та частотою напруги обвитки статора АД шляхом оптимізації ковзання з мінімізацією споживаної АД активної потужності:

$$(\omega_s - \omega_r) / \omega_s = R_r \sqrt{1 + X_a^2 / (R_s R_a)} / X_a. \quad (2.235)$$

Для використаної в цій роботі математичної моделі АД, сформованої в.о. ця функція керування має вигляд:

$$\omega_{p^*b_i} \omega_{ВПb_i} / (\omega_{s^*b_i} \omega_{АДb_i}) - R_r \sqrt{1 + X_{a_i}^2 / (r_{s_i} R_{a_i})} / X_{a_i} = 0. \quad (2.236)$$

6) Керування напругою та частотою напруги обвитки статора АД шляхом оптимізації ковзання за умови мінімізації стуму статора АД:

$$(\omega_s - \omega_r) / \omega_s = R_r / X_a. \quad (2.237)$$

Для використаної в цій роботі математичної моделі АД, сформованої у в.о. ця функція керування має вигляд:

$$1 - \omega_{p^*b_i} \omega_{ВПb_i} / (\omega_{s^*b_i} \omega_{АДb_i}) - R_r / X_{a_i} = 0. \quad (2.238)$$

7) Керування напругою та частотою напруги обвитки статора АД за функцією, отриманою внаслідок математичних експериментів з (2.229):

$$U_{sm} = \omega_s \sqrt{(\Psi_{\delta d} i_{sq} - \Psi_{\delta q} i_{sd})}. \quad (2.239)$$

Для використаної в цій роботі математичної моделі АД, сформованої у в.о. ця функція керування має вигляд:

$$\sqrt{\frac{2}{3}} \sqrt{U_{sd_i}^2 + U_{sq_i}^2} - \omega_{s*\delta_i} \sqrt{(\Psi_{\delta d_i} I_{sq_i} - \Psi_{\delta q_i} I_{sd_i})} = 0. \quad (2.240)$$

У матрично-векторній формі функція керування напругою та частотою напруги обвитки статора АД i -го агрегату набуває вигляду:

$$\mathbf{f}_{\text{АДкер}_i}(\mathbf{X}_{\text{АДкер}_i}), \quad (2.241)$$

де $\mathbf{X}_{\text{АДкер}_i} = \mathbf{X}_{\text{АД}_i} = (\omega_{r*\delta_i}, \omega_{s*\delta_i}, I_{sd_i}, I_{sq_i}, I_{1rd_i}, I_{1rq_i}, I_{2rd_i}, I_{2rq_i}, U_{sd_i}, U_{sq_i}, \Psi_{\delta d_i}, \Psi_{\delta q_i})_t$

визначається згідно виразу (2.112).

Аргументом функції керування є вектор-стовпець усіх координат режиму АД, тому в її Якобіані присутні нульові стовпці (функція керування не застосовується окремо від математичної моделі АД). У залежності від обраної (1..7) функції матриця Якобі $\mathbf{W}_{\text{АДкер}_i}$ рівняння (2.241) має вигляд:

$$1) \mathbf{W}_{\text{АДкер}_i} = \begin{array}{c} \left| \begin{array}{c} -\omega_{s*\delta_i} (1 - s_{\text{АДН}_i}) \Delta P_{r_i} \\ \hline 2\omega_{r*\delta_i}^2 \eta_{\text{АДН}_i} \cos \varphi_{\text{АДН}_i} \sqrt{\frac{(1 - s_{\text{АДН}_i}) \left(\Psi_{\delta d_i} I_{sq_i} - \Psi_{\delta q_i} I_{sd_i} - \frac{\Delta P_{r_i}}{\omega_{r*\delta_i}} \right)}{\eta_{\text{АДН}_i} \cos \varphi_{\text{АДН}_i}}} \end{array} \right| \\ \left| \begin{array}{c} -\sqrt{\frac{(1 - s_{\text{АДН}_i}) \left(\Psi_{\delta d_i} I_{sq_i} - \Psi_{\delta q_i} I_{sd_i} - \frac{\Delta P_{r_i}}{\omega_{r*\delta_i}} \right)}{\eta_{\text{АДН}_i} \cos \varphi_{\text{АДН}_i}}} \end{array} \right| \\ \left| \begin{array}{c} \omega_{s*\delta_i} (1 - s_{\text{АДН}_i}) I_{sq_i} \\ \hline 2\eta_{\text{АДН}_i} \cos \varphi_{\text{АДН}_i} \sqrt{\frac{(1 - s_{\text{АДН}_i}) \left(\Psi_{\delta d_i} I_{sq_i} - \Psi_{\delta q_i} I_{sd_i} - \frac{\Delta P_{r_i}}{\omega_{r*\delta_i}} \right)}{\eta_{\text{АДН}_i} \cos \varphi_{\text{АДН}_i}}} \end{array} \right| \end{array}$$

$$\begin{aligned}
 7) \mathbf{W}_{\text{АДкері}} = & \left\| \begin{array}{c} 0 \\ -\sqrt{(\Psi_{\delta d_i} I_{sq_i} - \Psi_{\delta q_i} I_{sd_i})} \\ \frac{\omega_{s^*b_i} \Psi_{\delta q_i}}{2\sqrt{(\Psi_{\delta d_i} I_{sq_i} - \Psi_{\delta q_i} I_{sd_i})}} \end{array} \right\| \\
 & \left\| \begin{array}{c} \frac{-\omega_{s^*b_i} \Psi_{\delta d_i}}{2\sqrt{(\Psi_{\delta d_i} I_{sq_i} - \Psi_{\delta q_i} I_{sd_i})}} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{U_{sd_i}}{\sqrt{U_{sd_i}^2 + U_{sq_i}^2}} \end{array} \right\| \\
 & \left\| \begin{array}{c} \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{U_{sq_i}}{\sqrt{U_{sd_i}^2 + U_{sq_i}^2}} \\ \frac{-\omega_{s^*b_i} I_{sq_i}}{2\sqrt{(\Psi_{\delta d_i} I_{sq_i} - \Psi_{\delta q_i} I_{sd_i})}} \\ \frac{\omega_{s^*b_i} I_{sd_i}}{2\sqrt{(\Psi_{\delta d_i} I_{sq_i} - \Psi_{\delta q_i} I_{sd_i})}} \end{array} \right\|. \quad (2.242)
 \end{aligned}$$

Для аналізу впливу на режими синхронного ВПТА виконано порівняння трьох різних функцій керування напругою та частотою напруги обвитки статора СД [2, 32, 50, 100, 197]:

1) шляхом підтримання незмінного заданого значення потокозчеплення від магнітного потоку повітряного проміжку за умови ортогональності зображальних векторів цього потокозчеплення та струму якоря [32];

2) шляхом мінімізації втрат електроенергії за умови підтримання незмінного заданого значення потокозчеплення від магнітного потоку повітряного проміжку [32];

3) шляхом мінімізації втрат електроенергії з довільним значенням потокозчеплення від магнітного потоку повітряного проміжку [32].

Розглянемо детальніше перелічені функції керування електромагнітними режимами синхронного двигуна в ustalених режимах.

1) Керування електромагнітними режимами СД шляхом підтримання сталого заданого значення потокозчеплення від магнітного потоку повітряного проміжку за умови ортогональності зображальних векторів цього потокозчеплення та струму якоря. У цьому режимі вся споживана двигуном реактивна потужність – це реактивна потужність розсіяння, а електромагнітний момент набуває максимально можливих значень за відповідної частоти обертання ротора. Такий спосіб керування застосовується для рушіїв з різко змінним навантаженням, але підвищені втрати електроенергії зумовлюють підвищене нагрівання обвитки збудження [32].

Для використаної в цій роботі математичної моделі СД, сформованої у в.о. ця функція керування має вигляд:

$$\Psi_{\delta d_i}^2 + \Psi_{\delta q_i}^2 - \Psi_{g_i} = 0; \quad (2.243)$$

$$\Psi_{\delta d_i} I_{sd_i} + \Psi_{\delta q_i} I_{sq_i} = 0, \quad (2.244)$$

де Ψ_{g_i} – задане значення потокозчеплення.

2) Керування електромагнітними режимами СД шляхом мінімізації втрат електроенергії за умови підтримання сталого заданого значення потокозчеплення від магнітного потоку повітряного проміжку забезпечує зниження втрат активної потужності в порівнянні з попереднім способом приблизно на 10%, що є важливим для недопущення перегрівання обвитки збудження [32], але накладає підвищені вимоги до швидкодії системи керування. Для використаної в цій роботі математичної моделі СД, сформованої у в.о. ця функція керування має вигляд:

$$\Psi_{\delta d_i}^2 + \Psi_{\delta q_i}^2 - \Psi_{g_i} = 0; \quad (2.245)$$

$$I_{f_i}^2 - 2c_i I_{f_i} + d_i = 0, \quad (2.246)$$

де для СД i -го агрегата:

$$c_i = \frac{\Psi_{g_i}}{2\sqrt{\Psi_{\delta d_i}^2 + \Psi_{\delta q_i}^2}} \left[\left(1 + \frac{r_{s_i}}{r_{s_i} + r_{fd_i}} \right) \frac{\Psi_{\delta d_i}}{X_{md_i}} + \frac{\Psi_{\delta d_i} + \Psi_{\delta q_i}}{X_{mq_i}} - \frac{r_{fd_i}}{r_{s_i} + r_{fd_i}} \frac{\Psi_{\delta q_i}}{X_{md_i}} \right];$$

$$d_i = \frac{r_{s_i} \Psi_{g_i} \Psi_{\delta d_i}}{(r_{s_i} + r_{fd_i}) \sqrt{\Psi_{\delta d_i}^2 + \Psi_{\delta q_i}^2}} \left(\frac{\Psi_{\delta d_i}}{X_{md_i}} + \frac{\Psi_{\delta q_i}^2}{X_{mq_i} \Psi_{\delta d_i}} \right) \left(\frac{1}{X_{md_i}} - \frac{1}{X_{mq_i}} \right);$$

r_{s_i} – еквівалентний резистанс якоря;

r_{fd_i} – еквівалентний резистанс поздовжньої обвитки збудження;

X_{md_i} – взаємний поздовжній індуктанс без урахування насичення;

X_{mq_i} – взаємний поперечний індуктанс без урахування насичення.

3) Керування електромагнітними режимами СД шляхом мінімізації втрат

електроенергії з довільним значенням потокозчеплення від магнітного потоку повітряного проміжку забезпечує зниження втрат активної потужності в порівнянні з попереднім способом приблизно на 25%, що є важливим для недопущення перегрівання обвитки збудження [32] і накладає особливо високі вимоги до швидкодії системи керування. Для використаної в цій роботі математичної моделі СД, сформованої у в.о., ця функція має вигляд:

$$U_{sd_i} - \sqrt{U_{sd_i}^2 + U_{sq_i}^2} \cos \Psi_{0Us_i} = 0; \quad (2.247)$$

$$I_{f_i}^2 - 2c_i I_{f_i} + d_i = 0, \quad (2.248)$$

де Ψ_{0Us_i} – початкова фаза зображального вектора напруги U_{smi} обвитки статора може приймати довільне значення.

У матрично-векторній формі функція керування напругою та частотою напруги обвитки статора СД i -го агрегату набуває вигляду:

$$\mathbf{f}_{\text{СДкер}_i}(\mathbf{X}_{\text{СДкер}_i}) = 0, \quad (2.249)$$

де $\mathbf{X}_{\text{СДкер}_i} = \mathbf{X}_{\text{СД}_i} = (\omega_{r^* \delta_i}, \omega_{s^* \delta_i}, I_{f_i}, I_{sd_i}, I_{sq_i}, \Psi_{\delta d_i}, \Psi_{\delta q_i}, U_{sd_i}, U_{sq_i}, \phi_{s_i})_t$ визначається згідно з виразом (2.126).

Аргументом функції керування є вектор-стовпець усіх координат режиму двигуна, тому в її матриці Якобі присутні стовпці з усіма нульовими елементами. Це допустимо в даному випадку, оскільки функція керування не застосовується виокремлено від математичної моделі двигуна. У залежності від обраної (1..3) функції керування матриця Якобі $\mathbf{W}_{\text{СДкер}_i}$ рівняння (2.241) має такий вигляд:

$$1) \mathbf{W}_{\text{СДкер}_i} = \left\| \begin{array}{c|c|c|c|c|c|c|c|c|c|c} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2\Psi_{\delta d_i} & 2\Psi_{\delta q_i} & 0 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & \Psi_{\delta d_i} & \Psi_{\delta q_i} & I_{sd_i} & I_{sq_i} & 0 & 0 & 0 \end{array} \right\|;$$

$$2) \mathbf{W}_{\text{СДкер}_i} = \left\| \begin{array}{c|c|c|c|c|c|c|c|c|c|c} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2\Psi_{\delta d_i} & 2\Psi_{\delta q_i} & 0 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 2I_{f_i} - 2c_i & 0 & 0 & -2I_{f_i} \frac{dc_i}{\Psi_{\delta d_i}} + \frac{dd_i}{\Psi_{\delta d_i}} & -2I_{f_i} \frac{dc_i}{\Psi_{\delta q_i}} + \frac{dd_i}{\Psi_{\delta q_i}} & 0 & 0 & 0 \end{array} \right\|;$$

$$3) \mathbf{W}_{\text{СДкер}} = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{U_{\text{sd}_i}}{\sqrt{U_{\text{sd}_i}^2 + U_{\text{sq}_i}^2}} & \frac{U_{\text{sq}_i}}{\sqrt{U_{\text{sd}_i}^2 + U_{\text{sq}_i}^2}} & & & 0 \\ 0 & 0 & 2I_{f_i} - 2c_i & 0 & 0 & -2I_{f_i} \frac{\partial c_i}{\partial \Psi_{\delta d_i}} + \frac{\partial d_i}{\partial \Psi_{\delta d_i}} & -2I_{f_i} \frac{\partial c_i}{\partial \Psi_{\delta q_i}} + \frac{\partial d_i}{\partial \Psi_{\delta q_i}} & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix},$$

$$\text{де } \frac{\partial c_i}{\partial \Psi_{\delta d_i}} = \frac{-\Psi_{\delta d_i} \Psi_{g_i}}{2(\Psi_{\delta d_i}^2 + \Psi_{\delta q_i}^2) \sqrt{\Psi_{\delta d_i}^2 + \Psi_{\delta q_i}^2}} \left[\left(1 + \frac{r_{s_i}}{r_{s_i} + r_{fd_i}} \right) \frac{\Psi_{\delta d_i}}{x_{md_i}} + \frac{\Psi_{\delta d_i} + \Psi_{\delta q_i}}{x_{mq_i}} - \frac{r_{fd_i}}{r_{s_i} + r_{fd_i}} \frac{\Psi_{\delta q_i}}{x_{md_i}} \right] + \frac{\Psi_{g_i}}{2\sqrt{\Psi_{\delta d_i}^2 + \Psi_{\delta q_i}^2}} \left[\left(1 + \frac{r_{s_i}}{r_{s_i} + r_{fd_i}} \right) \frac{1}{x_{md_i}} + \frac{1}{x_{mq_i}} \right],$$

$$\frac{\partial c_i}{\partial \Psi_{\delta q_i}} = \frac{-\Psi_{\delta q_i} \Psi_{g_i}}{2(\Psi_{\delta d_i}^2 + \Psi_{\delta q_i}^2) \sqrt{\Psi_{\delta d_i}^2 + \Psi_{\delta q_i}^2}} \left[\left(1 + \frac{r_{s_i}}{r_{s_i} + r_{fd_i}} \right) \frac{\Psi_{\delta d_i}}{x_{md_i}} + \frac{\Psi_{\delta d_i} + \Psi_{\delta q_i}}{x_{mq_i}} - \frac{r_{fd_i}}{r_{s_i} + r_{fd_i}} \frac{\Psi_{\delta q_i}}{x_{md_i}} \right] + \frac{\Psi_{g_i}}{2\sqrt{\Psi_{\delta d_i}^2 + \Psi_{\delta q_i}^2}} \left[\frac{1}{x_{mq_i}} - \frac{r_{fd_i}}{(r_{s_i} + r_{fd_i}) x_{md_i}} \right],$$

$$\frac{\partial d_i}{\partial \Psi_{\delta d_i}} = \left(\frac{1}{x_{md_i}} - \frac{1}{x_{mq_i}} \right) \left[\frac{r_{s_i} \Psi_{g_i}}{(r_{s_i} + r_{fd_i})} \left(\sqrt{\Psi_{\delta d_i}^2 + \Psi_{\delta q_i}^2} - \frac{\Psi_{\delta d_i}^3}{\sqrt{\Psi_{\delta d_i}^2 + \Psi_{\delta q_i}^2}} \right) \times \left(\frac{\Psi_{\delta d_i}}{x_{md_i}} + \frac{\Psi_{\delta q_i}^2}{x_{mq_i} \Psi_{\delta d_i}} \right) + \frac{r_{s_i} \Psi_{g_i} \Psi_{\delta d_i}}{(r_{s_i} + r_{fd_i}) \sqrt{\Psi_{\delta d_i}^2 + \Psi_{\delta q_i}^2}} \left(\frac{1}{x_{md_i}} - \frac{\Psi_{\delta q_i}^2}{x_{mq_i} \Psi_{\delta d_i}^2} \right) \right],$$

$$\frac{\partial d_i}{\partial \Psi_{\delta q_i}} = \left(\frac{1}{x_{md_i}} - \frac{1}{x_{mq_i}} \right) \left[\frac{r_{s_i} \Psi_{g_i}}{(r_{s_i} + r_{fd_i})} \left(\Psi_{\delta d_i} \sqrt{\Psi_{\delta d_i}^2 + \Psi_{\delta q_i}^2} - \Psi_{\delta d_i} \frac{\Psi_{\delta q_i}^2}{\sqrt{\Psi_{\delta d_i}^2 + \Psi_{\delta q_i}^2}} \right) \times \left(\frac{\Psi_{\delta d_i}}{x_{md_i}} + \frac{\Psi_{\delta q_i}^2}{x_{mq_i} \Psi_{\delta d_i}} \right) + \frac{2r_{s_i} \Psi_{g_i} \Psi_{\delta d_i} \Psi_{\delta q_i}}{(r_{s_i} + r_{fd_i}) \sqrt{\Psi_{\delta d_i}^2 + \Psi_{\delta q_i}^2} x_{mq_i} \Psi_{\delta d_i}} \right]. \quad (2.250)$$

Наприкінці слід зауважити, що частотне керування витратою агрегатів не завжди є ефективним. Наприклад, це стосується турбінних помпових агрегатів, які застосовують у глибоких свердловинах, і в конструкції яких одразу передбачений байпас [116], а також – високовольтних (понад 10 кВ)

електроприводів [133] для яких вартість перетворювачів частоти й напруги може бути надто високою.

2.3.4 Зміна напруги обвитки статора двигунів помпових агрегатів

Керування витратою агрегатів у невеликому діапазоні можна здійснювати зміною напруги живлення статора шляхом застосування перемикань схеми сполучення обвитки та за допомогою статичних перетворювачів напруги. Цей спосіб керування реалізовується в 2.2.7 "Перетворювач частоти й напруги".

2.3.5 Керування асинхронними двигунами з фазним ротором

Застосування ПЧН у поєднанні з дроселями для асинхронних машин з фазним ротором дозволяє здійснювати зміну швидкості обертання до 20% відносно номінального значення за сталої частоти напруги обвитки статора, а також керувати споживаною реактивною потужністю з відносно незначними матеріальними витратами на таке керування [30, 126].

Реалізація такого керування в розроблюваній математичній моделі полягає в адаптації рівнянь (2.101)..(2.109) математичної моделі АД до такого керування й уведення в загальну модель додаткового ПЧН.

2.3.6 Активне керування помпами агрегатів

Активне керування помпами агрегатів полягає в перерозподілі й зміні напрямів робочої рідини за допомогою гідротурбін з рекуперацією енергії [142, 143]. Математичне моделювання гідротурбін зводиться до математичного моделювання додаткових помпових агрегатів pomp у реверсних (генераторних) режимах.

2.3.7 Зміна умов функціонування помпи

Зміна умов функціонування помпи докладно розглянута й врахована в 2.2.1 "Відцентрова помпа".

2.3.8 Застосування варіаторів

Застосування варіаторів у механічному зв'язку помпи з двигуном (фрикційних, гідравлічних і механічних) ґрунтується на зміні передатного числа між вхідним і вихідним валом варіатора [108, 171]. У цьому разі потужність, що передається від ведучого вала до веденого зменшується на значення потужності втрат тертя. Варіатори з планетарною передачею дозволяють забезпечити найширший діапазон регулювання швидкості вала помпи. Двигун, водночас, працює в некерованому режимі. Економія енергії відбувається лише в помпі. Реалізація варіатора в розроблюваній ММ полягає в урахуванні додаткових втрат потужності в рівняннях (2.128)..(2.133) і домножуванні кутової частоти обертання валу відповідних pomp на додаткову невідому – передатне число варіатора.

2.3.9 Комп'ютерне симулювання усталених режимів

Комп'ютерне симулювання усталених режимів одиничного агрегату асинхронний двигун – відцентрова помпа здійснено на ЦМ, написаний алгоритмічною мовою Turbo Pascal. У цьому середовищі реалізовано метод простої ітерації Гауса розв'язання системи лінійних і метод Ньютонів розв'язання системи нелінійних скінчених рівнянь стану математичної моделі. Коректність симулювання було підтверджено використанням з цією ж метою засобів Mathcad з стандартними підпрограмами розв'язання систем лінійних і нелінійних рівнянь. Однаковість результатів тестування моделі різними програмними засобами обґрунтовано дозволила здійснювати всі подальші дослідження з використанням ЦМ у середовищі Mathcad.

2.4 Висновки до розділу 2

Обґрунтовано необхідність розроблення за модульним принципом ММ усталених режимів узагальненого ЕТК та з можливістю врахування математичної моделі ГМ. Загальна методика створення такої моделі полягає в модульному її формуванні на підставі схеми конкретного об'єкта з окремих моделей його складових елементів.

Наведено, вдосконалено й адаптовано математичні моделі окремих елементів з метою подальшої їхньої композиції в єдину математичну модель.

Для групи електроприводних ВПТА з довільною конфігурацією гідравлічних зв'язків розроблено метод розрахунку розподілу робочої рідини між гідравлічно сполученими ВПТА, що дозволяє отримувати функції керування агрегатами.

Побудовано загальну ММ гідравлічних зв'язків багатоагрегатної системи ВПТА й гідромережі та систематизовано принципи її формування.

Наведено й адаптовано для застосування в розроблюваній математичній моделі функції частотного керування електродвигунами помпових агрегатів.

Для всіх елементів загальної математичної побудовано матриці Якобі чи наведено алгоритм їхньої побудови.

Обґрунтовано неможливість представлення у загальному випадку ВП як момента опору з "вентиляторною" механічною характеристикою під час моделювання роботи електроприводу.

Таким чином, з метою досягнення поставленого в роботі завдання, далі необхідно:

- сформувати математичну модель усталених режимів одиничного електроприводного ВПТА;
- на її підставі сформувати математичну модель усталених режимів групи електроприводних ВПТА зі сполученням гідротрактів ВП;
- сформувати математичну модель усталених режимів електропостачальної системи;
- сформувати математичну модель усталених режимів узагальненого ЕТК шляхом композиції зазначених математичних моделей;
- розробити алгоритм пошуку нульових наближень координат режиму для розв'язання НССР стану математичної моделі.

РОЗДІЛ 3 МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ УСТАЛЕНИХ РЕЖИМІВ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНОГО КОМПЛЕКСУ "ЕЛЕКТРОПОСТАЧАЛЬНА СИСТЕМА – ПОМПОВА СТАНЦІЯ"

На підставі розроблених у другому розділі цієї роботи математичних моделей окремих елементів можна сформувавши узагальнену математичну модель ЕТК довільної конфігурації з послідовно-паралельним сполученням гідротрактів pomp. У цьому розділі поетапно наведено формування такої моделі.

3.1 Математична модель блока електроприводного відцентрового помпового турбоагрегату

ММ усталених режимів блока електроприводного ВПТА з АСК і з урахуванням впливу ГМ складається з таких елементів [45]:

- 1) ММ зв'язку помпи i -го агрегату з ГМ;
- 2) ММ гідравлічної мережі;
- 3) ММ відцентрової помпи з урахуванням дроселя та байпаса;
- 4) ММ асинхронного (синхронного) двигуна;
- 5) ММ механічного зв'язку між двигуном та відцентровою помпою;
- 6) ММ перетворювача частоти та напруги;
- 7) ММ розділового трансформатора;
- 8) рівнянь частотного керування двигуном агрегату;
- 9) ММ пристроїв поперечної компенсації реактивної потужності [238];
- 10) рівнянь керування дроселем і байпасом.

ММ гідравлічних зв'язків багатоагрегатної системи ВП і ГМ та керування розподілом витрат і напорів робочої рідини наведена в п. 2.3.2 . З метою подальшої імплементації ММ одиничного агрегату в узагальнену модель йому присвоєно індекс i . Отже, для i -го одиничного агрегату, з

урахуванням того, $p=1$, $m_j=1$, $n = \sum_{j=1}^p m_j = \sum_{j=1}^1 1 = p = m_j = 1$, рівняння (2.220) та

(2.221) розподілу витрат і тисків, а також рівняння (2.222) та (2.223) балансу витрат і тисків відсутні, вона складається з рівняння (2.218) зв'язку за витратою та рівняння (2.219) зв'язку за напором між ГМ і ВПТА:

$$k_{H.ВП_i} H_{д_i} - k_{H.ГМ} H_{д} = 0; \quad (3.1)$$

$$k_{Q.ВП_i} Q_{д_i} - k_{Q.ГМ} Q_{д} = 0. \quad (3.2)$$

У матрично-векторній формі ММ гідравлічних зв'язків багатоагрегатної системи ВП і ГМ та керування розподілом витрат і напорів робочої рідини для одиничного агрегату набуває вигляду:

$$\mathbf{f}_{зв_i}(\mathbf{X}_{БВПТА_i}) = \mathbf{0}, \quad (3.3)$$

де $\mathbf{X}_{БВПТА_i} = (Q_{д_i}, H_{д_i}, \mathbf{X}_{АГР_i})$,

де для i -го БАВПТА: $\mathbf{X}_{АГР_i} = (Q_{д_i}, H_{д_i}, R_{др_i}, R_{бп_i}, Q_{\Sigma d_i}, Q_{\Sigma q_i}, Q_{впд_i}, Q_{впқ_i}, H_{0d_i}, H_{0q_i}, H_{впд_i}, H_{впқ_i}, \omega_{r*б_i}, \omega_{s*б_i}, I_{sd_i}, I_{sq_i}, I_{1rds_i}, I_{1rq_i}, I_{2rd_i}, I_{2rq_i}, U_{sd_i}, U_{sq_i}, \Psi_{\delta d_i}, \Psi_{\delta q_i}, I_{1пчд_i}, I_{1пчқ_i}, I_{2пчд_i}, I_{2пчқ_i}, \Psi_{1d\tau_i}, \Psi_{1q\tau_i}, U_{1пчд_i}, U_{1пчқ_i}, U_{вд_i}, U_{вқ_i}, I_{нд_i}, I_{нқ_i}, I_{вд_i}, I_{вқ_i})_t$;

для i -го БСВПТА: $\mathbf{X}_{АГР_i} = (Q_{д_i}, H_{д_i}, R_{др_i}, R_{бп_i}, Q_{\Sigma d_i}, Q_{\Sigma q_i}, Q_{впд_i}, Q_{впқ_i}, H_{0d_i}, H_{0q_i}, H_{впд_i}, H_{впқ_i}, \omega_{r*б_i}, \omega_{s*б_i}, I_{sd_i}, I_{sq_i}, I_{f_i}, \phi_{s_i}, U_{sd_i}, U_{sq_i}, \Psi_{\delta d_i}, \Psi_{\delta q_i}, I_{1пчд_i}, I_{1пчқ_i}, I_{2пчд_i}, I_{2пчқ_i}, \Psi_{1d\tau_i}, \Psi_{1q\tau_i}, U_{1пчд_i}, U_{1пчқ_i}, U_{вд_i}, U_{вқ_i}, I_{нд_i}, I_{нқ_i}, I_{вд_i}, I_{вқ_i})_t$.

Матриця Якобі системи рівнянь (3.3) має вигляд:

$$\mathbf{W}_{зв.БВПТА_i} = \left\| \begin{array}{cccccccccccccccc|c|c} 0 & -k_{H.ГМ} & 0 & k_{H.ВП_i} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ -k_{Q.ГМ} & 0 & k_{Q.ВП_i} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{array} \right\|, \quad (3.4)$$

де, в цьому разі, $j=1$.

3.1.1 Блок асинхронного відцентрового помпового турбоагрегату

Структурна схема одиничного БАВПТА зображена на рис. 3.1.

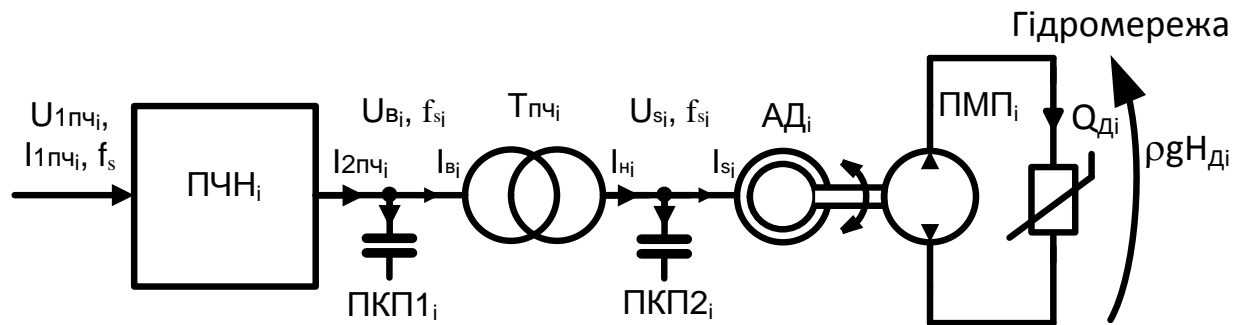


Рис. 3.1 Структурна схема БАВПТА

Відповідно до цієї структурної схеми формується ММ усталених режимів одиничного БАВПТА. Вона складається з рівнянь ММ гідравлічних зв'язків i -го одиничного ВПТА з ГМ (3.1) і (3.2), спрощеної ММ гідромережі (2.93), ММ помпи (2.66)..(2.74), ММ асинхронного двигуна (2.101)..(2.109), ММ механічного зв'язку між двигуном та ВП (2.130), ММ перетворювача частоти та напруги (2.153), (2.154), ММ розділового трансформатора (2.141)..(2.146). Крім того, математичну модель необхідно доповнити рівняннями ММ двох ПКП (2.162), (2.163), одним з рівнянь (2.230), (2.231), (2.232), (2.234), (2.236), (2.238) або (2.240) частотного керування АД агрегату, а також – рівняннями керування дроселем і байпасом.

Формуючи систему рівнянь на підставі схеми, що на рис. 3.1, слід врахувати, що у відповідних математичних моделях:

$$\begin{aligned} \omega_{s^*б_i} &= \omega_{т^*б_i}, \quad U_{2пчд_i} = U_{вд_i}, \quad U_{2пчq_i} = U_{вq_i}, \quad U_{нд_i} = U_{сд_i}, \quad U_{нq_i} = U_{сq_i}, \\ I_{2пчд_i} &= I_{11д_i}, \quad I_{2пчq_i} = I_{11q_i}, \quad I_{12д_i} = I_{вд_i}, \quad I_{12q_i} = I_{вq_i}, \\ I_{21д_i} &= I_{нд_i}, \quad I_{21q_i} = I_{нq_i}, \quad I_{22д_i} = I_{сд_i}, \quad I_{22q_i} = I_{сq_i}. \end{aligned}$$

Таким чином, отримуємо систему з 37 рівнянь з 40 невідомими. З урахуванням того, що 2 ортогональні складові $U_{1пчд_i}, U_{1пчq_i}$ вхідної напруги ПЧН відомі, оскільки вона задається джерелом живлення, розв'язанню підлягатиме система 37 рівнянь з 38 невідомими. Для однозначного

розв'язання цієї системи необхідно задати значення будь-якої невідомої. В результаті ми можемо отримати функційні залежності координат усталеного режиму чи необхідних за певними критеріями значень параметрів елементів від заданої невідомої.

У матрично-векторній формі ММ усталених режимів одиничного БАВПТА формується з рівнянь (3.3), (2.94), (2.75), (2.112), (2.131), (2.155), (2.148), двох рівнянь (2.164), одного з варіантів рівняння частотного керування АД (2.241), рівнянь керування дроселем і байпасом та набуває вигляду:

$$\mathbf{f}_{\text{БАВПТА}_i}(\mathbf{X}_{\text{БАВПТА}_i}) = \mathbf{0}, \quad (3.5)$$

$$\begin{aligned} \text{де } \mathbf{f}_{\text{БАВПТА}_i}(\mathbf{X}_{\text{БАВПТА}_i}) = & \left(\mathbf{f}_{\text{зв}_i}(\mathbf{X}_{\text{БАВПТА}_i}), \mathbf{f}_{\text{тм}}(\mathbf{X}_{\text{БАВПТА}_i}), \mathbf{f}_{\text{вп}_i}(\mathbf{X}_{\text{БАВПТА}_i}), \right. \\ & \mathbf{f}_{\text{АД}_i}(\mathbf{X}_{\text{БАВПТА}_i}), \mathbf{f}_{\text{АДзв}_i}(\mathbf{X}_{\text{БАВПТА}_i}), \mathbf{f}_{\text{ПЧН}_i}(\mathbf{X}_{\text{БАВПТА}_i}), \mathbf{f}_{\text{т}_i}(\mathbf{X}_{\text{БАВПТА}_i}), \mathbf{f}_{\text{АДкер}_i}(\mathbf{X}_{\text{БАВПТА}_i}), \\ & \left. \mathbf{f}_{\text{ПКП}_1}(\mathbf{X}_{\text{БАВПТА}_i}), \mathbf{f}_{\text{ПКП}_2}(\mathbf{X}_{\text{БАВПТА}_i}), \mathbf{f}_{\text{др}_i}(\mathbf{X}_{\text{БАВПТА}_i}), \mathbf{f}_{\text{бп}_i}(\mathbf{X}_{\text{БАВПТА}_i}) \right)_t. \end{aligned}$$

Матриця Якобі $\mathbf{W}_{\text{БСВПТА}_i}$ системи рівнянь (3.5) формується з матриць (3.4), (2.95), (2.76), (2.113), (2.132), (2.156), (2.149), двох матриць (2.165), одного з варіантів матриці Якобі рівняння частотного керування асинхронним двигуном агрегату (2.242), матриць Якобі рівнянь керування дроселем і керування байпасом. Конкретний вигляд двох останніх матриць залежить від обраних функцій керування дроселем і байпасом. З метою уникнення повторень і громіздкості у записі (3.6) цієї матриці використано лише відповідні індекси елементів тих матриць, із яких вона сформована («номер рядка» . «номер стовпця»):

3.1.2 Блок синхронного відцентрового помпового турбоагрегату

Структурна схема одиничного БСВПТА зображена на рис. 3.2.

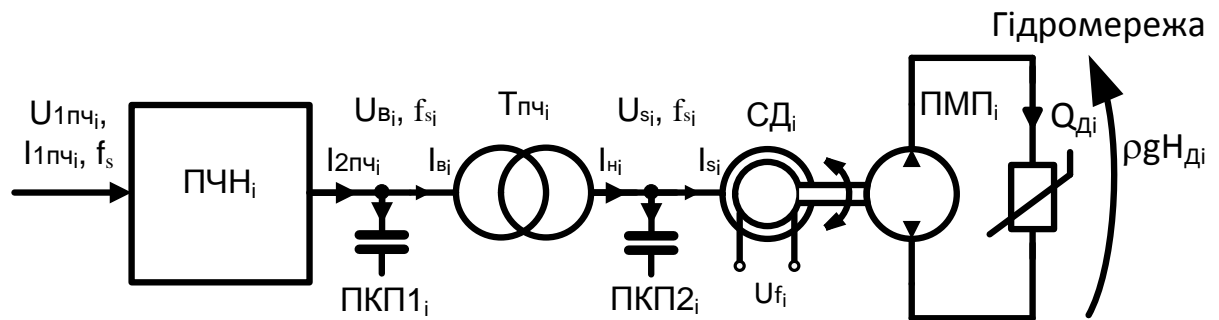


Рис. 3.2 Структурна схема БСВПТА

Відповідно до цієї структурної схеми формується ММ усталених режимів одиничного БСВПТА.

Вона складається з рівнянь ММ гідравлічних зв'язків i -го одиничного агрегату з ГМ (3.1) і (3.2), спрощеної ММ гідромережі (2.93), ММ помпи (2.66)..(2.74), ММ синхронного двигуна (2.118)..(2.123), ММ механічного зв'язку між СД та ВП (2.133), ММ перетворювача частоти та напруги (2.153), (2.154), ММ розділового трансформатора (2.141)..(2.146). Крім того, ММ необхідно доповнити рівняннями ММ двох ПКП (2.162), (2.163), одним з варіантів пар рівнянь (2.243) і (2.244), (2.245) і (2.246), (2.247) і (2.248) частотного керування СД, а також – рівняннями керування дроселем і байпасом.

Формуючи систему рівнянь на підставі схеми, що на рис. 3.1, слід врахувати, що у відповідних математичних моделях:

$$\begin{aligned} \omega_{s*б_i} &= \omega_{r*б_i}, \quad U_{2пчд_i} = U_{вд_i}, \quad U_{2пчq_i} = U_{вq_i}, \quad U_{нд_i} = U_{сд_i}, \quad U_{нq_i} = U_{сq_i}, \\ I_{2пчд_i} &= I_{11д_i}, \quad I_{2пчq_i} = I_{11q_i}, \quad I_{12д_i} = I_{вд_i}, \quad I_{12q_i} = I_{вq_i}, \\ I_{21д_i} &= I_{нд_i}, \quad I_{21q_i} = I_{нq_i}, \quad I_{22д_i} = I_{сд_i}, \quad I_{22q_i} = I_{сq_i}. \end{aligned}$$

Таким чином, отримуємо систему з 35 рівнянь з 38 невідомими. З урахуванням того, що 2 ортогональні складові $U_{1пчд_i}, U_{1пчq_i}$ вхідної напруги ПЧН відомі, оскільки вона задається джерелом живлення, розв'язанню підлягатиме система 35 рівнянь з 36 невідомими. Для однозначного

розв'язання цієї системи необхідно задати значення будь-якої одної невідомої. В результаті ми можемо отримати функційні залежності координат усталеного режиму чи необхідних за певними критеріями значень параметрів елементів від заданої невідомої.

У матрично-векторній формі ММ усталених режимів одиничного БСВПТА формується з рівнянь (3.3), (2.94), (2.75), (2.126), (2.134), (2.155), (2.148), двох рівнянь (2.164), одного з варіантів рівняння частотного керування СД агрегату (2.249), рівнянь керування дроселем і байпасом та набуває вигляду:

$$\mathbf{f}_{\text{БСВПТА}_i}(\mathbf{X}_{\text{БСВПТА}_i}) = \mathbf{0}, \quad (3.7)$$

$$\begin{aligned} \text{де } \mathbf{f}_{\text{БСВПТА}_i}(\mathbf{X}_{\text{БСВПТА}_i}) = & \left(\mathbf{f}_{\text{зв}_i}(\mathbf{X}_{\text{БСВПТА}_i}), \mathbf{f}_{\text{ГМ}}(\mathbf{X}_{\text{БСВПТА}_i}), \mathbf{f}_{\text{вп}_i}(\mathbf{X}_{\text{БСВПТА}_i}), \right. \\ & \mathbf{f}_{\text{СД}_i}(\mathbf{X}_{\text{БСВПТА}_i}), \mathbf{f}_{\text{СДзв}_i}(\mathbf{X}_{\text{БСВПТА}_i}), \mathbf{f}_{\text{ПЧН}_i}(\mathbf{X}_{\text{БСВПТА}_i}), \mathbf{f}_{\text{Г}_i}(\mathbf{X}_{\text{БСВПТА}_i}), \\ & \mathbf{f}_{\text{СДкер}_i}(\mathbf{X}_{\text{БСВПТА}_i}), \mathbf{f}_{\text{ПКП}_1}(\mathbf{X}_{\text{БСВПТА}_i}), \mathbf{f}_{\text{ПКП}_2}(\mathbf{X}_{\text{БСВПТА}_i}), \\ & \left. \mathbf{f}_{\text{др}_i}(\mathbf{X}_{\text{БСВПТА}_i}), \mathbf{f}_{\text{бп}_i}(\mathbf{X}_{\text{БСВПТА}_i}) \right)_t. \end{aligned}$$

Матриця Якобі $\mathbf{W}_{\text{БСВПТА}_i}$ системи рівнянь (3.7) формується шляхом диференціювання цієї системи. Вона складається з матриць (3.4), (2.95), (2.76), (2.127), (2.135), (2.156), (2.149), двох матриць (2.165), одного з варіантів матриці Якобі рівняння частотного керування СД (2.250), матриць Якобі рівнянь керування дроселем байпасом. Конкретний вигляд двох останніх матриць залежить від обраних функцій керування дроселем і байпасом. З метою уникнення повторень та громіздкості у записі (3.8) цієї матриці використано лише відповідні індекси елементів тих матриць, із яких вона сформована («номер рядка» . «номер стовпця»):

3.2 Математична модель групи блоків електроприводних відцентрових помпових турбоагрегатів зі сполученими гідротрактами

ММ усталених режимів групи, що складається з n блоків ВПТА зі сполученням гідротрактів pomp складається з таких елементів:

- 1) ММ гідравлічних зв'язків гідравлічних зв'язків багатоагрегатної системи ВП і ГМ та керування розподілом витрат і напорів робочої рідини;
- 2) n_{AD} і n_{CD} математичних моделей одиничних БАВПТА і БСВПТА без ГМ.

Із метою формалізації ММ представимо систему рівнянь групи блоків асинхронних (синхронних) ВПТА в такому матрично-векторному вигляді:

$$\mathbf{f}_{\text{ГР}}(\mathbf{X}_{\text{ГР}}) = (\mathbf{f}_{\text{ГР.ЗВ}}(\mathbf{X}_{\text{ГР}}), \mathbf{f}_{\text{ГМ}}(\mathbf{X}_{\text{ГР}}), \mathbf{f}_{\text{ГР.АГР}}(\mathbf{X}_{\text{ГР}}))_t, \quad (3.9)$$

де $\mathbf{f}_{\text{ГР.ЗВ}}(\mathbf{X}_{\text{ГР}})$ формується з рівнянь (2.226);

$\mathbf{f}_{\text{ГМ}}(\mathbf{X}_{\text{ГР}})$ – формується з рівнянь (2.94);

$\mathbf{f}_{\text{ГР.АГР}}(\mathbf{X}_{\text{ГР}}) = \mathbf{f}_{\text{АГР}_{1,i}}(\mathbf{X}_{\text{ГР}}), \dots, \mathbf{f}_{\text{АГР}_{j,i}}(\mathbf{X}_{\text{ГР}}), \dots, \mathbf{f}_{\text{АГР}_{p,m_p}}(\mathbf{X}_{\text{ГР}})$ – формується з рівнянь: (2.75), (2.112) або (2.126), (2.131) або (2.134), (2.155), (2.148), двох рівнянь (2.164), одного з варіантів (2.241) або (2.249) рівнянь частотного керування двигуном j, i -го ВПТА, рівнянь керування дроселем і байпасом;

$\mathbf{X}_{\text{ГР}} = (Q_d, H_d, (\mathbf{X}_{\text{АГР}_1})_t, \dots, (\mathbf{X}_{\text{АГР}_i})_t, \dots, (\mathbf{X}_{\text{АГР}_n})_t)$ – вектор-стовпець

координат режиму групи.

У матрично-векторній формі ММ групи ВПТА набуває вигляду:

$$\mathbf{f}_{\text{ГР}}(\mathbf{X}_{\text{ГР}}) = \mathbf{0} \quad (3.10)$$

Кількість рівнянь групи залежить від кількості блоків ВПТА та типів двигунів (АД чи СД). Гідромережа (відповідно – й рівняння ММ гідромережі), витрата рідини Q_d і напір H_d є спільними для всієї групи. Тому, на підставі даних про кількість рівнянь і невідомих, отриманих у п.п. 3.1.1, 3.1.2 для одиничного агрегату, використовуючи спрощену ММ гідромережі (2.93), отримуємо систему

$$N_{\text{Р.ГР}} = 36n_{\text{АД}} + 34n_{\text{СД}} + 1 \text{ рівнянь з } N_{\text{Н.ГР}} = 38n_{\text{АД}} + 36n_{\text{СД}} + 2 \text{ невідомими.} \quad (3.11)$$

З урахуванням того, що $2n_{\text{АД}} + 2n_{\text{СД}}$ невідомих (ортогональних

складових вхідних напруг ПЧН агрегатів) задаються джерелом електричного живлення, розв'язанню підлягатиме система $36n_{AD} + 34n_{CD} + 1$ рівнянь із $36n_{AD} + 34n_{CD} + 2$ невідомими. Для однозначного розв'язання цієї системи необхідно задати значення будь-якої одної невідомої. В результаті ми можемо отримати функційні залежності координат усталеного режиму чи необхідних за певними критеріями значень параметрів елементів від заданої невідомої.

Із метою формалізації ММ представимо матриці Якобі (3.6) та (3.8) ММ j, i -го одиничного блоку ВПТА агрегату в такому узагальненому вигляді:

$$\mathbf{W}_{\text{БВПТА}_i} = \left\| \begin{array}{c|c} \mathbf{W}_{\text{ГМ}} & \mathbf{0} \\ \hline \mathbf{W}_{\text{HQд}} & \mathbf{W}_{\text{HQгр}} \\ \hline \mathbf{0} & \mathbf{W}_{\text{АГР}_{j,i}} \end{array} \right\| \quad (3.12)$$

де $\mathbf{W}_{\text{ГМ}}$ – матриця Якобі ММ гідромережі (для спрощеної моделі вона визначається з виразу (2.95); у даному разі – це елементи 1.1 і 1.2 першого рядка матриці (3.6) (3.8));

$\mathbf{W}_{\text{HQд}}$, $\mathbf{W}_{\text{HQгр}}$ – складові матриці Якобі ММ гідравлічних зв'язків групи блоків ВПТА і гідромережі, що визначаються з виразу (2.227) (у даному випадку $\mathbf{W}_{\text{HQд}}$, $\mathbf{W}_{\text{HQгр}}$ – заміщують другий та третій рядки матриці (3.6) або матриці (3.8));

$\mathbf{W}_{\text{АГР}_i}$ – частина матриці (3.6) чи матриці (3.8), до складу якої не входять перший три рядки та перших два стовпці (з неї вилучено елементи, що відповідають ММ гідромережі та зв'язків з нею).

Матриця Якобі рівняння (3.10) ММ усталених режимів групи блоків ВПТА і ГМ формується на підставі виразу (3.12) і набуває такого вигляду:

$$\mathbf{W}_{\text{ГР}} = \left\| \begin{array}{c|c} \mathbf{W}_{\text{ГМ}} & \mathbf{0} \\ \hline \mathbf{W}_{\text{HQд}} & \mathbf{W}_{\text{HQгр}} \\ \hline \mathbf{0} & \text{diag}(\mathbf{W}_{\text{АГР}_{j,i}}) \end{array} \right\|. \quad (3.13)$$

У зв'язку з тим, що на практиці нерідко застосовується тільки послідовне чи тільки паралельне сполучення гідротрактів агрегатів, вбачається доцільним розглянути окремо ці два випадки.

3.2.1 Група блоків відцентрових помпових турбоагрегатів із послідовним сполученням гідротрактів pomp

ММ гідравлічних зв'язків багатоагрегатної системи ВПТА і гідрмережі та керування розподілом усталених витрат і напорів робочої рідини (рис. 2.17) докладно наведена в п. 2.3.2. Для m_j агрегатів з послідовним сполученням гідротрактів pomp, із урахуванням того, що $p=1, j=1$ і $n=m_j=m_1$, та з урахуванням того, що рівняння (2.223) балансу напорів і рівняння (2.220) розподілу витрат відсутні, ММ набуває такого вигляду:

рівняння (2.218) зв'язку між ГМ та всією групою блоків ВПТА за витратою, встановлене на підставі балансу витрат:

$$k_{Q,ВП_i} Q_{д_i} - k_{Q,ГМ} Q_{д} = 0, \quad i - \text{довільне} : 1; \quad (3.14)$$

рівняння (2.219) зв'язку між ГМ та всією групою блоків ВПТА за напором, установлене на підставі балансу напорів:

$$\sum_{i=1}^{m_1} (k_{H,ВП_i} H_{д_i}) - k_{H,ГМ} H_{д} = 0, \quad : 1; \quad (3.15)$$

рівняння (2.221) розподілу напорів послідовно сполучених гідротрактами блоків агрегатів:

$$k_{H,ВП_i} H_{д_i} - k_{H,ГМ} F_{H_i} (H_{д}, Q_{д}) = 0, \quad i = \overline{1, n-1} : n-1; \quad (3.16)$$

рівняння (2.222) балансу витрат m_1 послідовно сполучених гідротрактами блоків агрегатів:

$$k_{Q,ВП_i} Q_{д_i} - k_{Q,ВП_{i+1}} Q_{д_{i+1}} = 0, \quad i = \overline{1, n-1} : n-1. \quad (3.17)$$

Таким чином, для групи БАВПТА (БСВПТА) з послідовним сполученням гідротрактів pomp отримуємо таку кількість рівнянь зв'язку: $(n-1)+0+1+0+(n-1)+1=2n$.

У матрично-векторній формі вони набувають вигляду:

$$\mathbf{f}_{\text{зв.пс}}(\mathbf{X}_{\text{БВПТА}_i}) = \mathbf{0}, \quad (3.18)$$

де $\mathbf{X}_{\text{БВПТА}_i} = (Q_d, H_d, \mathbf{X}_{\text{АГР}_i})$,

де для i -го БАВПТА: $\mathbf{X}_{\text{АГР}_i} = (Q_{d_i}, H_{d_i}, R_{dp_i}, R_{\delta p_i}, Q_{\Sigma d_i}, Q_{\Sigma q_i}, Q_{впд_i}, Q_{впқ_i}, H_{0d_i}, H_{0q_i}, H_{впд_i}, H_{впқ_i}, \omega_{r*\delta_i}, \omega_{s*\delta_i}, I_{sd_i}, I_{sq_i}, I_{1rds_i}, I_{1rq_i}, I_{2rd_i}, I_{2rq_i}, U_{sd_i}, U_{sq_i}, \Psi_{\delta d_i}, \Psi_{\delta q_i}, I_{1пчд_i}, I_{1пчқ_i}, I_{2пчд_i}, I_{2пчқ_i}, \Psi_{1d\tau_i}, \Psi_{1q\tau_i}, U_{1пчд_i}, U_{1пчқ_i}, U_{vd_i}, U_{vq_i}, I_{нд_i}, I_{нқ_i}, I_{vd_i}, I_{vq_i})_t$;

для i -го БСВПТА: $\mathbf{X}_{\text{АГР}_i} = (Q_{d_i}, H_{d_i}, R_{dp_i}, R_{\delta p_i}, Q_{\Sigma d_i}, Q_{\Sigma q_i}, Q_{впд_i}, Q_{впқ_i}, H_{0d_i}, H_{0q_i}, H_{впд_i}, H_{впқ_i}, \omega_{r*\delta_i}, \omega_{s*\delta_i}, I_{sdi}, I_{sqi}, I_f, \phi_{s_i}, U_{sd_i}, U_{sq_i}, \Psi_{\delta d_i}, \Psi_{\delta q_i}, I_{1пчд_i}, I_{1пчқ_i}, I_{2пчд_i}, I_{2пчқ_i}, \Psi_{1d\tau_i}, \Psi_{1q\tau_i}, U_{1пчд_i}, U_{1пчқ_i}, U_{vd_i}, U_{vq_i}, I_{нд_i}, I_{нқ_i}, I_{vd_i}, I_{vq_i})_t$.

3.2.2 Група блоків відцентрових помпових турбоагрегатів із паралельним сполученням гідротрактів pomp

ММ гідравлічних зв'язків багатоагрегатної системи ВПТА і гідромережі та керування розподілом усталених витрат і напорів рідини (рис. 2.17) докладно наведена в п. 2.3.2. Для p блоків агрегатів з паралельним сполученням гідротрактів pomp із урахуванням того, що $j=1,2,\dots,p$, $m_j=1$,

$$n = \sum_{j=1}^p m_j = \sum_{j=1}^p 1 = p, \text{ рівняння розподілу напорів (2.221) та балансу витрат}$$

(2.222) відсутні, вона набуває такого вигляду:

рівняння (2.218) зв'язку між ГМ та групою блоків ВПТА за витратою, встановлене на підставі балансу витрат:

$$\sum_{j=1}^p (k_{Q.ВП_j} Q_{d_j}) - k_{Q.ГМ} Q_d = 0 : 1; \quad (3.19)$$

рівняння (2.219) зв'язку між ГМ та групою блоків ВПТА за напором, встановлене на підставі балансу напорів:

$$k_{H.ВП_j} H_{d_j} - k_{H.ГМ} H_d = 0, \quad j - \text{довільне} : 1; \quad (3.20)$$

рівняння (2.223) балансу напорів усіх p паралельно сполучених гідротрактами блоків агрегатів:

$$k_{H.VП_j} H_{d_j} - k_{H.VП_{j+1}} H_{d_{j+1}} = 0, \quad j = \overline{1, n-1} : n-1; \quad (3.21)$$

рівняння (2.220) розподілу витрат між блоками агрегатів групи:

$$k_{Q.VП_j} Q_{d_j} - k_{Q.ГМ} F_{Q_j}(H_d, Q_d) = 0, \quad j = \overline{1, n-1} : n-1. \quad (3.22)$$

Таким чином, для групи БАВПТА (БСВПТА) з паралельним сполученням гідротрактів pomp отримуємо таку кількість рівнянь зв'язку: $0+(n-1)+1+(n-1)+0+1=2n$.

У матрично-векторній формі вона набуває вигляду:

$$\mathbf{f}_{зв.пр}(\mathbf{X}_{БВПТА_i}) = \mathbf{0}, \quad (3.23)$$

де $\mathbf{X}_{БВПТА_i} = (Q_d, H_d, \mathbf{X}_{АГР_i})$,

де для i -го БАВПТА: $\mathbf{X}_{АГР_i} = (Q_{d_i}, H_{d_i}, R_{др_i}, R_{бп_i}, Q_{\Sigma d_i}, Q_{\Sigma q_i}, Q_{впд_i}, Q_{впқ_i}, H_{0d_i}, H_{0q_i}, H_{впд_i}, H_{впқ_i}, \omega_r^* \delta_i, \omega_s^* \delta_i, I_{sd_i}, I_{sq_i}, I_{1rds_i}, I_{1rq_i}, I_{2rd_i}, I_{2rq_i}, U_{sd_i}, U_{sq_i}, \Psi_{\delta d_i}, \Psi_{\delta q_i}, I_{1пчд_i}, I_{1пчқ_i}, I_{2пчд_i}, I_{2пчқ_i}, \Psi_{1дr_i}, \Psi_{1қr_i}, U_{1пчд_i}, U_{1пчқ_i}, U_{vd_i}, U_{vq_i}, I_{нд_i}, I_{нq_i}, I_{vd_i}, I_{vq_i})_t$;

для i -го БСВПТА: $\mathbf{X}_{АГР_i} = (Q_{d_i}, H_{d_i}, R_{др_i}, R_{бп_i}, Q_{\Sigma d_i}, Q_{\Sigma q_i}, Q_{впд_i}, Q_{впқ_i}, H_{0d_i}, H_{0q_i}, H_{впд_i}, H_{впқ_i}, \omega_r^* \delta_i, \omega_s^* \delta_i, I_{sdi}, I_{sqi}, I_f, \phi_{s_i}, U_{sd_i}, U_{sq_i}, \Psi_{\delta d_i}, \Psi_{\delta q_i}, I_{1пчд_i}, I_{1пчқ_i}, I_{2пчд_i}, I_{2пчқ_i}, \Psi_{1дr_i}, \Psi_{1қr_i}, U_{1пчд_i}, U_{1пчқ_i}, U_{vd_i}, U_{vq_i}, I_{нд_i}, I_{нq_i}, I_{vd_i}, I_{vq_i})_t$.

3.3 Математична модель електропостачальної системи

У загальному випадку ЕПС може мати різну, наперед невідому конфігурацію. Візьмемо за основу схему системи електропостачання, зображену на рис. 3.3. Живлення здійснюється від ЕЕС скінченної потужності з напругою U_C і частотою ω_s через ЛЕП L_C і головний знижувальний трансформатор T_C . Обвитка НН цього трансформатора приєднана до системи шин підстанції, від якої живиться довільна кількість у знижувальних трансформаторів. Обвитка НН k -го трансформатора приєднана до відповідної системи шин, до якої, в загальному разі, можуть бути приєднані:

- блоки ВПТА, їхні підгрупи чи групи;
- зображені у вигляді ємності ПКП потужності;

- зображене у вигляді активної та реактивної складових потужності СН.

Крім того, з метою досягнення максимальної адаптованості розроблюваної ММ до конкретних умов, в цій схемі відображені інші ПКП та СН в усіх можливих місцях їхнього приєднання.

У даному разі не вбачається доцільним конкретизувати кількість і схему сполучення обвиток трансформаторів, кількість трансформаторів на кожній системі шин, тип компенсувальних пристроїв, інші можливі особливості тої чи іншої схеми живлення, які враховуватимуться на етапі моделювання конкретного об'єкта шляхом адаптації до нього розробленої ММ.

На підставі схеми, що на рис. 3.3 представимо систему рівнянь ММ усталених режимів електропостачальної системи у вигляді y рівнянь однотипних ланок та рівняння загальної (спільної) частини:

$$\mathbf{f}_{\text{ЕПС}}(\mathbf{X}_{\text{ЕПС}}) = \left(\mathbf{f}_{\text{лан}_1}(\mathbf{X}_{\text{лан}_1}), \dots, \mathbf{f}_{\text{лан}_k}(\mathbf{X}_{\text{лан}_k}), \dots, \mathbf{f}_{\text{ел}_y}(\mathbf{X}_{\text{лан}_y}), \mathbf{f}_{\text{заг}}(\mathbf{X}_{\text{заг}}) \right)_t, \quad (3.24)$$

де $\mathbf{f}_{\text{лан}_k}(\mathbf{X}_{\text{лан}_k})$ – рівняння k -ї ланки системи живлення;

$\mathbf{f}_{\text{заг}}(\mathbf{X}_{\text{заг}})$ – рівняння загальної частини ЕПС;

$\mathbf{X}_{\text{ЕПС}} = \left(\mathbf{X}_{\text{лан}_1}, \dots, \mathbf{X}_{\text{лан}_k}, \dots, \mathbf{X}_{\text{лан}_y}, \mathbf{X}_{\text{заг}} \right)_t$ – вектор-стовпець координат режиму ЕПС.

У матрично-векторній формі рівняння ММ електропостачальної системи мають вигляд:

$$\mathbf{f}_{\text{ЕПС}}(\mathbf{X}_{\text{ЕПС}}) = \mathbf{0}. \quad (3.25)$$

Відносне значення частоти напруги ЕПС $\omega_{*\delta}$, яка в загальному разі входить до рівнянь ЕПС, є спільним для всіх рівнянь. Урахування допустимого відхилення частоти $\pm 0,2\text{Гц}$ ($\pm 0,4\%$) [211] від номінального значення практично не впливає на результати розрахунків, і ним можна знехтувати. Тому вважаємо частоту напруги ЕПС сталою й номінальною. За базове значення частоти прийнято її номінальне значення $\omega_{\delta}=50\text{Гц}$ (60Гц). Приймаємо $\omega_{*\delta}=1$ й усуваємо $\omega_{*\delta}$ в записі рівнянь загальної частини ЕПС.

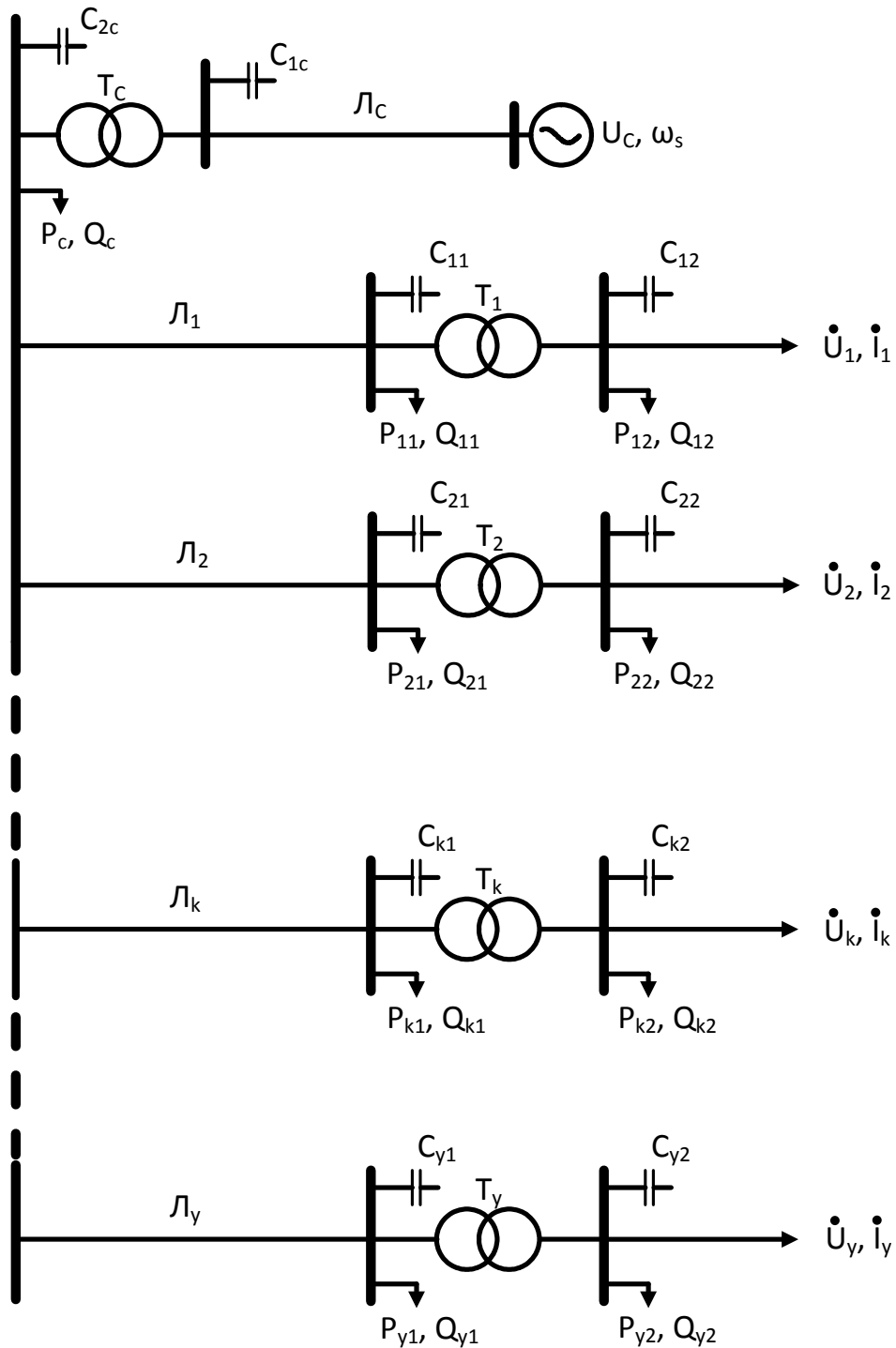


Рис. 3.3 Узагальнена схема ЕПС

Рівняння k -ї ланки ЕПС формується з рівняння (2.179) ЛЕП, рівнянь (2.164) ПКП, рівняння (2.148) трансформатора і двох рівнянь (2.186) СН:

$$\mathbf{f}_{\text{ланк}}(\mathbf{X}_{\text{ланк}}) = \left(\mathbf{f}_{L_k}(\mathbf{X}_{L_k}), \mathbf{f}_{\text{ПКП}_{k,1}}(\mathbf{X}_{\text{ПКП}_{k,1}}), \mathbf{f}_{\text{нав}_{k,1}}(\mathbf{X}_{\text{нав}_{k,1}}), \mathbf{f}_{T_k}(\mathbf{X}_{T_k}), \right. \\ \left. \mathbf{f}_{\text{ПКП}_{k,2}}(\mathbf{X}_{\text{ПКП}_{k,2}}), \mathbf{f}_{\text{нав}_{k,2}}(\mathbf{X}_{\text{нав}_{k,2}}), \mathbf{f}_{\text{зв.ланк}}(\mathbf{X}_{\text{ланк}}) \right)_t, \quad (3.26)$$

де $\mathbf{f}_{L_k}(\mathbf{X}_{L_k})$ – рівняння (2.179) ЛЕП;

$\mathbf{f}_{\text{ПКП}_{k,1}}(\mathbf{X}_{\text{ПКП}_{k,1}}), \mathbf{f}_{\text{ПКП}_{k,2}}(\mathbf{X}_{\text{ПКП}_{k,2}})$ – рівняння (2.168) ПКП;

$\mathbf{f}_{\text{Т}_k}(\mathbf{X}_{\text{Т}_k})$ – рівняння (2.148) трансформатора;

$\mathbf{f}_{\text{нав}_{k,1}}(\mathbf{X}_{\text{нав}_{k,1}}), \mathbf{f}_{\text{нав}_{k,2}}(\mathbf{X}_{\text{нав}_{k,2}})$ – рівняння (2.186) СН;

$\mathbf{f}_{\text{зв.ланк}}(\mathbf{X}_{\text{ланк}})$ – рівняння струмів у вузлах приєднання трансформатора за першим законом Кірхгофа:

$$I_{\text{вдТ}_k} - I_{2\text{Лд}_k} - I_{\text{пкпд}_{k,1}} - I_{\text{навд}_{k,1}} = 0; \quad (3.27)$$

$$I_{\text{вqТ}_k} - I_{2\text{Лq}_k} - I_{\text{пкпq}_{k,1}} - I_{\text{навq}_{k,1}} = 0; \quad (3.28)$$

$$I_{\text{ндТ}_k} - I_{\text{пкпд}_{k,2}} - I_{\text{навд}_{k,2}} - I_{2\text{d}_k} = 0; \quad (3.29)$$

$$I_{\text{нqТ}_k} - I_{\text{пкпq}_{k,2}} - I_{\text{навq}_{k,2}} - I_{2\text{q}_k} = 0, \quad (3.30)$$

$\mathbf{X}_{\text{ланк}} = \left(I_{1\text{Лд}_k}, I_{1\text{Лq}_k}, I_{2\text{Лд}_k}, I_{2\text{Лq}_k}, U_{\text{нд}_k}, U_{\text{нq}_k}, U_{\text{вд}_k}, U_{\text{вq}_k}, I_{\text{пкпд}_{k,1}}, I_{\text{пкпq}_{k,1}}, I_{\text{навд}_{k,1}}, I_{\text{навq}_{k,1}}, U_{k,1}, I_{\text{ндТ}_k}, I_{\text{нqТ}_k}, I_{\text{вдТ}_k}, I_{\text{вqТ}_k}, \Psi_{1\text{дТ}_k}, \Psi_{1\text{qТ}_k}, U_{\text{нд}_k}, U_{\text{нq}_k}, I_{\text{пкпд}_{k,2}}, I_{\text{пкпq}_{k,2}}, I_{\text{навд}_{k,2}}, I_{\text{навq}_{k,2}}, I_{2\text{d}_k}, I_{2\text{q}_k}, U_{k,2} \right)_t$ –

вектор-стовпець координат режиму k -ї ланки ЕПС, сформований з векторів

$\mathbf{X}_{\text{Л}_k}, \mathbf{X}_{\text{ПКП}_{k,1}}, \mathbf{X}_{\text{нав}_{k,1}}, \mathbf{X}_{\text{Т}_k}, \mathbf{X}_{\text{ПКП}_{k,2}}, \mathbf{X}_{\text{нав}_{k,2}}$ відповідних її елементів;

$I_{2\text{d}_k}, I_{2\text{q}_k}$ – ортогональні складові суми вхідних струмів всіх ПЧН агрегатів, які отримують живлення від k -ї ланки.

Слід зазначити, що замість ортогональних складових $U_{1\text{Лд}_k}, U_{1\text{Лq}_k}$ напруги початку ЛЕП ланки в цей вектор входять ортогональні складові $U_{\text{нд}_k}, U_{\text{нq}_k}$ напруги обвитки НН головного знижувального трансформатора, спільні для всіх ланок і загальної частини ЕПС (див. рис. 3.3). Під час формування вектора-стовпця $\mathbf{X}_{\text{ЕПС}}$ складові $U_{\text{нд}_k}, U_{\text{нq}_k}$ повинні бути виключені з усіх векторів $\mathbf{X}_{\text{ланк}}$ ланок.

У матрично-векторній формі рівняння k -ї ланки ЕПС набуває вигляду:

$$\mathbf{f}_{\text{ланк}}(\mathbf{X}_{\text{ланк}}) = 0. \quad (3.31)$$

Рівняння загальної частини ЕПС формується з рівнянь (2.193) ММ усталених режимів ЕЕС, рівняння (2.179) ЛЕП, двох рівнянь (2.168) ПКП,

рівняння (2.148) трансформатора та рівняння (2.186) СН:

$$\mathbf{f}_{\text{заг}}(\mathbf{X}_{\text{заг}}) = \left(\mathbf{f}_C(\mathbf{X}_C), \mathbf{f}_{L_C}(\mathbf{X}_{L_C}), \mathbf{f}_{\text{ПКП}_{c_1}}(\mathbf{X}_{\text{ПКП}_{c_1}}), \mathbf{f}_{T_C}(\mathbf{X}_{T_C}), \mathbf{f}_{\text{ПКП}_{c_2}}(\mathbf{X}_{\text{ПКП}_{c_2}}), \right. \\ \left. \mathbf{f}_{\text{нав}_C}(\mathbf{X}_{\text{нав}_C}), \mathbf{f}_{\text{зв}_C}(\mathbf{X}_{\text{заг}}) \right)_t, \quad (3.32)$$

де $\mathbf{f}_C(\mathbf{X}_C)$ – рівняння (2.193) ММ електропостачальної системи;

$\mathbf{f}_{L_C}(\mathbf{X}_{L_C})$ – рівняння (2.179) ЛЕП;

$\mathbf{f}_{\text{ПКП}_{c_1}}(\mathbf{X}_{\text{ПКП}_{c_1}}), \mathbf{f}_{\text{ПКП}_{c_2}}(\mathbf{X}_{\text{ПКП}_{c_2}})$ – рівняння (2.168) ПКП;

$\mathbf{f}_{T_C}(\mathbf{X}_{T_C})$ – рівняння (2.148) трансформатора

$\mathbf{f}_{\text{нав}_C}(\mathbf{X}_{\text{нав}_C})$ – рівняння (2.186) СН;

$\mathbf{f}_{\text{зв}_C}(\mathbf{X}_{\text{заг}})$ – рівняння струмів у вузлах приєднання трансформатора за першим законом Кірхгофа:

$$I_{\text{нд}T_C} - I_{\text{пкпд}C_2} - I_{\text{навд}C} - I_{\text{загд}} = 0; \quad (3.33)$$

$$I_{\text{нq}T_C} - I_{\text{пкпq}C_2} - I_{\text{навq}C} - I_{\text{загq}} = 0; \quad (3.34)$$

$$I_{2Ld_C} - I_{\text{пкпд}C_1} - I_{\text{вд}T_C} = 0; \quad (3.35)$$

$$I_{2Lq_C} - I_{\text{пкпq}C_1} - I_{\text{вq}T_C} = 0; \quad (3.36)$$

$\mathbf{X}_{\text{заг}} = \left(I_{cd}, I_{cq}, U_{cd}, U_{cq}, I_{2Ld_C}, I_{2Lq_C}, I_{\text{пкпд}C_1}, I_{\text{пкпq}C_1}, I_{\text{нд}T_C}, I_{\text{нq}T_C}, I_{\text{вд}T_C}, I_{\text{вq}T_C}, \Psi_{1d_T_C}, \Psi_{1q_T_C}, \right. \\ \left. U_{\text{вд}C}, U_{\text{вq}C}, I_{\text{пкпд}C_2}, I_{\text{пкпq}C_2}, I_{\text{навд}C}, I_{\text{навq}C}, U_{\text{нд}C}, U_{\text{нq}C}, I_{\text{загд}}, I_{\text{загq}}, U_C \right)_t$ – вектор-стовпець координат режиму загальної частини ЕПС, сформований з векторів відповідних її елементів.

У матрично-векторній формі рівняння ММ загальної частини ЕПС набуває вигляду:

$$\mathbf{f}_{\text{заг}}(\mathbf{X}_{\text{заг}}) = 0. \quad (3.37)$$

Для зв'язку між ланками і загальною частиною ЕПС необхідно записати відповідні рівняння. Вони формуються на підставі першого закону Кірхгофа й мають такий вигляд:

$$I_{\text{загd}} - \sum_{k=1}^y I_{1\text{Лd}_k} = 0; \quad (3.38)$$

$$I_{\text{загq}} - \sum_{k=1}^y I_{1\text{Лq}_k} = 0, \quad (3.39)$$

де $I_{\text{ндт}_C}, I_{\text{нqт}_C}$ – ортогональні складові струму обвитки НН головного знижувального трансформатора T_C ;

$I_{\text{пкпd}_{C2}}, I_{\text{пкпq}_{C2}}$ – ортогональні складові струму ПКП C_{2C} ;

$I_{\text{навd}_C}, I_{\text{навq}_C}$ – ортогональні складові струму СН P_{2C}, Q_{2C} ;

$I_{1\text{Лd}_k}, I_{1\text{Лq}_k}$ – ортогональні складові струму початку ЛЕП k -ї ланки.

Таким чином, у матрично-векторній формі рівняння (3.38) і (3.39) зв'язку між усіма ланками та загальною частиною ЕПС набуває вигляду:

$$\mathbf{f}_{\text{лан-заг}}(\mathbf{X}_{\text{ЕПС}}) = \mathbf{0}. \quad (3.40)$$

Матриця Якобі рівняння (3.40) ustalених режимів зв'язку ланок і загальної частини ЕПС формується на загальновідомих підставах, а її конкретний вигляд залежить від фактичної схеми. Матриця Якобі рівняння (3.25) ЕПС набуває такого формалізованого вигляду:

$$\mathbf{W}_{\text{ЕПС}} = \left\| \begin{array}{c|c} \mathbf{diag}(\mathbf{W}_{\text{лан}_k}) & \mathbf{0} \\ \hline \mathbf{0} & \mathbf{W}_{\text{заг}} \\ \hline \mathbf{W}_{\text{лан-заг}} & \end{array} \right\|, \quad (3.41)$$

де $\mathbf{W}_{\text{лан}_k}$ – матриця Якобі рівняння (3.31) ММ k -ї ланки;

$\mathbf{W}_{\text{заг}}$ – матриця Якобі рівняння (3.37) ММ загальної частини;

$\mathbf{W}_{\text{лан-заг}}$ – матриця Якобі рівняння (3.40) зв'язку.

Таким чином, отримуємо систему з:

$$N_{P,\text{ЕПС}}=24y+25 \text{ рівнянь з } N_{N,\text{ЕПС}}=26y+25 \text{ невідомими.} \quad (3.42)$$

З урахуванням того, що $2y$ ортогональних складових (вхідних напруг ПЧН всіх y ланок) відомі, розв'язанню підлягатиме система $24y+25$ рівнянь з $24y+25$ невідомими.

3.4 Математична модель узагальненого електротехнічного комплексу "електропостачальна система – помпова станція"

Із метою досягнення максимально можливої адаптації розроблюваної ММ до тих чи інших конкретних умов представимо ЕТК узагальненою структурною схемою, що наведена на рис. 3.4, умовно розділивши її на дві частини: ЕПС та групу блоків ВПТА з гідромережею, між якими існує електричний зв'язок за напругою та струмом.

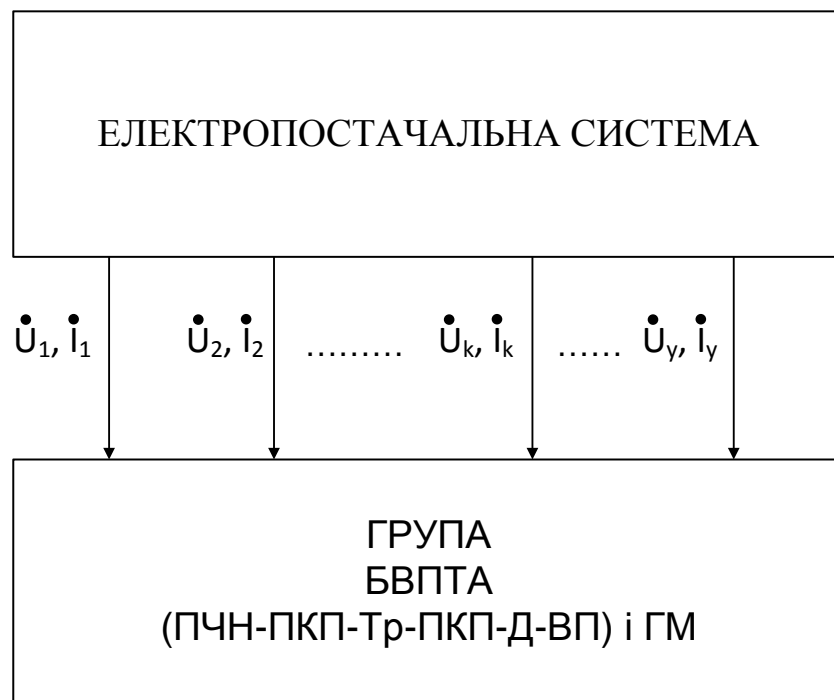


Рис. 3.4 Структурна схема узагальненого електротехнічного комплексу "електропостачальна система – помпова станція"

Таке представлення є необхідним у зв'язку з тим, що різні агрегати групи можуть отримувати живлення від одних і тих же шин чи від шин з різним рівнем напруги (наприклад, двигуни підпірної й основної помп мають різні номінальні напруги). Ця інформація стає відомою лише під час аналізу схеми ЕПС конкретного електроспоживача.

Таким чином, сформувавши математичну модель ЕПС та, об'єднавши її за допомогою рівнянь зв'язку з ММ групи блоків ВПТА, ми отримаємо математичну модель ЕТК.

Зважаючи на те, що, як зазначалось, схема приєднання блоків ВПТА до

ЕПС наперед невідома, вбачається доцільним записати рівняння зв'язку між ЕПС та групою блоків ВПТА у такому вигляді:

$$U_{нд_k} - U_{1пчd_{g_k}} = 0, \quad g_k = \overline{1, w_k}, \quad k = \overline{1, y}; \quad (3.43)$$

$$U_{нq_k} - U_{1пчq_{g_k}} = 0, \quad g_k = \overline{1, w_k}, \quad k = \overline{1, y}; \quad (3.44)$$

$$I_{ндT_k} - I_{пкпd_{k,2}} - I_{наvd_{k,2}} - \sum_{g_k=1}^{w_k} I_{1пчd_{g_k}} = 0, \quad k = \overline{1, y}; \quad (3.45)$$

$$I_{нqT_k} - I_{пкпq_{k,2}} - I_{наvq_{k,2}} - \sum_{g_k=1}^{w_k} I_{1пчq_{g_k}} = 0, \quad k = \overline{1, y}, \quad (3.46)$$

де $U_{нд_k}, U_{нq_k}$ – ортогональні складові напруги обвитки НН знижувального трансформатора T_k k -ї ланки;

$U_{1пчd_{g_k}}, U_{1пчq_{g_k}}$ – ортогональні складові вхідної напруги ПЧН g_k -го блока ВПТА, приєднаного до k -ї ланки;

$I_{ндT_k}, I_{нqT_k}$ – ортогональні складові струму обвитки НН знижувального трансформатора T_k k -ї ланки;

$I_{пкпd_{k,2}}, I_{пкпq_{k,2}}$ – ортогональні складові струму ПКП C_{k2} k -ї ланки;

$I_{наvd_{k,2}}, I_{наvq_{k,2}}$ – ортогональні складові струму СН k -ї ланки;

$I_{1пчd_{g_k}}, I_{1пчq_{g_k}}$ – ортогональні складові вхідного струму ПЧН та напруги g_k -го блока ВПТА, приєднаного до k -ї ланки;

W_k – кількість блоків ВПТА, ПЧН яких приєднані до k -ї ланки.

У матрично-векторному вигляді система рівнянь зв'язку (3.43)..(3.46) набуває вигляду:

$$\mathbf{f}_{зв}(\mathbf{X}_{зв}) = \mathbf{0}, \quad (3.47)$$

де $\mathbf{X}_{зв}$ – вектор-стовпець координат режиму електроспоживача – помпової станції, який формується зі спільних координат для ЕПС та групи блоків ВПТА.

Таким чином, кількість рівнянь зв'язку дорівнює:

$$N_{P.GP-EPC} = 2y + 2n_{AD} + 2n_{CD}. \quad (3.48)$$

Матриця Якобі $W_{зв}$ рівняння (3.47) зв'язку ЕПС та групи блоків ВПТА формується на загальновідомих підставах, а її конкретний вигляд залежить від фактичної схеми живлення помпових агрегатів.

Таким чином, сформовано всі необхідні елементи ММ усталених режимів узагальненого ЕТК і розроблено засади їхньої адаптації до конкретних умов. У матрично-векторному вигляді рівняння ММ усталених режимів узагальненого ЕТК набуває вигляду:

$$f_{\text{ЕТК}}(X_{\text{ЕТК}}) = 0, \quad (3.49)$$

де $X_{\text{ЕТК}} = (X_{\text{ГР}}, X_{\text{ЕПС}})_t$ – вектор-стовпець координат режиму.

Узагальнений вигляд матриці Якобі рівняння (3.49) такий:

$$W_{\text{ЕТК}} = \left\| \begin{array}{c|c} W_{\text{ГР}} & 0 \\ \hline 0 & W_{\text{ЕПС}} \\ \hline & W_{\text{зв}} \end{array} \right\|, \quad (3.50)$$

де $W_{\text{ГР}}$ – матриця Якобі (3.13) рівняння групи блоків ВПТА;

$W_{\text{ЕПС}}$ – матриця Якобі (3.41) рівняння ЕПС;

$W_{\text{зв}}$ – матриця Якобі рівняння (3.47) зв'язку ЕПС та групи БВПТА.

У розширеному, максимально придатному для практичного використання вигляді матрицю (3.50) Якобі $W_{\text{ПС}}$ можна представити таким чином:

$$W_{\text{ЕТК}} = \left\| \begin{array}{c|c|c} W_{\text{ГМ}} & 0 & \\ \hline W_{\text{НҚд}} & W_{\text{НҚар}} & 0 \\ \hline 0 & \text{diag}(W_{\text{АГР}_{j,i}}) & \\ \hline & & \text{diag}(W_{\text{лан}_k}) & 0 \\ & 0 & & W_{\text{заг}} \\ & & & W_{\text{лан-заг}} \\ \hline & & & W_{\text{зв}} \end{array} \right\|, \quad (3.51)$$

де $W_{\text{ГМ}}$ – матриця Якобі (2.95) рівняння ГМ;

$W_{\text{НҚд}}$, $W_{\text{НҚар}}$ – складові матриці Якобі рівнянь ММ гідравлічних зв'язків

багатоагрегатної системи БВПТА і ГМ, що визначаються з виразу (2.227) (у даному випадку $W_{HQд}$, W_{HQagr} – заміщують другий та третій рядки матриці (3.6) або матриці (3.8));

$W_{AGR_{j,i}}$ – частина матриці (3.6) або матриці (3.8) j,i -го блока ВПТА, до складу якої не входять перший три рядки та перших два стовпці (з неї вилучено елементи, що відповідають ММ гідромережі та зв'язків з нею);

$W_{ланк}$ – матриця Якобі рівняння (3.31) ММ k -ї ланки ЕПС;

$W_{заг}$ – матриця Якобі рівняння (3.37) ММ загальної частини ЕПС;

$W_{лан-заг}$ – матриця Якобі рівняння (3.40) зв'язку k -ї ланки ЕПС та загальної частини ЕПС;

$W_{зв}$ – матриця Якобі рівняння (3.47) зв'язку ЕПС та групи блоків ВПТА.

На підставі даних про кількість рівнянь і невідомих, отриманих у п. 3.2 для групи агрегатів (3.11), отриманих у п. 0 для ЕПС (3.42) та зв'язку ЕПС з групою блоків ВПТА (3.48), отримуємо систему

$$\begin{aligned} N_{P.ПС} &= N_{P.ГР} + N_{P.ЕПС} + N_{P.ГР-ЕПС} = 38n_{AD} + 36n_{CD} + 26y + 26 \text{ рівнянь із} \\ N_{H.ПС} &= N_{H.ГР} + N_{H.ЕПС} + N_{H.ГР-ЕПС} = 38n_{AD} + 36n_{CD} + 26y + 27 \text{ невідомими,} \end{aligned} \quad (3.52)$$

де n_{AD} – кількість асинхронних блоків ВПТА; n_{CD} – кількість синхронних блоків ВПТА; y – кількість ланок ЕПС (рис. 3.4).

Матрично-векторне рівняння (3.49) є одновимірною ($N_{H.ПС} - N_{P.ПС} = 1$) неявною статичною характеристикою ЕТК у $N_{H.ПС}$ -вимірному просторі координат усталеного режиму ЕТК. Вектор $X_{ПС}$ координат цього простору є сукупністю $N_{H.ПС}$ координат усталеного режиму ЕТК:

$$X_{ЕТК} = (X_1, X_2, \dots, X_v, \dots, X_{N_{H.ПС}})_t. \quad (3.53)$$

Будь-яку з координат вектора (3.53) можна прийняти за незалежну. Тоді всі інші координати стають залежними від неї:

$$X_{ЕТК}^v = (X_1, X_2, \dots, X_{v-1}, X_{v+1}, \dots, X_{N_{H.ПС}-1}, X_{N_{H.ПС}})_t = \varphi(X_v), \quad (3.54)$$

де $X_{ЕТК}^v$ – вектор-стовпець залежних від X_v координат усталеного режиму.

У цьому разі рівняння (3.49) перетворюється в нуль-вимірну

характеристику й описує усталений режим ЕТК, який визначається $N_{Н.ПС}-I$ координатами вектора $\mathbf{X}_{ЕТК}^v$. Послідовно надаючи числових значень обраній незалежній координаті X_v , і, щоразу розв'язуючи числовим методом НССР (3.49), ми отримуємо функційні залежності (3.54) вектора $\mathbf{X}_{ЕТК}^v$ усіх інших залежних від неї координат. Таким чином ми одержуємо функційні залежності координат усталеного режиму ЕТК від заданої незалежної змінної. Наприклад, задаючи низку різних значень витрати рідини спільної гідромережі, ми розраховуємо всі інші координати усталеного режиму всіх елементів ЕТК.

3.5 Пошук нульових наближень

Для розв'язання НССР (3.49) математичної моделі усталених режимів ЕТК використано диференційний метод пошуку нульових наближень у формі h -характеристик [112, 120, 144, 202]. Доповнивши НССР (3.49) допоміжним рівнянням для отримання кількісних значень допоміжної координати h , запишемо її в такому вигляді:

$$\mathbf{f}_{ЕТК}(\mathbf{X}_{ЕТК}(h(\varepsilon)), h(\varepsilon)\mathbf{U}) = 0; \quad (3.55)$$

$$h(\varepsilon) - \varepsilon = 0, \quad (3.56)$$

де \mathbf{U} – вектор-стовпець інтенсивностей режиму (електрорушійних сил, заданих напруг елементів ЕПС, механічних моментів двигунів і напорів ВП); $\mathbf{X}_{ЕТК}(h(\varepsilon))$ – вектор-стовпець координат режиму елементів ЕПС помпової станції (електричних струмів і потокозчеплень електричних двигунів і трансформаторів, гідравлічних витрат, інших координат режиму); h, ε – допоміжні координати.

Алгоритм отримання диференційного рівняння для пошуку нульових наближень полягає в диференціюванні рівнянь (3.55), (3.56) по допоміжній координаті ε :

$$\mathbf{W}_{ЕТК}^{-1}(\mathbf{X}_{ЕТК}(h(\varepsilon)))d\mathbf{X}_{ЕТК}(h(\varepsilon))/d\varepsilon + \mathbf{U} = \mathbf{0}; \quad (3.57)$$

$$dh(\varepsilon)/d\varepsilon - 1 = 0. \quad (3.58)$$

Задавши $\mathbf{U}=\mathbf{U}_{ном}$, та, здійснивши інтегрування НССР (3.57), (3.58)

числовим методом у межах ε від 0 до 1, отримаємо при $\varepsilon = 1$ нульове наближення вектора-стовпця $\mathbf{X}^{(0)}_{\text{ЕТК}}$ координат базового (номінального) режиму. Координати усталених режимів ЕТК з іншими заданими значеннями інтенсивностей отримуємо шляхом багаторазового розв'язання числовим [242, 60, 144] методом НССР (3.49) з необхідним кроком зміни обраної нами незалежної координати, використовуючи щоразу для наступного режиму за нульове наближення вектора-стовпця $\mathbf{X}^{(0)}_{\text{ЕТК}}$ розрахований $\mathbf{X}_{\text{ЕТК}}$ попереднього режиму.

3.6 Висновки до розділу 3

На підставі ММ окремих елементів уперше сформовано узагальнену ММ усталених режимів ЕТК довільної конфігурації з послідовно-паралельним сполученням гідротрактів ВП з урахуванням статичної напірної характеристики (а за необхідності – й математичної моделі) ГМ.

Запропонована математична модель, на відміну від наявних, дозволяє здійснювати комплексний розрахунок усталених режимів ЕТК з урахуванням характеристик, параметричних особливостей, взаємного впливу агрегатів, які складаються з об'єктів різної природи (електромеханічної та гідравлічної), оперуючи безпосередньо їхніми внутрішніми фізичними параметрами.

Узагальнено принципи композиції математичної моделі, що дозволяє адаптувати її для ЕТК довільної структури з різною робочою рідиною. Адаптація наведеної математичної моделі для аналізу усталених режимів електропостачальної системи конкретної помпової станції здійснюється шляхом зміни, вилучення чи доповнення відповідних рівнянь, параметрів елементів згідно з реальними складом устаткування, його властивостями, умовами роботи та схемою сполучень.

Далі необхідно перевірити адекватність ММ шляхом реалізації відповідних ЦМ засобами обчислювальної техніки та продемонструвати її застосування для розроблення раціональної схеми електричного живлення й мікропроцесорної системи керування режимами роботи ЕТК.

РОЗДІЛ 4 ПЕРЕВІРКА АДЕКВАТНОСТІ МОДЕЛІ ТА ЇЇ РЕАЛІЗАЦІЯ

Перевірку адекватності створеної математичної моделі здійснено шляхом розрахунку усталених режимів частини ЕТК нафтоперегінної станції (НПС) "Карпати" та порівняння отриманих результатів з її технологічними режимами.

Крім цього, створену ММ реалізовано для таких варіантів ЕТК:

- одиничний асинхронний БВПТА;
- одиничний синхронний БВПТА;
- багатоагрегатна ПС з двома групами ВПТА, які працюють на дві різні ГМ.

Із використанням реалізованих варіантів ММ здійснено низку тестових розрахунків координат режиму.

4.1 Перевірка адекватності моделі

НПС "Карпати" (сучасна назва ЛВДС – лінійно-виробничо-диспетчерська станція "Сколе") філії "Магістральні нафтопроводи "Дружба" ПАТ "Укртранснафта" здійснює приймання нафти від суміжних підприємств, транспортування нафти магістральними нафтопроводами і здавання її споживачам, а також забезпечення надійної і безпечної експлуатації закріплених за нею об'єктів магістральних нафтопроводів. Вона є проміжною помповою станцією нафтопроводу "Дружба" на ділянці Броди – державний кордон України. Помпування нафти забезпечують такі ПС:

- ПС №1 - магістральна ПС першої черги;
- ПС №2 - магістральна ПС другої черги;
- підпірна ПС №1;
- підпірна ПС №2;
- майданчик підпірної ПС.

Крім того, на території НПС "Карпати" розташовані два комплекси технологічних споруд першої і другої черги нафтогону.

До комплексу технологічних споруд першої черги належать:

- майданчик фільтрів-брудовловлювачів;
- майданчик запобіжних клапанів підпірних ВП першої черги;
- майданчик запобіжних клапанів магістральних ВП першої черги; камера регуляторів тиску №1;

- дві підземні ємності по 50м^3 кожна збирання дренажу та витоків нафти;
- бокс дизель-генератора;
- бокс компресорної станції пневматичних приводів регуляторів тиску.

До комплексу технологічних споруд другої черги належать:

- майданчик фільтрів-брудовловлювачів;
- майданчик запобіжних клапанів підпірних ВП другої черги;
- майданчик запобіжних клапанів магістральних ВП другої черги; камера регулятора тиску №2;

- підземна ємність по $12,5\text{м}^3$ кожна збирання дренажу та витоків нафти.

На НПС "Карпати" встановлені три нафтові резервуари РВС-3000 по 3000м^3 кожний, підземна ємність $12,5\text{м}^3$ збору конденсату парів нафти та майданчик запобіжних клапанів захисту резервуарів.

Із метою перевірки адекватності створеної ММ здійснено розрахунок усталених режимів ЕТК, що складається з паралельно сполучених гідротрактами двох БВПТА з некерованими ВП типу 14НД-12*2, які приводяться в рух електродвигунами 4АЗМВ-2500/6000-У2, 5 магістральної ПС №1 першої черги.

Паспортні дані й параметри заступної схеми АД 4АЗМВ-2500/6000-У2, 5 наведені в таблиці 4.22. Паспортні дані й параметри заступної схеми ВП 14НД-12*2 [93, 94] наведені в таблиці 4.1. Зареєстровані кожних чотири години протягом доби кожного першого числа кожного місяця протягом року значення витрат ВП, активних потужностей електродвигунів, а також – густини, кінематичної в'язкості й температури помпованої нафти, від якої залежить її кінематична в'язкість [37], наведені в таблицях 4.2..4.6.

Паспортні дані відцентрової помпи 14НД-12*2

P_n , кВт	n_n , об/хв	$H_{Дн}$, м	$Q_{Дн}$, м ³ /с	η_n	$H_{0н*}$	$r_{\Delta q*}$	$x_{\Delta q*}$
1459	3000	370	0,3056	0,76	1,886	36,29	15,49

Продовження таблиці 4.1

$r_{\Delta H*}$	$x_{\Delta H*}$	x_t*	$x_{\mu h*}$	$x_{\mu q*}$	r_M*	x_M*
$0,98 \cdot 10^{-3}$	0,454	0,489	0,158	1,727	11,264	0,049

Технологічні значення витрат ВП

Місяць Година	Об'ємна витрата Q_d , м ³ /год					
	1	2	3	4	5	6
04.00	603	554	457	317	752	809
08.00	750	741	495	875	751	995
12.00	849	747	501	1092	625	1100
16.00	1003	1004	550	1095	709	1012
20.00	1005	1103	748	1059	997	1051
24.00	951	1001	702	1054	998	1099

Продовження таблиці 4.2

Місяць Година	Об'ємна витрата Q_d , м ³ /год					
	7	8	9	10	11	12
04.00	878	994	1052	1101	155	24
08.00	652	1047	903	1104	210	53
12.00	649	1049	804	1097	76	54
16.00	704	1093	807	1098	26	51
20.00	746	1044	753	1106	126	23
24.00	803	1008	757	1107	223	11

Технологічні значення активної потужності на затискачах статора АД

Місяць Година	Активна потужність, кВт					
	1	2	3	4	5	6
04.00	1211	1163	1057	886	1341	1391
08.00	1341	1323	1099	1447	1342	1492
12.00	1421	1331	1103	1496	1239	1504
16.00	1491	1488	1161	1505	1322	1492
20.00	1490	1503	1340	1495	1492	1497
24.00	1481	1491	1306	1495	1491	1505

Продовження таблиці 4.3

Місяць Година	Активна потужність, кВт					
	7	8	9	10	11	12
04.00	1448	1493	1494	1505	712	639
08.00	1262	1496	1459	1499	747	651
12.00	1261	1497	1388	1503	663	650
16.00	1316	1501	1390	1504	639	650
20.00	1331	1496	1344	1499	702	639
24.00	1389	1491	1344	1500	762	636

Таблиця 4.4

Технологічні значення густини нафти

Місяць Година	Густина, кг/м ³					
	1	2	3	4	5	6
04.00	0,8722	0,8717	0,7815	0,8715	0,8709	0,8709
08.00	0,8721	0,8715	0,7813	0,8714	0,8710	0,8708
12.00	0,8723	0,8716	0,7814	0,8715	0,8710	0,8708
16.00	0,8722	0,8716	0,7815	0,8713	0,8711	0,8707
20.00	0,8723	0,8715	0,7815	0,8714	0,8711	0,8707
24.00	0,8724	0,8716	0,7816	0,8715	0,8710	0,8708

Продовження таблиці 4.4

Година \ Місяць	Густина, кг/м ³					
	7	8	9	10	11	12
04.00	0,8709	0,8711	0,8711	0,8714	0,8716	0,8714
08.00	0,8709	0,8709	0,8712	0,8715	0,8717	0,8713
12.00	0,8710	0,8709	0,8712	0,8715	0,8717	0,8715
16.00	0,8710	0,8710	0,8711	0,8714	0,8716	0,8714
20.00	0,8711	0,8711	0,8712	0,8714	0,8715	0,8714
24.00	0,8708	0,8708	0,8711	0,8715	0,8716	0,8715

Таблиця 4.5

Технологічні значення кінематичної в'язкості нафти

Година \ Місяць	В'язкість, сСт					
	1	2	3	4	5	6
04.00	28,18	25,33	24,04	23,47	23,38	23,18
08.00	28,16	25,32	24,10	23,50	23,37	23,17
12.00	28,21	25,31	24,09	23,51	23,36	23,16
16.00	28,19	25,32	24,11	23,51	23,36	23,16
20.00	28,22	25,34	24,11	23,50	23,36	23,16
24.00	28,16	25,33	24,10	23,55	23,37	23,17

Продовження таблиці 4.5

Година \ Місяць	Кінематична в'язкість, сСт					
	7	8	9	10	11	12
04.00	23,08	23,12	23,25	23,48	25,38	27,55
08.00	23,07	23,11	23,24	23,47	25,37	27,61
12.00	23,07	23,10	23,24	23,47	25,36	27,48
16.00	23,06	23,10	23,24	23,46	25,35	27,59
20.00	23,05	23,11	23,23	23,47	25,36	27,54
24.00	23,06	23,12	23,24	23,48	25,37	27,56

Технологічні значення температури нафти

Година \ Місяць	Температура, °С					
	1	2	3	4	5	6
04.00	4,43	4,51	5,12	5,87	6,16	6,31
08.00	4,45	4,52	5,13	5,88	6,17	6,31
12.00	4,45	4,53	5,13	5,89	6,18	6,32
16.00	4,45	4,52	5,14	5,90	6,17	6,33
20.00	4,44	4,51	5,13	5,89	6,17	6,32
24.00	4,44	4,51	5,12	5,88	6,16	6,32

Продовження таблиці 4.6

Година \ Місяць	Температура, °С					
	7	8	9	10	11	12
04.00	6,49	6,31	6,17	5,99	4,48	4,47
08.00	6,49	6,32	6,17	6,00	4,49	4,46
12.00	6,51	6,33	6,18	6,01	4,50	4,47
16.00	6,52	6,34	6,19	6,01	4,50	4,48
20.00	6,51	6,33	6,17	6,00	4,49	4,47
24.00	6,51	6,32	6,17	6,00	4,48	4,46

Наведені в таблицях 4.2, 4.4..4.6 дані є вхідними для математичної моделі. На рис. 4.1 побудовано технологічний графік залежності активної потужності $P_{\text{АДексп}}$ на затискачах обвитки статора АД агрегату ЕТК від технологічних значень об'ємної витрати рідини. На рис. 4.2 побудовано залежність питомого споживання активної електроенергії $W_{\text{ПИТексп}}$ на помпування одиниці об'єму рідини від відносного значення витрати. На цих рисунках крапками зображено залежності, отримані за експериментальними

даними таблиць 4.2 й 4.3. Суцільною лінією синього кольору на цих же рисунках наведено аналогічні залежності P_{AD} й $W_{пит}$, отримані в результаті математичного моделювання цього ж агрегату ЕТК.

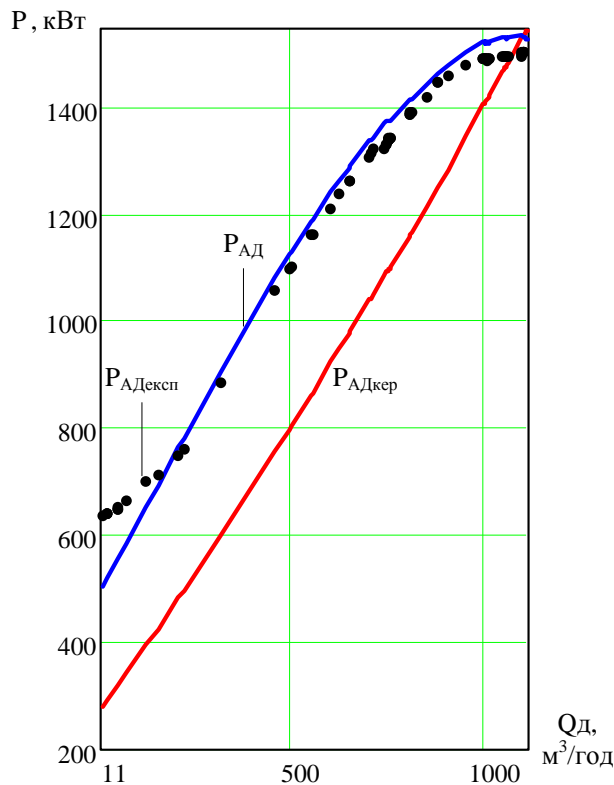


Рис. 4.1 Активна потужність на затискачах статора двигуна ЕТК

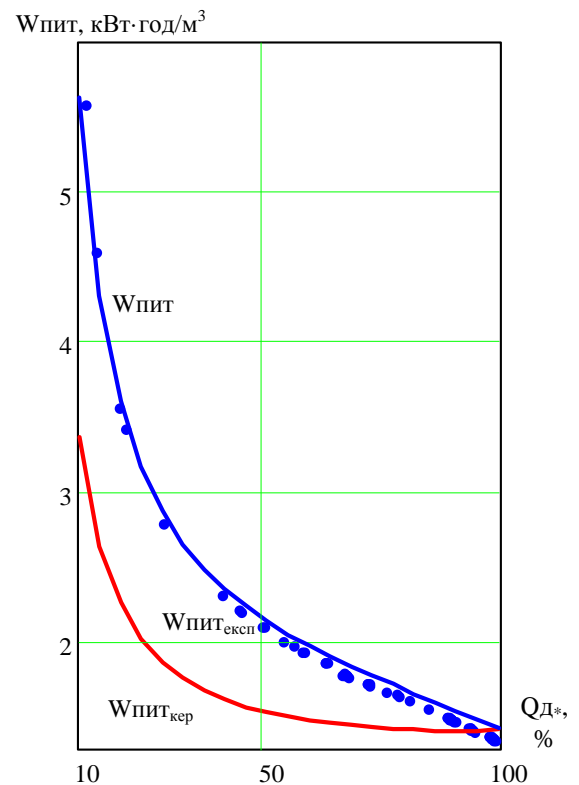


Рис. 4.2 Питомі витрати активної електроенергії агрегату ($H_{ном}=370$ м)

Адекватність відтворення математичною моделлю технологічних показників режиму агрегату ЕТК оцінено відносною похибкою розрахункової активної потужності на затискачах АД. Графік залежності модуля цієї похибки від коефіцієнта завантаження помпи за об'ємною витратою рідини (відносного значення витрати) наведено на рис. 4.3.

Отримані результати показують, що відносна похибка моделювання:

- не перевищує 3% за відносного значення витрати понад 14,1%;
- зростає до 7% зі зниженням відносного значення витрати до 11,5%;
- перевищує 11,7% зі зниженням відносного значення витрати менше 6,9%.

Середньоквадратична відносна похибка в усьому діапазоні витрат складає 6,1%. Однак, енергетично неефективні низькі значення витрат

(менше 11,6%) є нехарактерними для понад 88,9% інших тривалих експлуатаційних режимів. Це дає підстави не враховувати їх для оцінки адекватності математичної моделі. У діапазоні відносного значення витрат від 11,5% до 100%, середньоквадратична відносна похибка складає 2,44%.

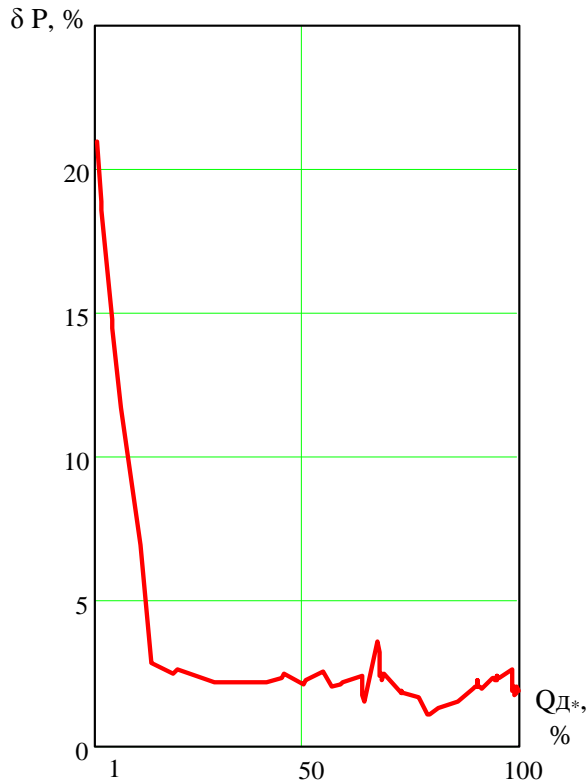


Рис. 4.3 Відносна похибка моделювання

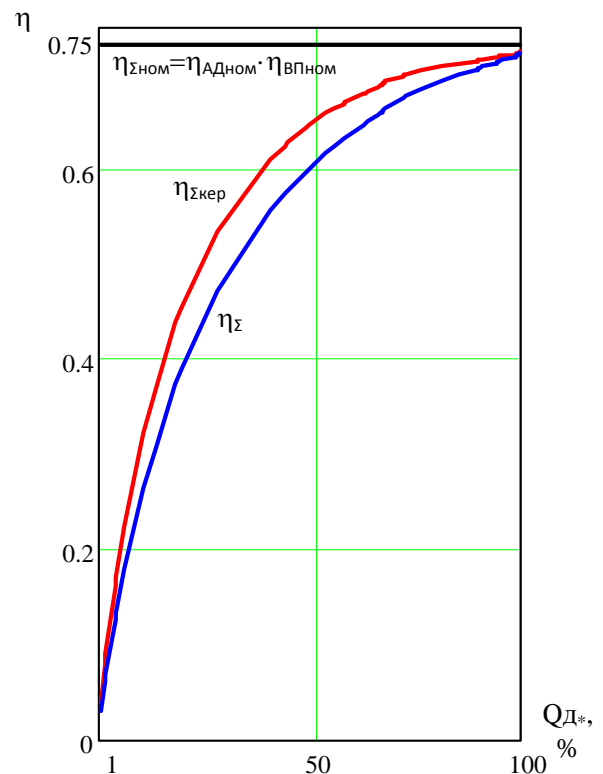


Рис. 4.4 Сумарний коефіцієнт корисної дії агрегату ЕТК

Таким чином, порівняння технологічних показників режиму натурального об'єкта й аналогічних показників, розрахованих за допомогою створеної математичної моделі, показує їхню достатню збіжність. Це доводить адекватність створеної математичної моделі й обґрунтовує можливість її використання для розрахунку усталених режимів довільного ЕТК.

На рис. 4.4 зображено отриманий за допомогою створеної ММ графік залежності сумарного ККД агрегату від відносної витрати рідини. Крім описаних вище залежностей, на рис. 4.1, 4.2 й 4.4 наведені розраховані відповідні залежності за умови застосування частотного керування АД за функцією М. Костенка згідно (2.230).

Створена ММ дозволяє, наприклад, оцінити вплив частотного керування

АД на підвищення сумарного ККД агрегату і зниження питомого споживання ним електроенергії у порівнянні з некерованим агрегатом (рис. 4.5 і 4.6).

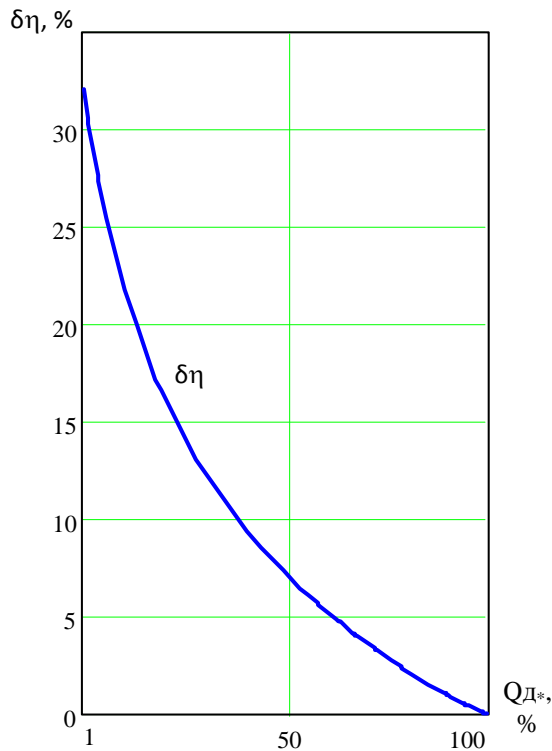


Рис. 4.5 Вплив частотного керування АД на підвищення сумарного ККД агрегату ЕТК

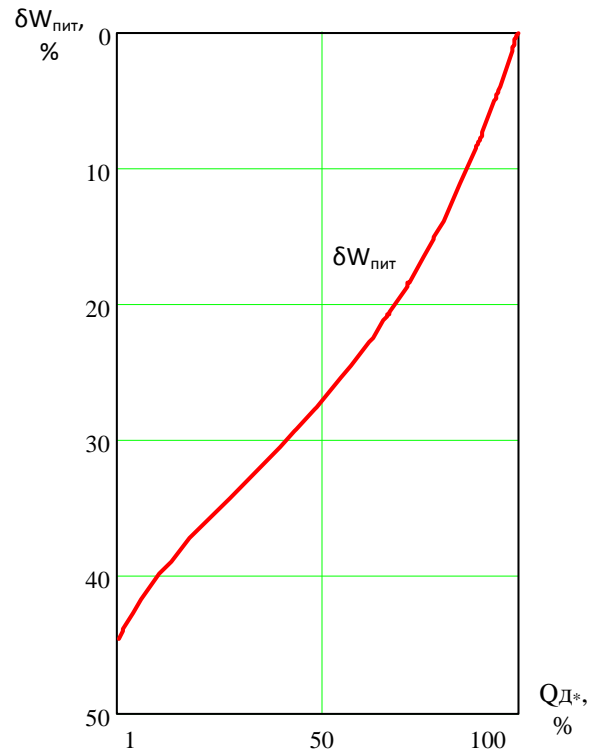


Рис. 4.6 Вплив частотного керування АД на зниження питомого споживання електроенергії

За наявних технологічних значень витрат рідини (див. таблицю 4.2) заощадження електроенергії складатиме 14,1%. Слід зазначити, що отримані результати розрахунків відображають лише прогнозований теоретичний потенціал енергозаощадження ВПТА і не враховують додаткові можливості зниження втрат електроенергії в елементах електропостачальної системи внаслідок підвищення коефіцієнта потужності.

4.2 Реалізація моделі для одиничного блока відцентрового помпового турбоагрегата

Для розрахунків усталених режимів одиничних асинхронного (рис. 4.7) і синхронного (рис. 4.26) БВПТА обрано таку конфігурацію устаткування:

- ПЧН: представлений у загальному вигляді згідно п. 2.2.7 ;
- трансформатор $T_{пч}$: ТСЗ-250/10 (для розрахунку з АД);

- трансформатор $T_{пч}$: ТМ-1600/10 (для розрахунку з СД);
- еквівалентна ємність ПКП1 (для розрахунку з АД): 0,43 мкФ;
- еквівалентна ємність ПКП2 (для розрахунку з АД): 441 мкФ;
- асинхронний двигун (схема, що на рис. 3.1): 4АН355М6У3;
- синхронний двигун СДТП-1600-2УХЛ4;
- відцентрова помпа ПМП: 14 НДсН (для розрахунку з АД);
- відцентрова помпа ПМП: НМ-1250-260 (для розрахунку з СД);
- гідравлічна мережа – згідно (2.93);
- робоча рідина – вода, коефіцієнт кінематичної в'язкості $k_{v*6_1} = 1$.

Паспортні дані зазначеного устаткування та параметри елементів відповідних заступних схем [40, 41, 66, 73, 118, 130, 135, 168, 174, 200] наведено в таблицях 4.7..4.12. Параметри заступних схем трансформаторів зведено до відповідних ВН напруг обвиток ВН.

Таблиця 4.7

Паспортні дані й параметри трансформатора ТСЗ-250/10

$S_{н}$, МВ·А	$U_{вн}$, кВ	$U_{нн}$, кВ	$u_{к}$, %	$P_{к}$, кВт	I_0 , %	P_0 , кВт	$\eta_{н}$	$R_{т*}$, $\cdot 10^{-3}$	$X_{т*}$, $\cdot 10^{-3}$	$G_{т*}$, $\cdot 10^{-3}$	$B_{т*}$, $\cdot 10^{-3}$
0,25	10,5	0,4	5,5	3,8	3,5	1,0	0,98	15,20	52,86	9,07	14,5

Таблиця 4.8

Паспортні дані й параметри трансформатора ТМ-1600/10

$S_{н}$, МВ·А	$U_{вн}$, кВ	$U_{нн}$, кВ	$u_{к}$, %	$P_{к}$, кВт	I_0 , %	P_0 , кВт	$\eta_{н}$	$R_{т*}$, $\cdot 10^{-3}$	$X_{т*}$, $\cdot 10^{-3}$	$G_{т*}$, $\cdot 10^{-3}$	$B_{т*}$, $\cdot 10^{-3}$
1,6	10,0	6,3	5,5	16,5	1,3	3,3	0,99	10,31	54,03	2,06	12,8

Таблиця 4.9

Паспортні дані й параметри відцентрової помпи 14 НДсН

$P_{н}$, кВт	$n_{н}$, об/хв	$H_{дн}$, м	$Q_{дн}$, м ³ /с	$\eta_{н}$	$H_{0н*}$	$r_{\Delta q*}$	$X_{\Delta q*}$
154	980	45	0,35	0,809	1,302	29,47	9,49

Продовження таблиці 4.9

$\Gamma_{\Delta H}^*$	$X_{\Delta H}^*$	X_t^*	$X_{\mu h}^*$	$X_{\mu q}^*$	Γ_M^*	X_M^*
$6,627 \cdot 10^{-4}$	0,4144	0,00876	0,0352	0,2375	7,180	0,02287

Таблиця 4.10

Паспортні дані й параметри відцентрової помпи НМ-1250-260

P_H , кВт	n_H , об/хв	$H_{ДН}$, м	$Q_{ДН}$, м ³ /с	η_H	H_{0H}^*	$r_{\Delta q}^*$	$X_{\Delta q}^*$
1107	3000	260	0,3472	0,80	1,387	24,95	11,60

Продовження таблиці 4.10

$\Gamma_{\Delta H}^*$	$X_{\Delta H}^*$	X_t^*	$X_{\mu h}^*$	$X_{\mu q}^*$	Γ_M^*	X_M^*
$5,07 \cdot 10^{-3}$	0,440	0,059	0,003	0,256	10,835	0,2497

Таблиця 4.11

Паспортні дані й параметри асинхронного двигуна 4АН355М6У3

P_H , кВт	U_H , кВ	$k_{M\max}$	$k_{M\min}$	$k_{Mп}$	$k_{iп}$	$\cos(\varphi)_H$	n_H , об/хв	η_H	p_0
250	0,38	2,2	0,9	1,4	7	0,9	985	0,935	3

Продовження таблиці 4.11

R_s^*	X_s^*	R_{r1}^*	X_{r1}^*	R_{r2}^*	X_{r2}^*	I_{mn}^*	R_a^*
0,0277	0,1274	0,0543	0,4459	0,0217	0,1784	0,2544	52,5

Таблиця 4.12

Паспортні дані й параметри синхронного двигуна СДТП-1600-2УХЛ4

P_H , кВт	U_H , кВ	$k_{M\max}$	$k_{M\delta=0,05}$	$k_{Mп}$	$k_{iп}$	$\cos\varphi_H$	n_H , об/хв	η_H
1600	6,0	2,37	1,37	2,16	6,79	0,9	3000	0,935

Продовження таблиці 4.12

$U_{фн}$, В	$I_{фн}$, А	X_{ad}^*	R_s^*	X_s^*	X_{aq}^*	I_{mn}^*	R_a^*
52	276	1,25	0,02	0,12	0,5	0,774	58,3

4.2.1 Розрахунок режимів асинхронного агрегата

Зважаючи на те, що поєднання розглянутих у п. 2.2.1 дроселювання, байпасування та в п. 2.3.3 сімох різних частотних способів керування витратою агрегату разом з випадком некерованого режиму потребує викладу $3+7\cdot 3+1=25$ варіантів розрахунку, вбачається доцільним навести лише 2 варіанти, які передбачають:

- відсутність керування витратою агрегату (напір агрегату залежить лише від його витрати, яка визначається параметрами ГМ);
- 1 спосіб частотного керування витратою агрегату за умови підтримання сталого напору агрегату.

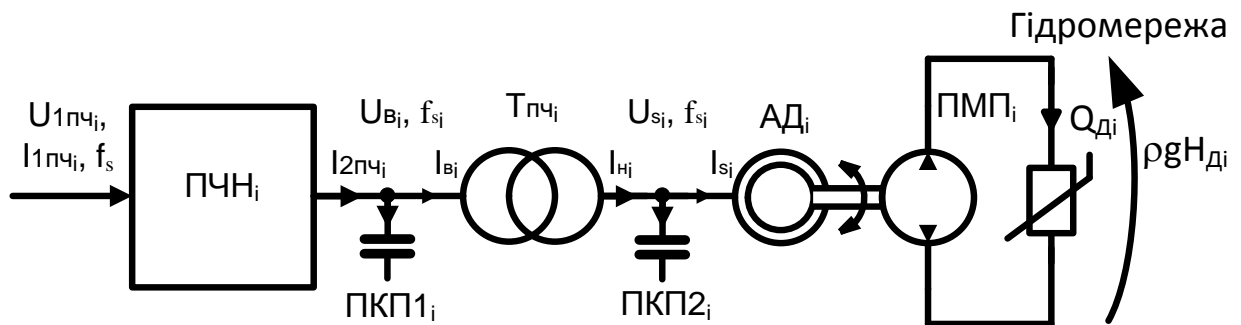


Рис. 4.7 Схема для розрахунку режимів одиничного асинхронного БВПТА

На рис. 4.8..4.25 наведено результати цих розрахунків у вигляді залежностей основних координат усталених режимів агрегату від витрати робочої рідини на вході гідромережі.

4.2.1.1 Розрахунок режимів некерованого агрегата

Наведено результати розрахунку некерованого агрегату, який здійснювався для розділеного на 50 однакових інтервалів діапазону витрати робочої рідини на вході гідромережі в межах $Q_{д*}=0,000..2,427$ (рис. 4.8.. 4.15). Отримана напірно-витратна характеристика ВП відрізняється від паспортної, оскільки номінальна швидкість обертання ротора АД дещо перевищує номінальне значення для ВП і спільного вала не є сталою.

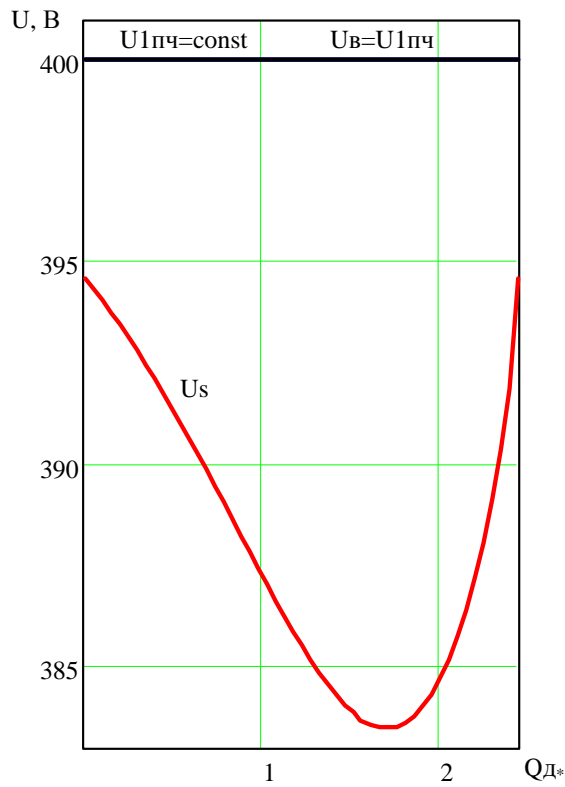


Рис. 4.8 Напруги вузлів схеми, що на рис. 4.7

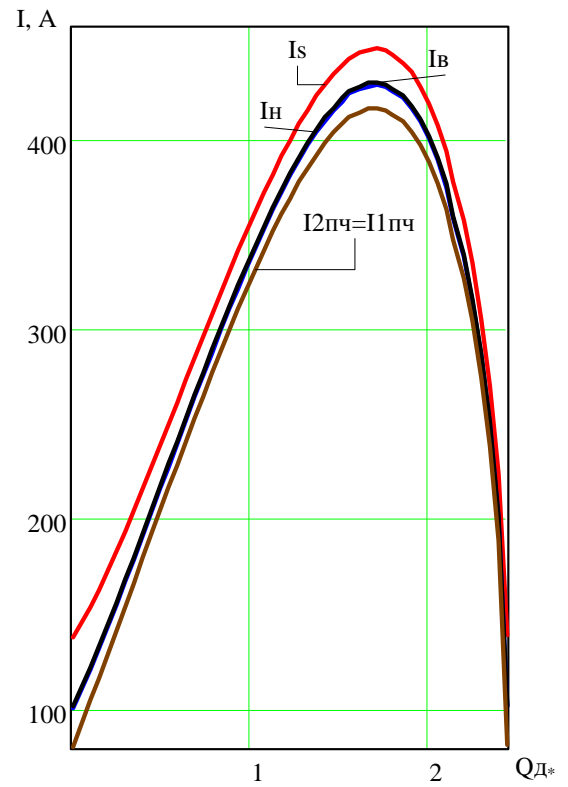


Рис. 4.9 Струми віток схеми, що на рис. 4.7

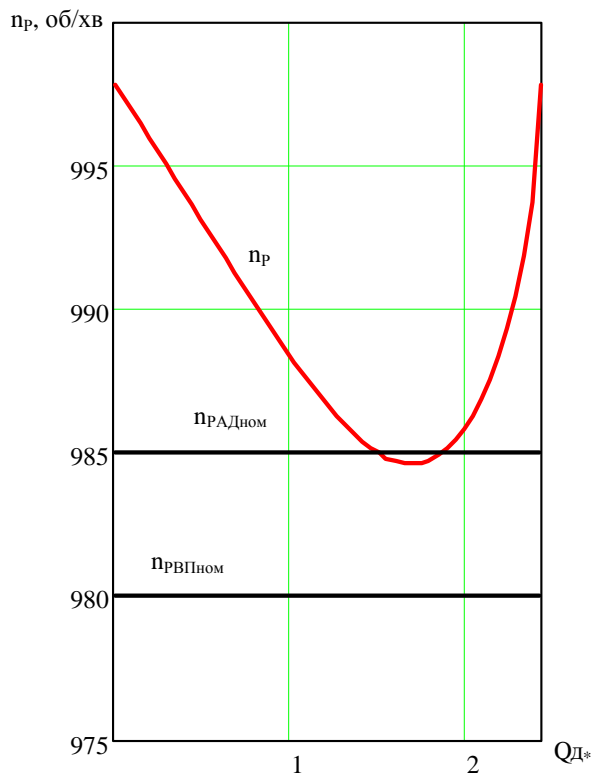


Рис. 4.10 Частота обертання спільного вала АД-ВП

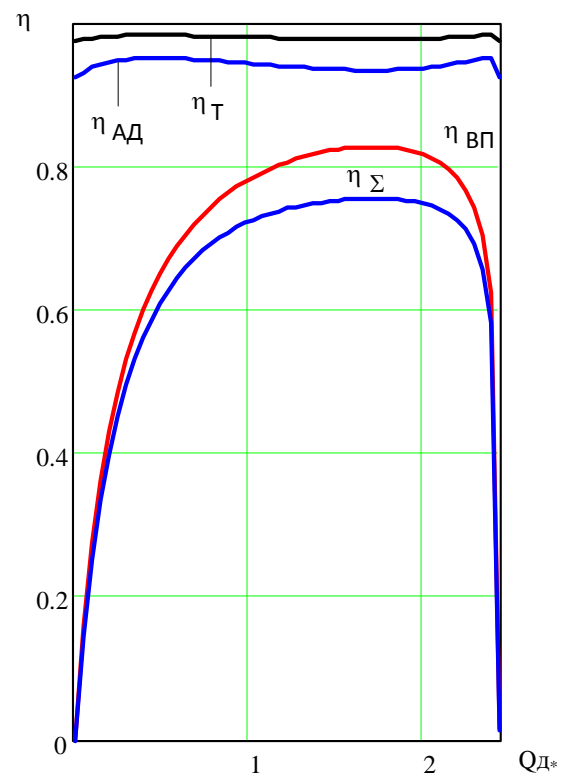


Рис. 4.11 Коефіцієнти корисної дії: АД, ВП, $T_{пч}$ і загальний

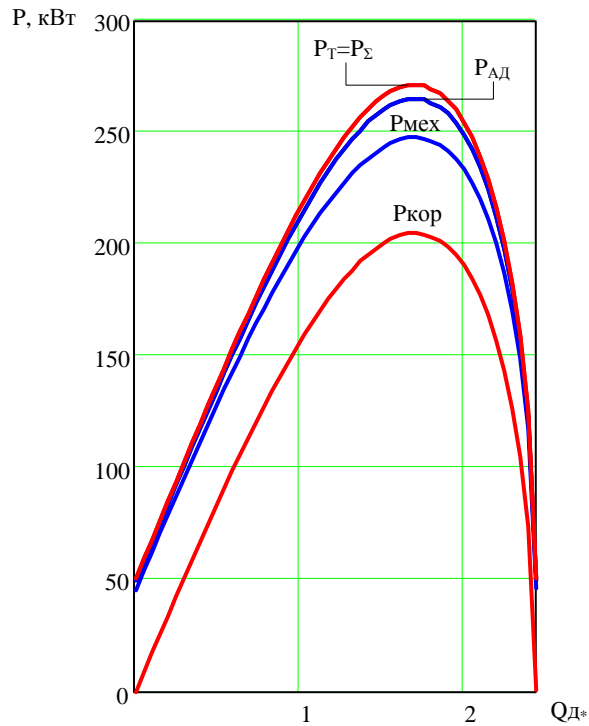


Рис. 4.12 Механічні та активні електричні потужності (згідно рис. 4.7)

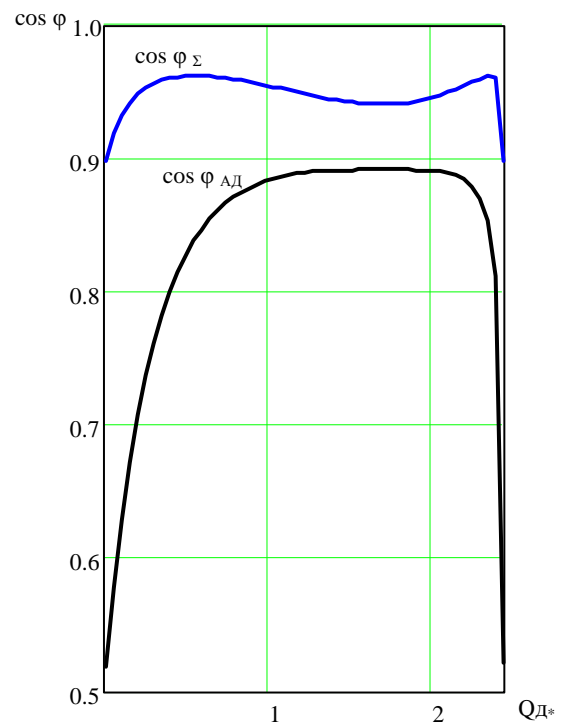


Рис. 4.13 Коефіцієнти потужності: в місці приєднання АД і загальний

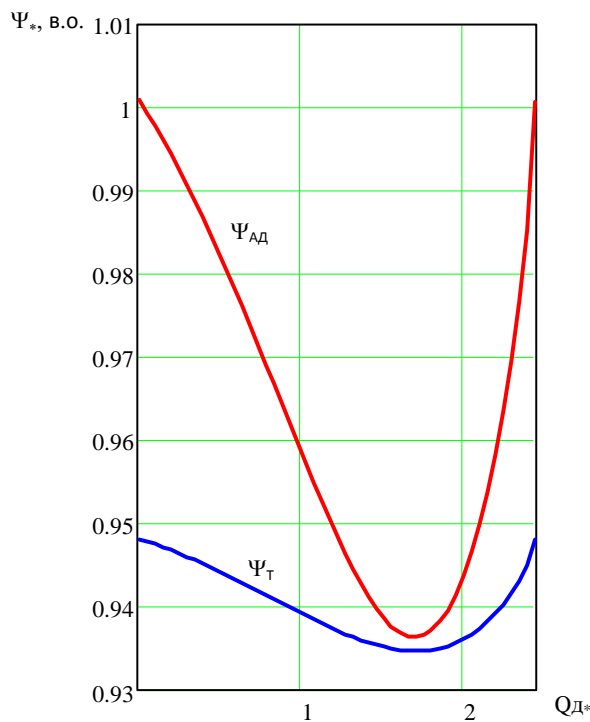


Рис. 4.14 Відносні потокозчеплення АД і $T_{пч}$

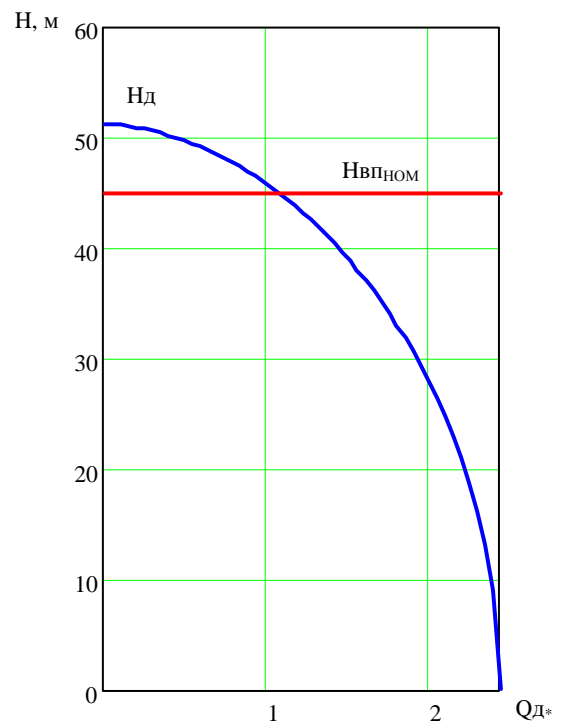


Рис. 4.15 Напір помпи

Відсутність керування витратою агрегату (напір агрегату залежить лише від його витрати) визначає роботу відцентрової помпи за її паспортною напірно-витратною характеристикою.

4.2.1.2 Розрахунок режимів за умови частотного керування двигуном

Для розрахунку режимів частотно керованого агрегату обрано керування напругою й частотою напруги на затискачах обвитки статора АД шляхом оптимізації ковзання з мінімізацією споживаної АД активної потужності (2.236). Розрахунок здійснювався для розділеного на 50 однакових інтервалів діапазону витрати робочої рідини на вході ГМ в межах $Q_{д*}=0,000..1,200$. ГМ задана у вигляді сталого, (незалежного від витрати рідини) напору:

$$H_d(Q_d) - 1 = 0.$$

На рис. 4.16..4.19 наведено залежності частини основних координат ustalених режимів агрегату від витрати робочої рідини на вході гідромережі. З метою порівняння керованого режиму з некерованим на рис. 4.22..4.25 наведені залежності решти координат від витрати робочої рідини одночасно для двох режимів.

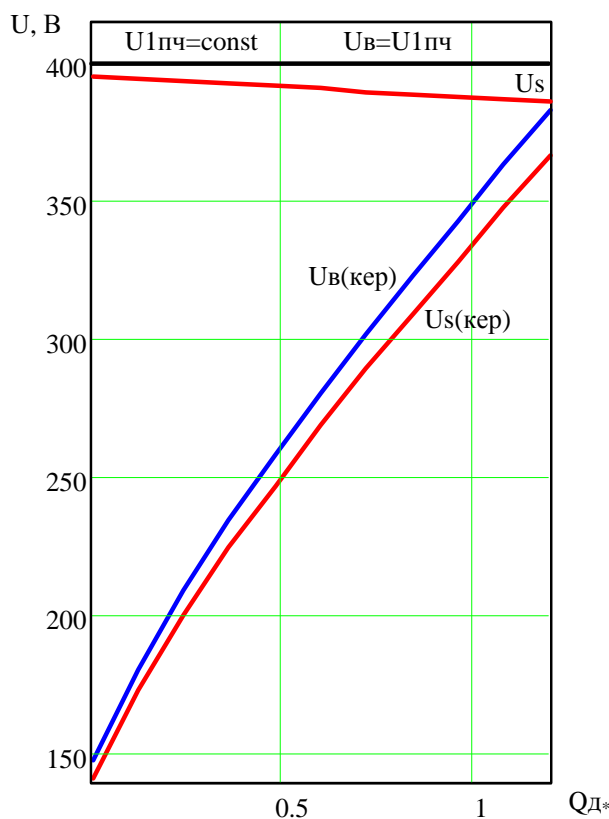


Рис. 4.16 Напруги вузлів схеми, що на рис. 4.7

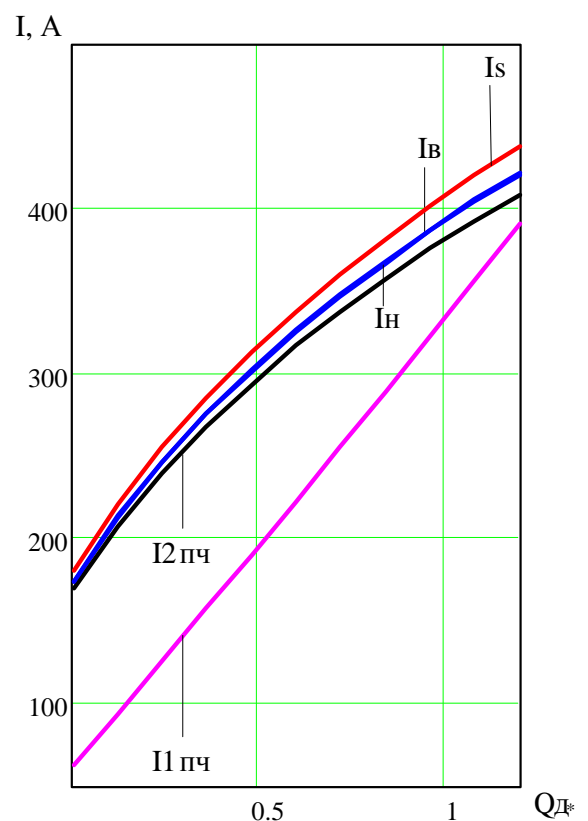


Рис. 4.17 Струми віток схеми, що на рис. 4.7

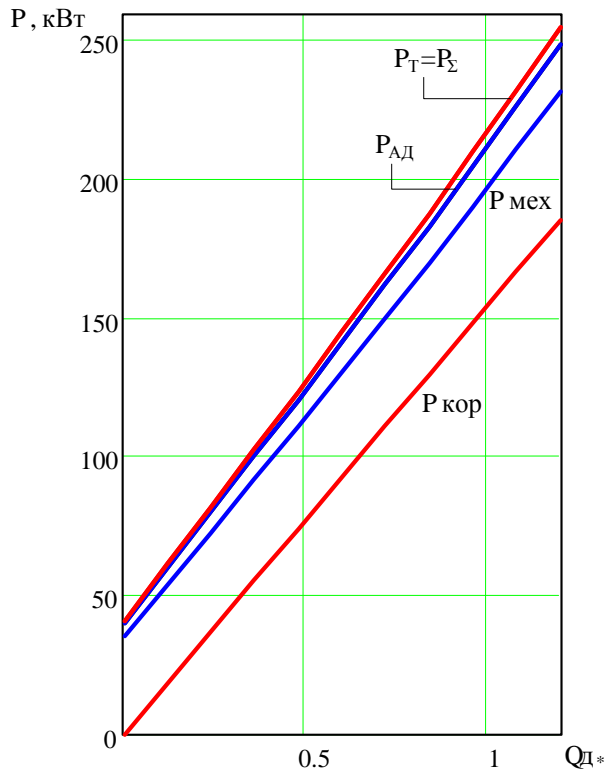


Рис. 4.18 Механічні та активні електричні потужності (згідно рис. 4.7)

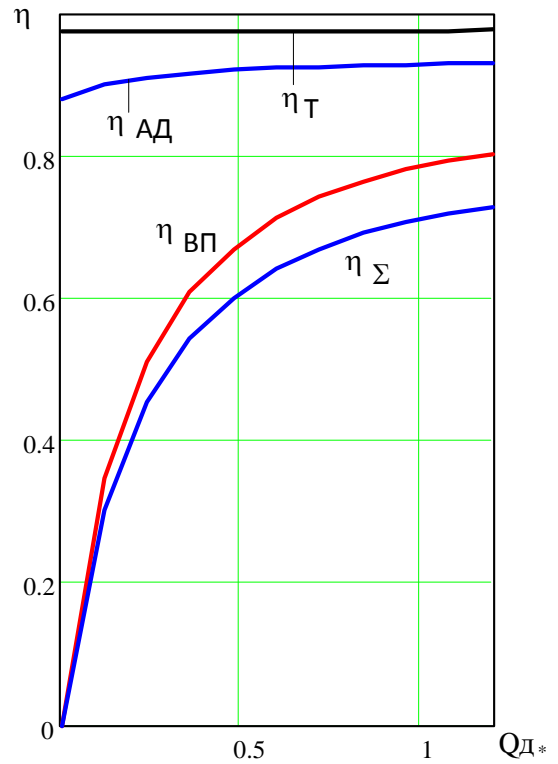


Рис. 4.19 Коефіцієнти корисної дії: АД, ВП, $T_{пч}$ і загальний

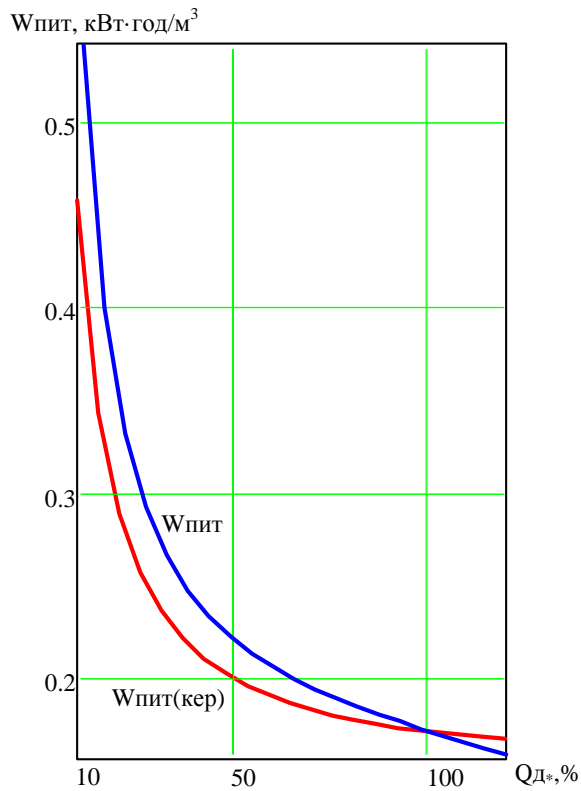


Рис. 4.20 Питомі витрати активної електроенергії агрегату ($H_{ном}=45$ м)

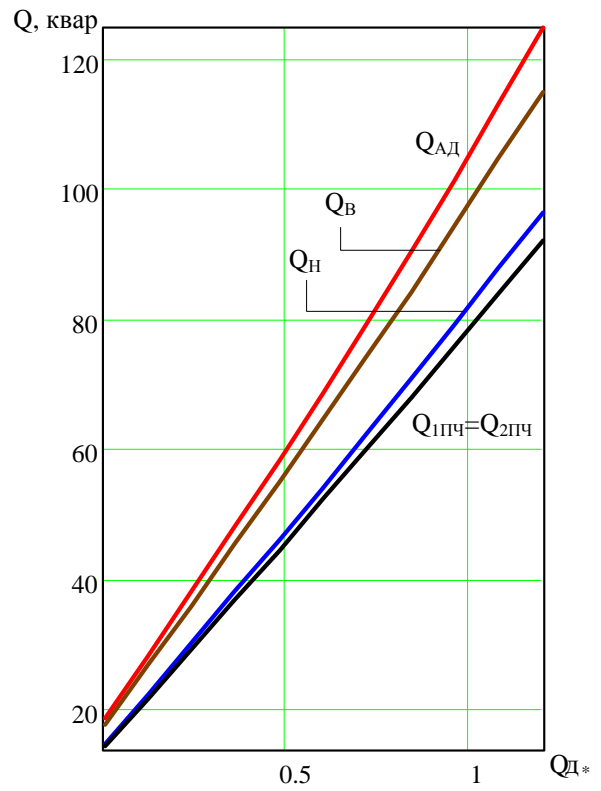


Рис. 4.21 Реактивні потужності (згідно рис. 4.7)

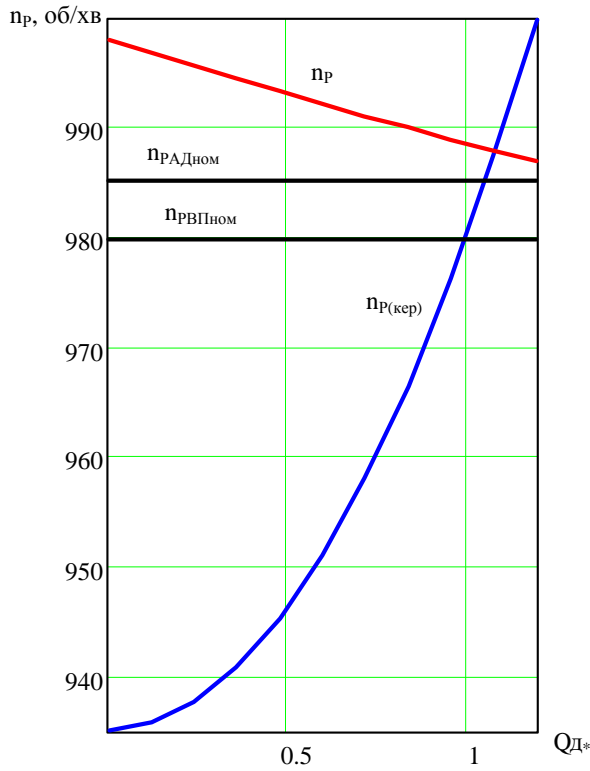


Рис. 4.22 Частота обертання
спільного вала АД-ВП

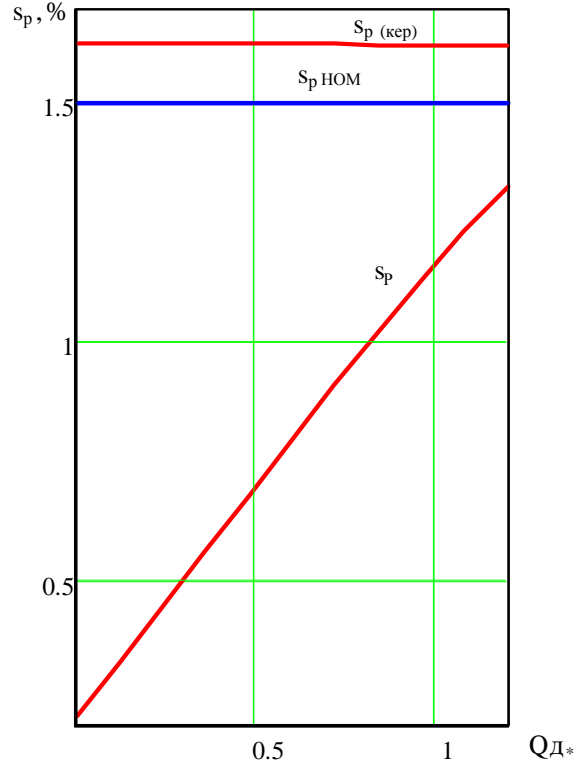


Рис. 4.23 Ковзання ротора АД

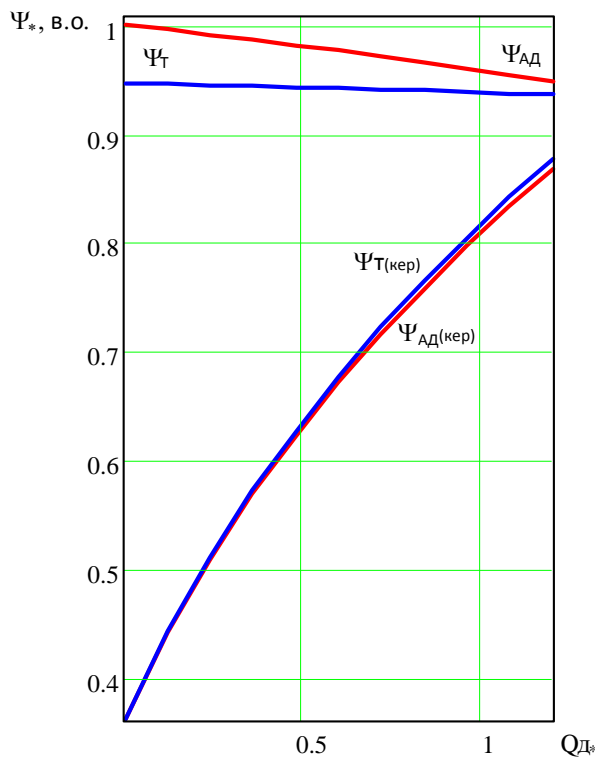


Рис. 4.24 Відносні потокозчеплення
АД і Т_{пч}

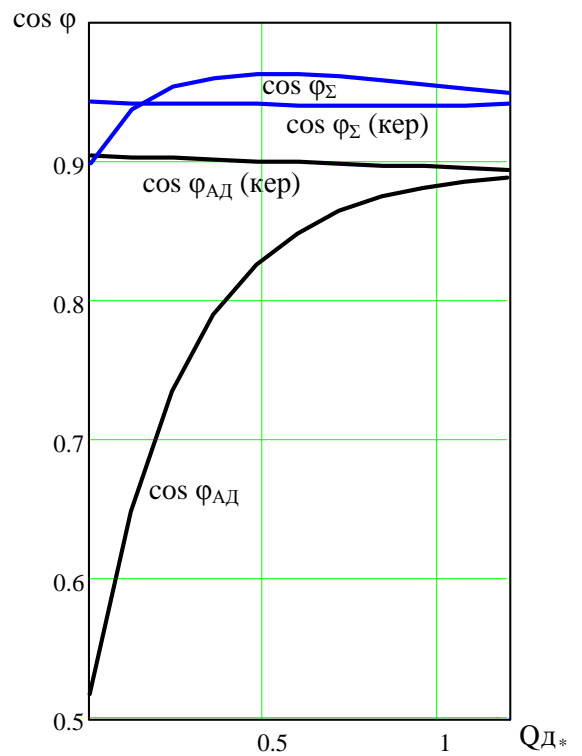


Рис. 4.25 Коефіцієнти потужності:
в місці приєднання АД і загальний

4.2.2 Розрахунок режимів синхронного агрегата

Поєднання розглянутих у п. 2.2.1 дроселювання, байпасування та в п. 2.3.3 трьох різних способів частотного керування витратою ВПТА разом з випадком некерованого режиму потребує викладу $3+3\cdot 3+1=10$ варіантів розрахунку. Крім того, як зазначено в п. 2.2.1, застосування дроселя та байпаса лише змінює умови функціонування ВП. З огляду на це вбачається доцільним навести лише 2 варіанти, які передбачають:

- відсутність керування витратою ВПТА (напір агрегату залежить від його витрати, яка визначається параметрами ГМ);
- 1 спосіб частотного керування витратою ВПТА за умови підтримання сталого напору.

Оскільки застосування СД дає можливість керувати реактивною потужністю шляхом зміни струму збудження, задаємо нульові значення еквівалентних ємностей ПКП1і ПКП2 для цього випадку.

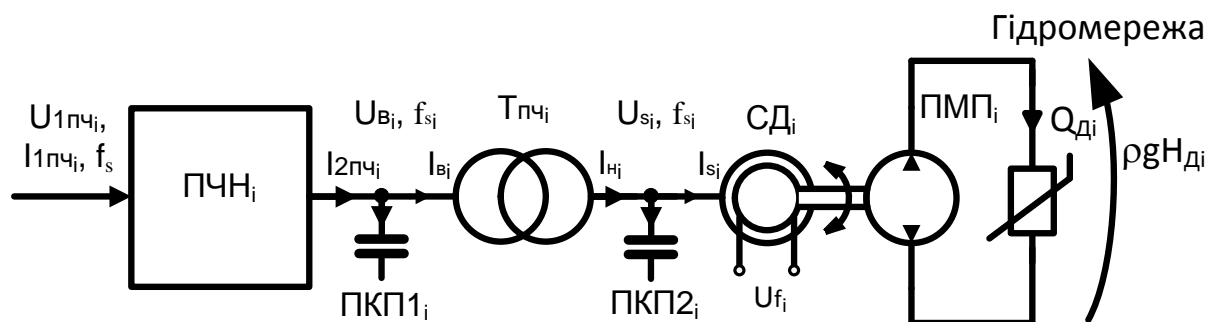


Рис. 4.26 Схема для розрахунку режимів одиничного синхронного БВПТА

На рис. 4.27..4.42 наведено результати цих розрахунків у вигляді залежностей основних координат ustalених режимів агрегату від витрати робочої рідини на вході гідромережі.

4.2.2.1 Розрахунок режимів некерованого агрегата

Наведено результати розрахунку некерованого агрегату, який здійснювався для розділеного на 50 однакових інтервалів діапазону витрати робочої рідини на вході гідромережі в межах $Q_{д*}=0,000..2,273$ (рис. 4.27..4.32).

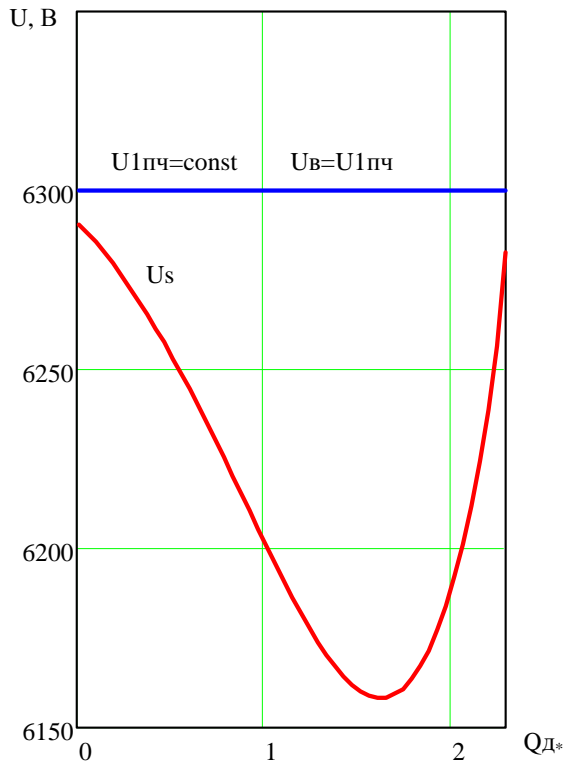


Рис. 4.27 Напруги вузлів схеми,
що на рис. 4.26

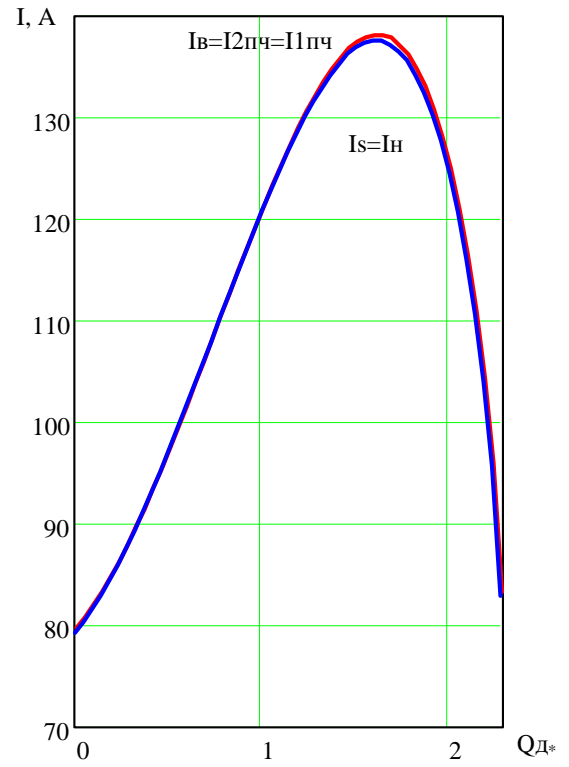


Рис. 4.28 Струми віток схеми,
що на рис. 4.26

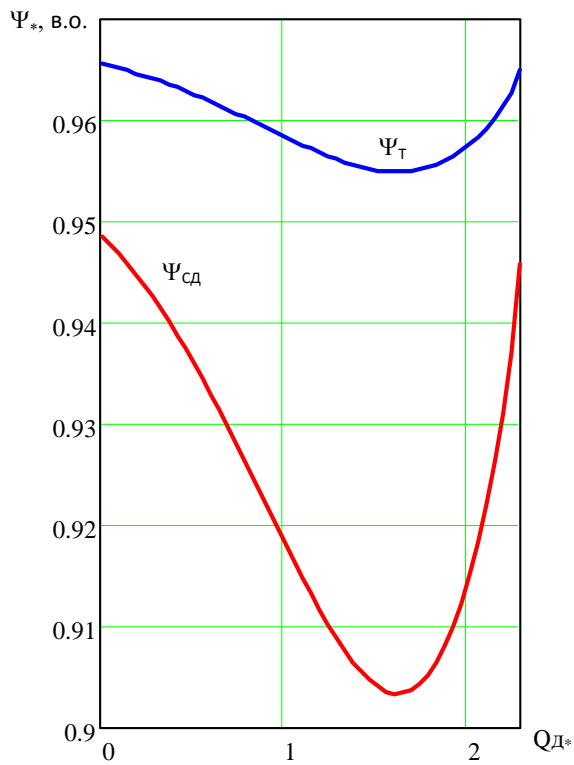


Рис. 4.29 Відносні потокозчеплення
СД і $T_{пч}$

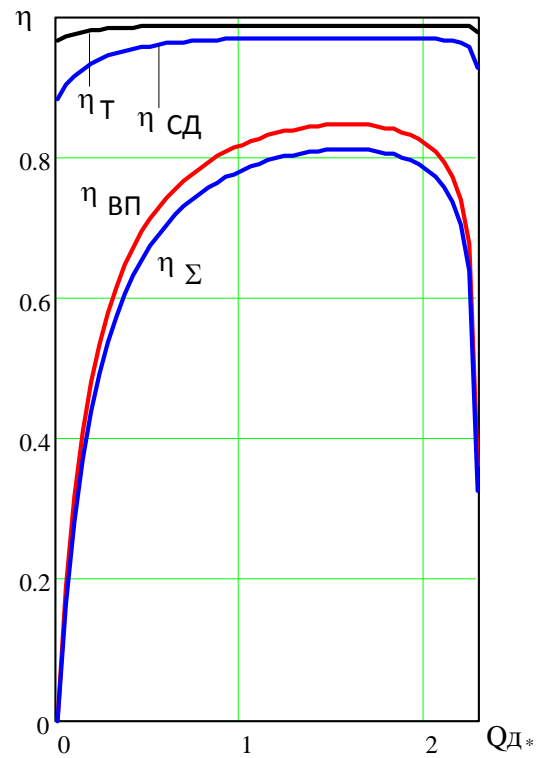


Рис. 4.30 Коефіцієнти корисної дії:
СД, ВП, $T_{пч}$ і загальний

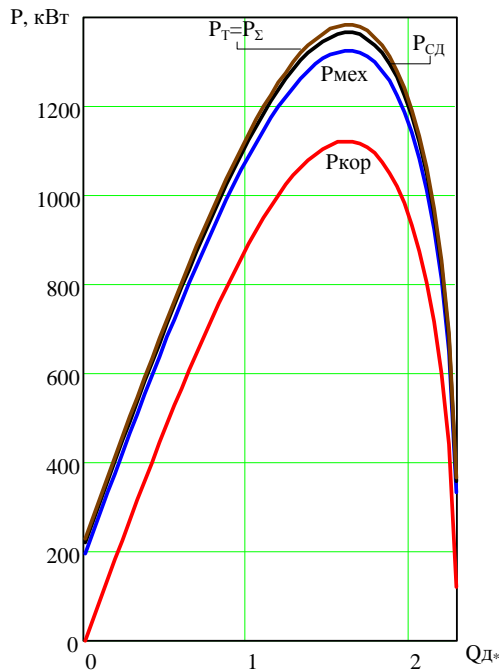


Рис. 4.31 Механічні та активні електричні потужності (згідно рис. 4.26)

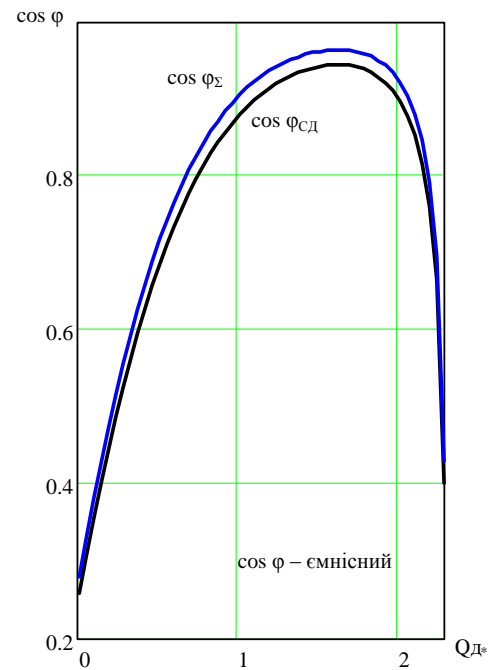


Рис. 4.32 Коефіцієнти потужності: в місці приєднання СД і загальний

Відсутність керування витратою агрегату (напір агрегату залежить лише від його витрати) визначає роботу відцентрової помпи за її паспортною напірно-витратною характеристикою.

4.2.2.2 Розрахунок режимів за умови частотного керування двигуном

Для розрахунку режимів частотно керованого агрегату обрано керування напругою й частотою напруги на затискачах обвитки статора СД за шляхом підтримання номінального значення потокозчеплення від магнітного потоку повітряного проміжку за умови ортогональності зображальних векторів цього потокозчеплення та струму якоря (2.243), (2.244). Розрахунок здійснювався для розділеного на 50 однакових інтервалів діапазону витрати робочої рідини на вході ГМ в межах $Q_{д*}=0,000..1,200$. Гідромережа задана у вигляді сталого, (незалежного від витрати рідини) напору:

$$H_{д} - 1 = 0.$$

На рис. 4.33..4.42 наведено залежності основних координат усталених режимів агрегату від витрати робочої рідини на вході гідромережі. З метою порівняння керованого режиму з некерованим на рис.4.37, 4.38 наведені залежності одночасно для двох режимів.

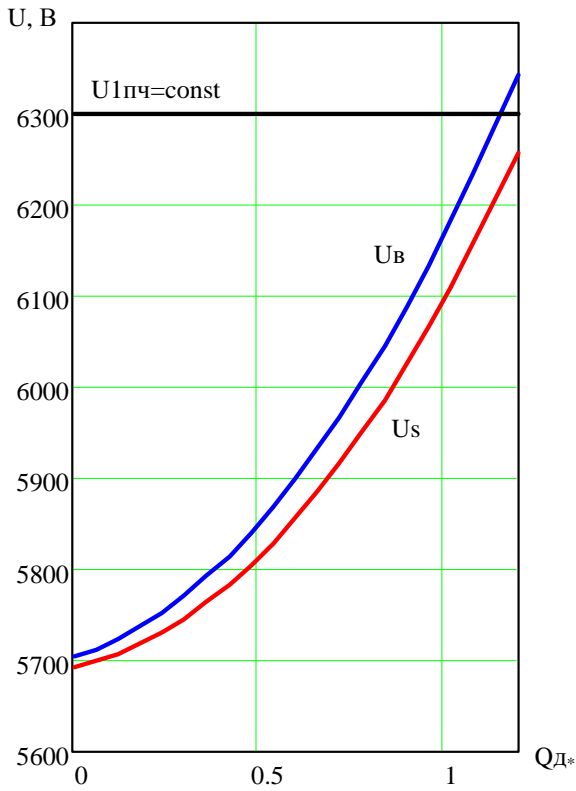


Рис. 4.33 Напруги вузлів схеми, що на рис. 4.26

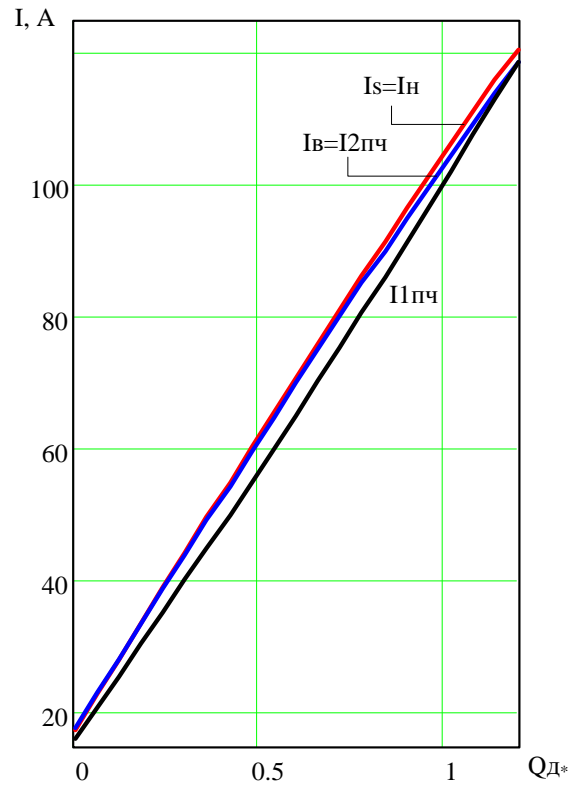


Рис. 4.34 Струми віток схеми, що на рис. 4.26

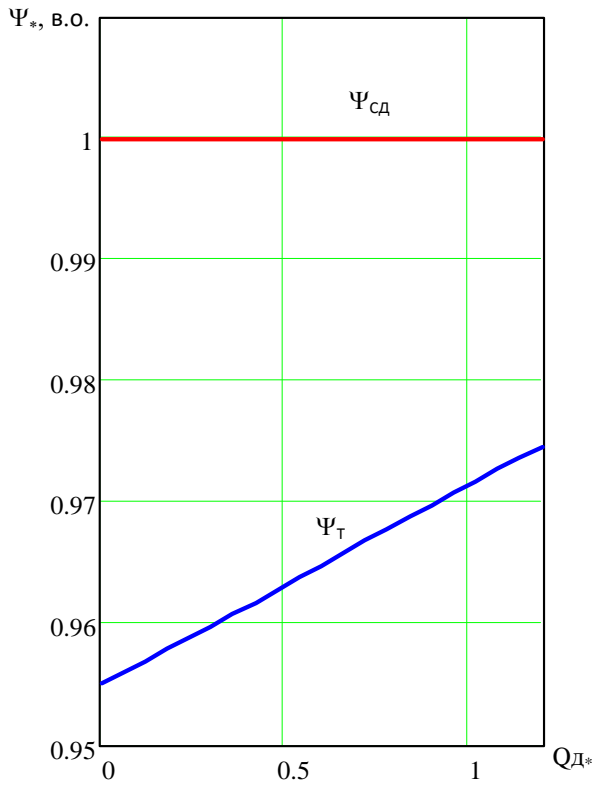


Рис. 4.35 Відносні потокозчеплення СД і $T_{пч}$

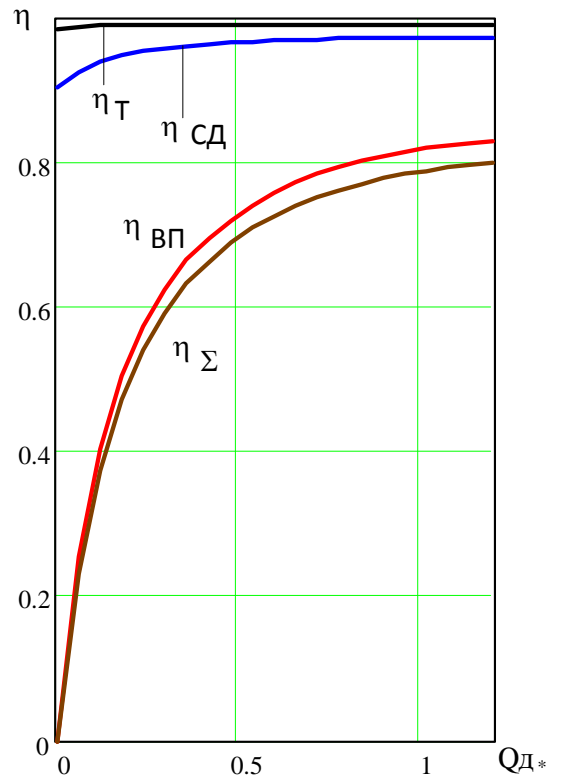


Рис. 4.36 Коефіцієнти корисної дії СД, ВП, $T_{пч}$ і загальний

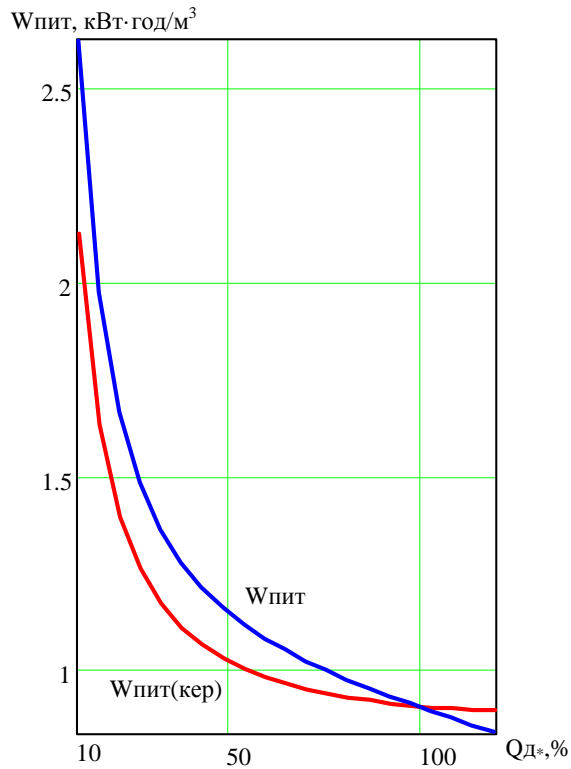


Рис. 4.37 Питомі витрати активної електроенергії агрегату ($H_{\text{ном}}=260$ м)

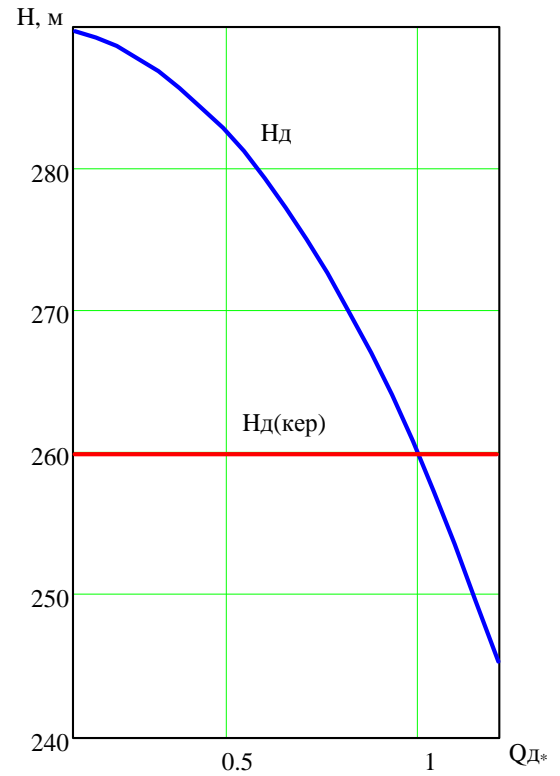


Рис. 4.38 Напір помпи

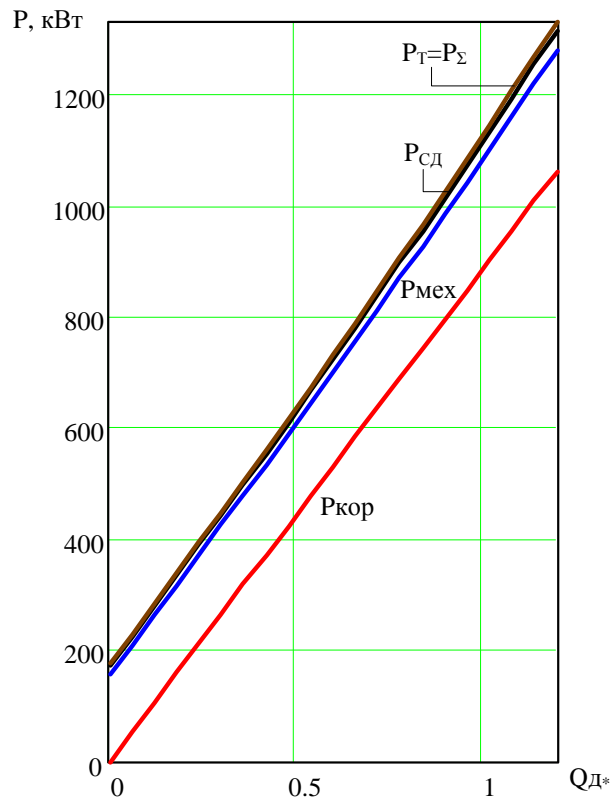


Рис. 4.39 Механічні та активні електричні потужності (згідно рис. 4.26)

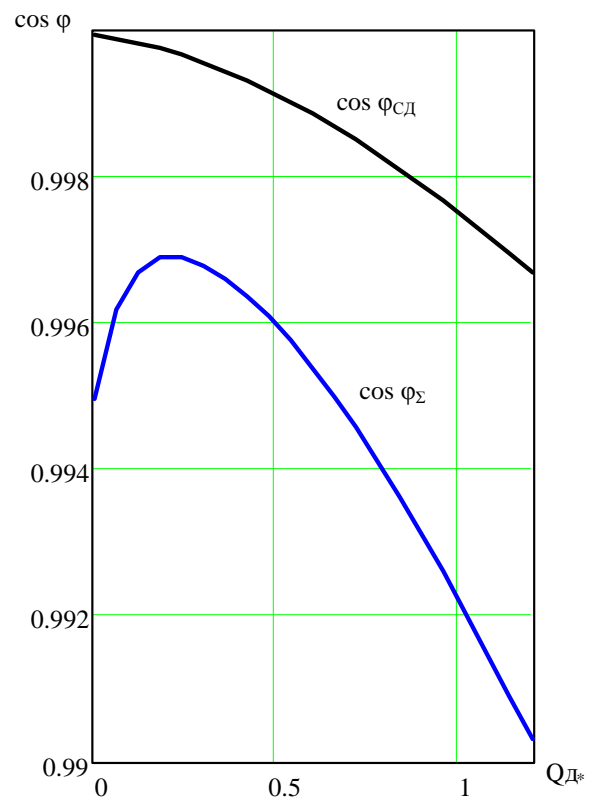


Рис. 4.40 Коефіцієнти потужності: в місці приєднання СД і загальний

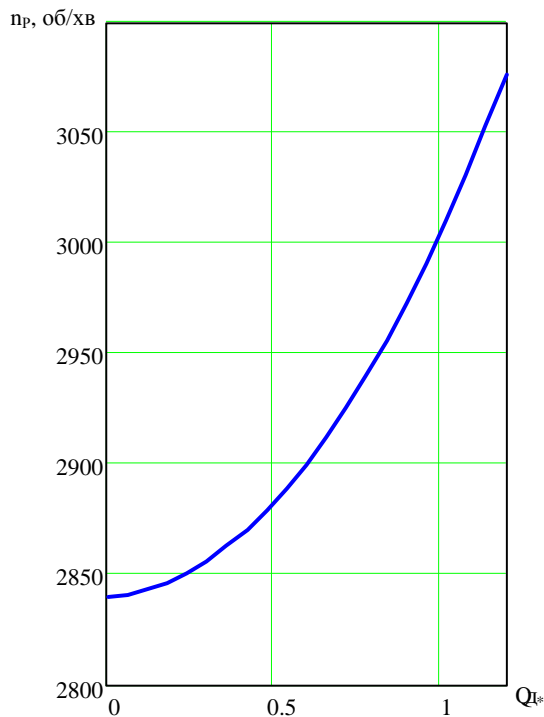


Рис. 4.41 Частоти: напруги обвитки статора й обертання спільного вала

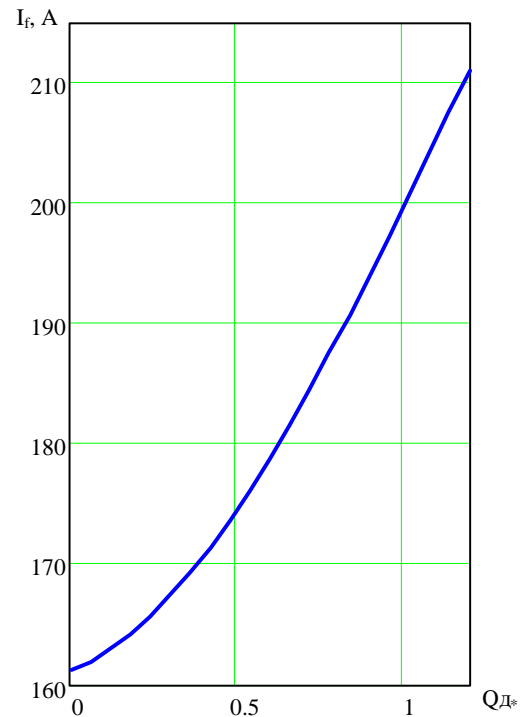


Рис. 4.42 Струм обвитки збудження СД

4.3 Реалізація моделі для багатоагрегатного електротехнічного комплексу

Запропонований принцип побудови математичної моделі може бути застосований для аналізу усталених режимів електропостачальних систем довільної помпової станції [112, 111].

Для розрахунку обрано приклад ЕТК, що на рис. 4.43, з такою нумерацією ВПТА: $j=1,2,\dots,12$. Дві окремі групи асинхронних ВПТА здійснюють забір робочої рідини зі спільного джерела: $Q_{\partial\Sigma} = Q_{\partial 1} + Q_{\partial 2}$, але постачають рідину в дві різні гідравлічні мережі. Розподіл рідини між ВПТА здійснюється таким чином, щоб гідравлічні координати режиму жодної з ВП не перевищували номінальних з урахуванням розбіжності їхніх однотипних номінальних параметрів. Послідовно працюють підпірні й основні ВПТА. Необхідність застосування підпірних ВПТА зумовлена тим, що основні ВПТА високого тиску потребують для стійкої та безаварійної роботи створення стабільного додаткового тиску на вході. В якості підпірних застосовують ВПТА значно меншої потужності, ніж основні.

Електроживлення кожного ВПТА здійснюється окремого ПЧН. Електроживлення всієї ПС забезпечується від ЕЕС через повітряну ЛЕП.

На підставі даних про кількість рівнянь і невідомих, отриманих у п. 3.2, отримуємо систему $N_{P.ПС}=38n_{AD}+36n_{CD}+26\cdot 12+26=794$ рівнянь з $N_{H.ПС}=38n_{AD}+36n_{CD}+26\cdot 12+27=795$ невідомими ($n_{AD}=12$, $n_{CD}=0$). З урахуванням фактичного складу обладнання згідно рис. 4.43 вилучаються 185 рівнянь з 185 невідомими, а саме: $3\cdot(2y+1)=75$ рівнянь статичного навантаження, $2\cdot(2y+1)=50$ рівнянь пристроїв компенсації реактивної потужності, $4y=48$ рівнянь кабельних ЛЕП, $6\cdot 2=12$ рівнянь трансформаторів ($y=12$). Остаточо отримуємо систему $N_{P.ПС}=794-177=609$ рівнянь з $N_{H.ПС}=795-177=610$ невідомими.

Функції керування напором $F_{H_k}(\mathbf{p}_H)$ і витратою $F_{Q_j}(\mathbf{p}_Q)$ ВП j -го агрегату задано у вигляді сталих (2.197), (2.198) коефіцієнтів $k_{роз.H_j}$, $k_{роз.Q_j}$ розподілу напорів і витрат. Їхні числові значення наведено в таблиці 4.13.

Далі наведені $2\cdot 12=24$ рівнянь гідравлічних зв'язків багатоагрегатної групи ВПТА і гідромережі та керування розподілом витрат і напорів робочої рідини, які є специфічними для кожної конкретної схеми сполучень гідротрактів pomp. Інші рівняння ММ усталених режимів ЕТК, що на рис. 4.43, не наводяться.

Зв'язок між гідромережею групою агрегатів за витратою (2.218):

$$k_{Q.ВП_1} Q_{д_1} + k_{Q.ВП_2} Q_{д_2} - k_{роз.Q_1}^* k_{Q.ГМ1} Q_{д\Sigma} = 0 \text{ – для 1-ї підгрупи;}$$

$$k_{Q.ВП_6} Q_{д_6} + k_{Q.ВП_7} Q_{д_7} + k_{Q.ВП_8} Q_{д_8} - k_{роз.Q_2}^* k_{Q.ГМ2} Q_{д\Sigma} = 0 \text{ – для 2-ї підгрупи.}$$

Зв'язок між гідромережею та групою агрегатів за напором (2.220):

$$k_{H.ВП_1} H_{д_1} + k_{H.ВП_3} H_{д_3} - H_{ст1} - k_{H.ГМ1} H_1 (k_{роз.Q_1}^* Q_{д\Sigma}) = 0 \text{ – для 1-ї підгрупи;}$$

$$k_{H.ВП_6} H_{д_6} + k_{H.ВП_9} H_{д_{j,9}} - H_{ст2} - k_{H.ГМ2} H_2 (k_{роз.Q_2}^* Q_{д\Sigma}) = 0 \text{ – для 2-ї підгрупи.}$$

Рівняння розподілу витрат між агрегатами 1-ї підгрупи (2.220):

$$k_{Q.ВП_1} Q_{д_1} - k_{роз.Q_1} k_{роз.Q_1}^* k_{Q.ГМ1} Q_{д\Sigma} = 0 \text{ – для 1-ї підгрупи;}$$

$$k_{Q.ВП_3} Q_{д_3} - k_{роз.Q_3} k_{роз.Q_3}^* k_{Q.ГМ1} Q_{д\Sigma} = 0 \text{ – для 1-ї підгрупи;}$$

$$k_{Q,ВП_4} Q_{д4} - k_{роз.Q_4} k_{роз.Q_1}^* k_{Q,ГМ1} Q_{д\Sigma} = 0 \text{ – для 1-ї підгрупи.}$$

$$k_{Q,ВП_6} Q_{д6} - k_{роз.Q_6} k_{роз.Q_2}^* k_{Q,ГМ2} Q_{д\Sigma} = 0 \text{ – для 2-ї підгрупи;}$$

$$k_{Q,ВП_7} Q_{д7} - k_{роз.Q_7} k_{роз.Q_2}^* k_{Q,ГМ2} Q_{д\Sigma} = 0 \text{ – для 2-ї підгрупи;}$$

$$k_{Q,ВП_9} Q_{д9} - k_{роз.Q_9} k_{роз.Q_2}^* k_{Q,ГМ2} Q_{д\Sigma} = 0 \text{ – для 2-ї підгрупи;}$$

$$k_{Q,ВП_{10}} Q_{д10} - k_{роз.Q_{10}} k_{роз.Q_2}^* k_{Q,ГМ2} Q_{д\Sigma} = 0 \text{ – для 2-ї підгрупи;}$$

$$k_{Q,ВП_{11}} Q_{д11} - k_{роз.Q_{11}} k_{роз.Q_2}^* k_{Q,ГМ2} Q_{д\Sigma} = 0 \text{ – для 2-ї підгрупи.}$$

Рівняння розподілу напорів між агрегатами (2.221):

$$k_{H,ВП_1} H_{д1} - k_{роз.H_1} k_{H,ГМ1} H_1 (k_{роз.Q_1}^* Q_{д\Sigma}) = 0 \text{ – для 1-ї підгрупи;}$$

$$k_{H,ВП_6} H_{д6} - k_{роз.H_6} k_{H,ГМ2} H_2 (k_{роз.Q_2}^* Q_{д\Sigma}) = 0 \text{ – для 2-ї підгрупи.}$$

Баланс витрат послідовно сполучених гідротрактами агрегатів (2.222):

$$(k_{Q,ВП_1} Q_{д1} + k_{Q,ВП_2} Q_{д2}) -$$

$$-(k_{Q,ВП_3} Q_{д3} + k_{Q,ВП_4} Q_{д4} + k_{Q,ВП_5} Q_{д5}) = 0 \text{ – для 1-ї підгрупи;}$$

$$(k_{Q,ВП_6} Q_{д6} + k_{Q,ВП_7} Q_{д7} + k_{Q,ВП_8} Q_{д8}) -$$

$$-(k_{Q,ВП_9} Q_{д9} + k_{Q,ВП_{10}} Q_{д10} + k_{Q,ВП_{11}} Q_{д11} + k_{Q,ВП_{12}} Q_{д12}) = 0 \text{ – для 2-ї підгрупи.}$$

Баланс напорів паралельно сполучених гідротрактами агрегатів (2.223):

$$k_{H,ВП_1} H_{д1} - k_{H,ВП_2} H_{д2} = 0 \text{ – для 1-ї підгрупи;}$$

$$k_{H,ВП_3} H_{д3} - k_{H,ВП_4} H_{д4} = 0 \text{ – для 1-ї підгрупи;}$$

$$k_{H,ВП_4} H_{д4} - k_{H,ВП_5} H_{д5} = 0 \text{ – для 1-ї підгрупи}$$

$$k_{H,ВП_6} H_{д6} - k_{H,ВП_7} H_{д7} = 0 \text{ – для 2-ї підгрупи;}$$

$$k_{H,ВП_7} H_{д7} - k_{H,ВП_8} H_{д8} = 0 \text{ – для 2-ї підгрупи;}$$

$$k_{H,ВП_9} H_{д9} - k_{H,ВП_{10}} H_{д10} = 0 \text{ – для 2-ї підгрупи;}$$

$$k_{H,ВП_{10}} H_{д10} - k_{H,ВП_{11}} H_{д11} = 0 \text{ – для 2-ї підгрупи;}$$

$$k_{H,ВП_{11}} H_{д11} - k_{H,ВП_{12}} H_{д12} = 0 \text{ – для 2-ї підгрупи.}$$

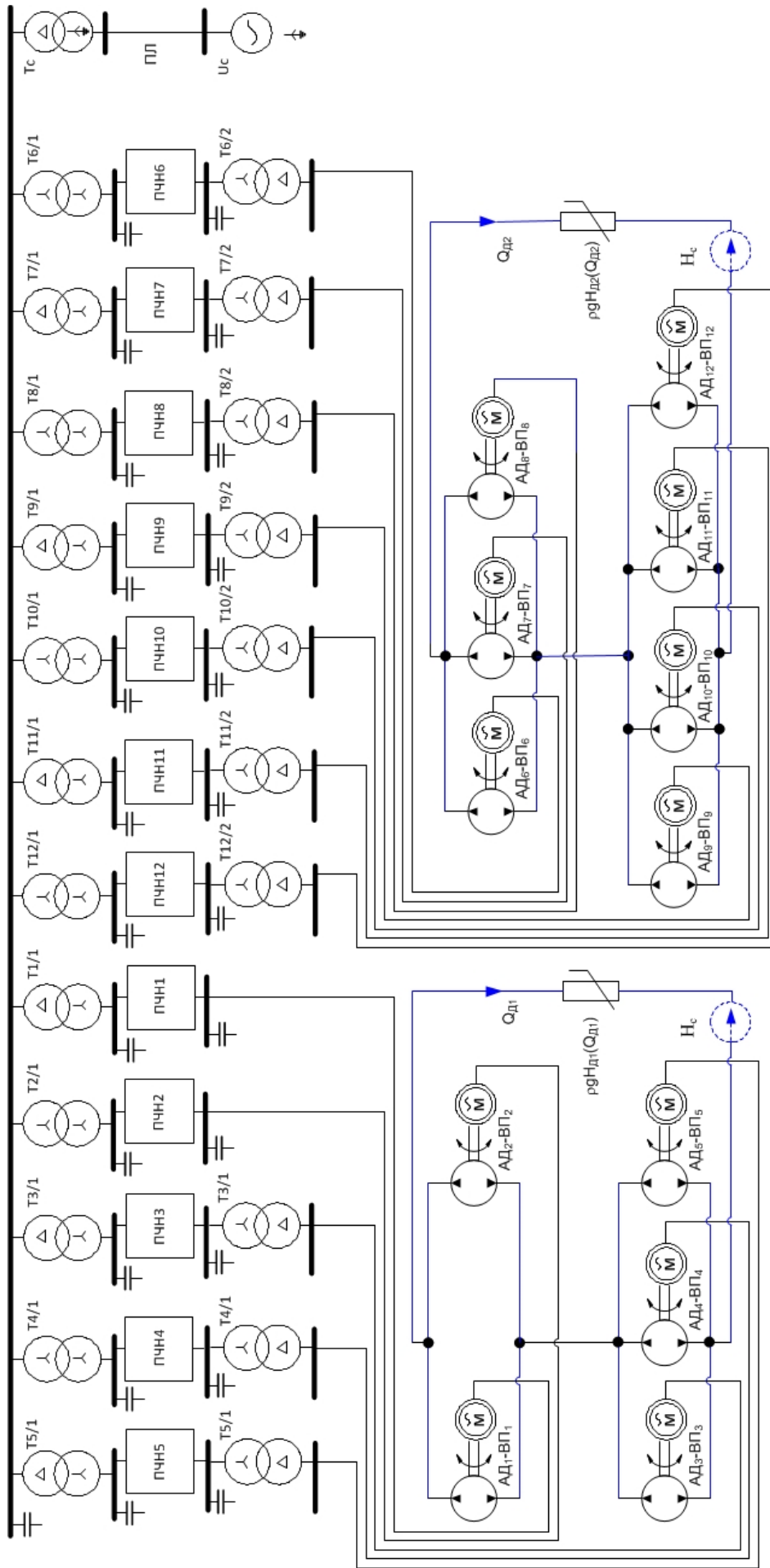


Рис. 4.43. Схема електричних і гідравлічних сполучень багатоагрегатного електротехнічного комплексу "електропостачальна система – помпова станція"

Для розрахунків використано електроенергетичну систему з $U_{sys}=110$ кВ, $S_{kzsys}=1000$ МВ·А та трансформатор ЕЕС типу ТДН-40000/110. Значення ємностей обирались під час розрахунку й були такими, щоб уникнути перекомпенсації реактивної потужності АД в усьому діапазоні розрахунків. Перелік типів іншого устаткування, параметри якого використано для тестових розрахунків, наведено в таблиці 4.14.

Таблиця 4.13

Числові значення коефіцієнтів розподілу тисків і витрат pomp

№ помпи	$k_{роз.Q_i}^*$	$k_{роз.Q_j}$	$k_{роз.H_j}$
1, 2	0,194	0,500	0,091
3-5		0,333	0,909
6-8	0,806	0,333	0,236
9-12		0,250	0,764

Таблиця 4.14

Перелік типів агрегатів, використаних для розрахунку

№ агрегата	Тип відцентрової помпи	Тип асинхронного двигуна	Тип трансформатора
1, 2	14 НДсН	4АН355М6У3	ТС3-250/10
3-5	QG 300/2/100(б)	4АЗМВ-2500/6000-У2, 5	ТМ-2500/10
6-8	20 НДсН (а)	ДА3О2-17-79-6У1	ТМ-1600/10
9-12	НМ 3600-230(в)	2АЗМП-2500/6000У4	ТМ-4000/10

Інше устаткування:

- перетворювачі частоти й напруги ПЧН: представлені у загальному вигляді згідно з п. 2.2.7 ;
- гідравлічна мережа – згідно з (2.93);
- робоча рідина – вода, коефіцієнт кінематичної в'язкості $k_{v*б_i} = 1$.

Паспортні дані та параметри елементів заступних схем трансформаторів,

ВП та двигунів ВПТА №1 і №2 наведені в таблицях 4.7, 4.9 і 4.11. Паспортні дані та параметри елементів заступних схем трансформаторів, ВП, двигунів та ПКП агрегатів №3..№12 наведені в таблицях 4.15..4.25. Параметри заступних схем трансформаторів зведені до відповідних номінальних ВН обвиток ВН.

Таблиця 4.15

Паспортні дані й параметри трансформатора ТДН-40000/110

S_{H} МВ·А	$U_{\text{ВН}}$ кВ	$U_{\text{НН}}$ кВ	$u_{\text{к}}$ %	$P_{\text{к}}$ кВт	I_0 %	P_0 кВт	η_{H}	R_{T^*} $\cdot 10^{-3}$	X_{T^*} $\cdot 10^{-3}$	G_{T^*} $\cdot 10^{-3}$	B_{T^*} $\cdot 10^{-3}$
40	115	10,5	10,5	170	0,55	34	0,99	4,25	105	85,0	5,43

Таблиця 4.16

Паспортні дані й параметри трансформатора ТМ-2500/10

S_{H} МВ·А	$U_{\text{ВН}}$ кВ	$U_{\text{НН}}$ кВ	$u_{\text{к}}$ %	$P_{\text{к}}$ кВт	I_0 %	P_0 кВт	η_{H}	R_{T^*} $\cdot 10^{-3}$	X_{T^*} $\cdot 10^{-3}$	G_{T^*} $\cdot 10^{-3}$	B_{T^*} $\cdot 10^{-3}$
2,5	10,0	6,3	6,5	23,5	1,0	3,85	0,99	9,40	64,3	1,54	5,28

Таблиця 4.17

Паспортні дані й параметри трансформатора ТМ-1600/10

S_{H} МВ·А	$U_{\text{ВН}}$ кВ	$U_{\text{НН}}$ кВ	$u_{\text{к}}$ %	$P_{\text{к}}$ кВт	I_0 %	P_0 кВт	η_{H}	R_{T^*} $\cdot 10^{-3}$	X_{T^*} $\cdot 10^{-3}$	G_{T^*} $\cdot 10^{-3}$	B_{T^*} $\cdot 10^{-3}$
1,6	10,0	6,3	5,5	16,5	1,3	3,3	0,99	10,3	54,0	2,06	5,10

Таблиця 4.18

Паспортні дані й параметри трансформатора ТМ-4000/10

S_{H} МВ·А	$U_{\text{ВН}}$ кВ	$U_{\text{НН}}$ кВ	$u_{\text{к}}$ %	$P_{\text{к}}$ кВт	I_0 %	P_0 кВт	η_{H}	R_{T^*} $\cdot 10^{-3}$	X_{T^*} $\cdot 10^{-3}$	G_{T^*} $\cdot 10^{-3}$	B_{T^*} $\cdot 10^{-3}$
4,0	10,0	6,3	7,5	33,5	0,9	5,2	0,99	8,36	74,5	1,30	5,34

Таблиця 4.19

Паспортні дані й параметри відцентрової помпи QG 300/2/100(б)

P_H , кВт	n_H , об/хв	$H_{ДН}$, м	$Q_{ДН}$, м ³ /с	η_H	H_{0H}^*	$\Gamma_{\Delta q}^*$
932	2980	428	0,2222	0,745	2,641	43,89

Продовження таблиці 4.19

$X_{\Delta q}^*$	$\Gamma_{\Delta H}^*$	$X_{\Delta H}^*$	X_t^*	$X_{\mu h}^*$	$X_{\mu q}^*$	Γ_M^*	X_M^*
15,117	$6,6 \cdot 10^{-4}$	0,4677	1,03311	0,31223	2,3111	20,38	0,004357

Таблиця 4.20

Паспортні дані й параметри відцентрової помпи 20 НДсН (а)

P_H , кВт	n_H , об/хв	$H_{ДН}$, м	$Q_{ДН}$, м ³ /с	η_H	H_{0H}^*	$\Gamma_{\Delta q}^*$
911	994	93	1,0000	0,80	1,2197	25,15

Продовження таблиці 4.20

$X_{\Delta q}^*$	$\Gamma_{\Delta H}^*$	$X_{\Delta H}^*$	X_t^*	$X_{\mu h}^*$	$X_{\mu q}^*$	Γ_M^*	X_M^*
16,39	$3,3 \cdot 10^{-4}$	0,3872	0,03607	0,07224	1,1465	7,3145	0,012468

Таблиця 4.21

Паспортні дані й параметри відцентрової помпи НМ 3600-230(в)

P_H , кВт	n_H , об/хв	$H_{ДН}$, м	$Q_{ДН}$, м ³ /с	η_H	H_{0H}^*	$\Gamma_{\Delta q}^*$
1892	2973	278	0,6944	0,834	1,2324	25,95

Продовження таблиці 4.21

$X_{\Delta q}^*$	$\Gamma_{\Delta H}^*$	$X_{\Delta H}^*$	X_t^*	$X_{\mu h}^*$	$X_{\mu q}^*$	Γ_M^*	X_M^*
19,10	$3,9 \cdot 10^{-4}$	0,42787	0,01012	0,01758	0,22715	7,631	0,013912

Таблиця 4.22

Паспортні дані й параметри асинхронного двигуна 4АЗМВ-2500/6000-У2, 5

P_H , кВт	U_H , кВ	$k_{M\max}$	$k_{M\min}$	$k_{Mп}$	$k_{iп}$	$\cos(\varphi)_H$	n_H , об/хв	η_H	p_0
1600	6,0	2,6	0,7	0,9	6	0,90	2979	0,961	1

Продовження таблиці 4.22

R_s^*	X_s^*	R_{r1}^*	X_{r1}^*	R_{r2}^*	X_{r2}^*	I_{mn}^*	R_a^*
0,0100	0,1087	0,0263	0,3805	0,0105	0,1522	0,2210	54,3

Таблиця 4.23

Паспортні дані й параметри асинхронного двигуна ДАЗО2-17-79-6У1

P_n , кВт	U_n , кВ	k_{Mmax}	$k_{Mп}$	k_{ip}	$\cos(\varphi)_n$	n_n , об/хв	η_n	p_0
1250	6,0	2,8	0,85	6,8	0,91	995	0,93	3

Продовження таблиці 4.23

R_s^*	X_s^*	R_{r1}^*	X_{r1}^*	R_{r2}^*	X_{r2}^*	I_{mn}^*	R_a^*
0,0413	0,0879	0,0185	0,2981	0,0074	0,1192	0,2843	50,5

Таблиця 4.24

Паспортні дані й параметри асинхронного двигуна 2АЗМП-2500/6000У4

P_n , кВт	U_n , кВ	k_{Mmax}	$k_{Mп}$	k_{ip}	$\cos(\varphi)_n$	n_n , об/хв
2500	6,0	2,3	0,6	5,3	0,92	2976

Продовження таблиці 4.24

η_n	p_0	R_s^*	X_s^*	R_{r1}^*	X_{r1}^*	R_{r2}^*	X_{r2}^*	I_{mn}^*	R_a^*
0,968	1	0,00386	0,1110	0,0294	0,3832	0,0118	0,1533	0,1517	53,9

Таблиця 4.25

Еквівалентні ємності пристроїв компенсації реактивної потужності

№ агрегату	C_1 , мкФ	C_2 , мкФ	C_3 , мкФ	C_{sys} , мкФ
1, 2	211	158	0	8,5
3-5	6,3	4,7	0	
6-8	5,8	4,3	0	
9-12	9,6	7,2	0	

Оскільки створена ММ дозволяє аналізувати взаємний вплив найрізноманітніших параметрів і координат режиму, далі наведені лише деякі окремі приклади отриманих результатів.

4.3.1 Розрахунок режимів з некерованими агрегатами

На рис. 4.44..4.53 наведено результати розрахунку ustalених режимів ЕТК із некерованими агрегатами у вигляді графічних залежностей деяких координат режиму кожного з агрегатів від сумарної витрати робочої рідини, який здійснювався для розділеного на 50 однакових інтервалів діапазону витрати робочої рідини на вході гідромережі в межах $Q_{д*}=0,25..1,25$.

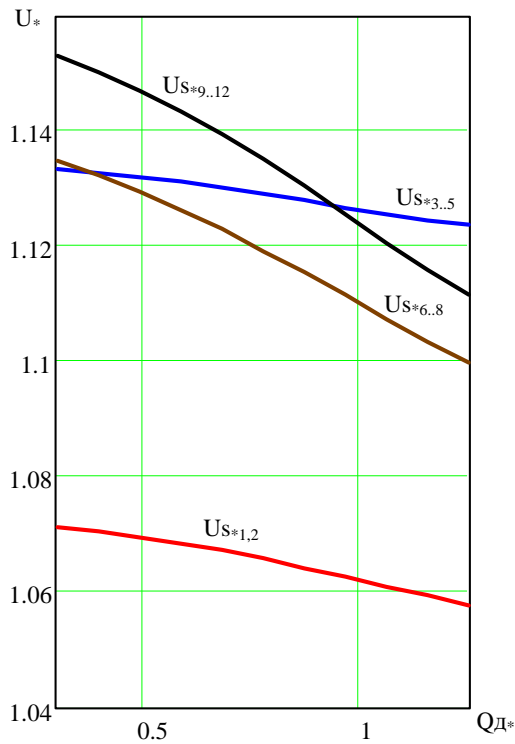


Рис. 4.44 Відносні напруги обвиток статорів АД

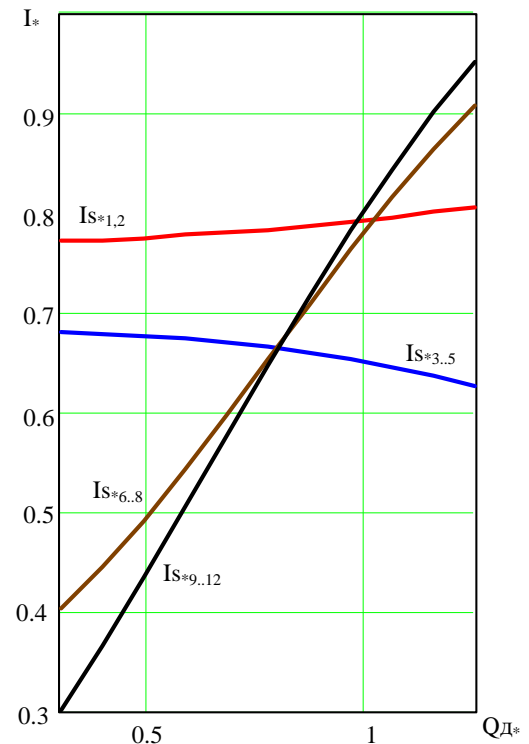


Рис. 4.45 Відносні струми обвиток статорів АД

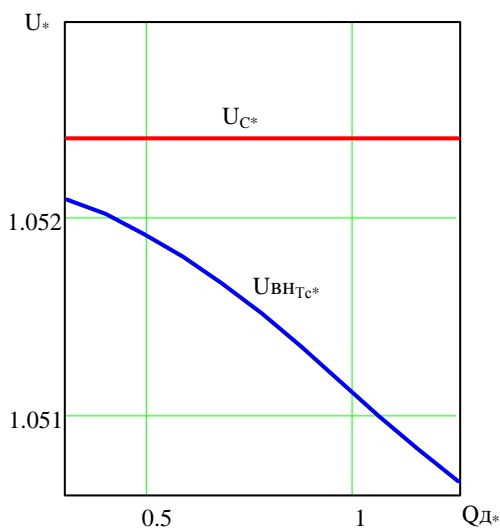


Рис. 4.46. Відносна напруга на шинах ВН трансформатора Тс ЕТК

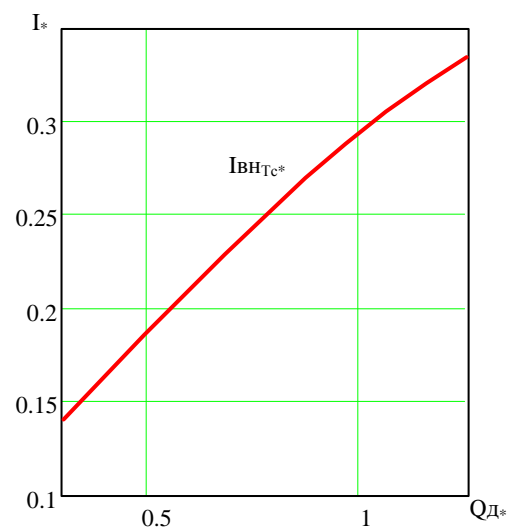


Рис. 4.47 Відносний струм обвитки ВН трансформатора Тс ЕТК

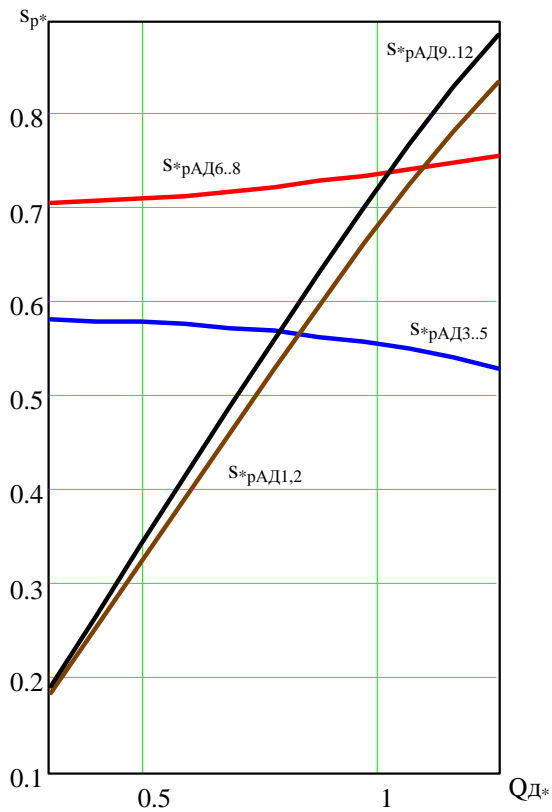


Рис. 4.48 Відносні ковзання роторів АД

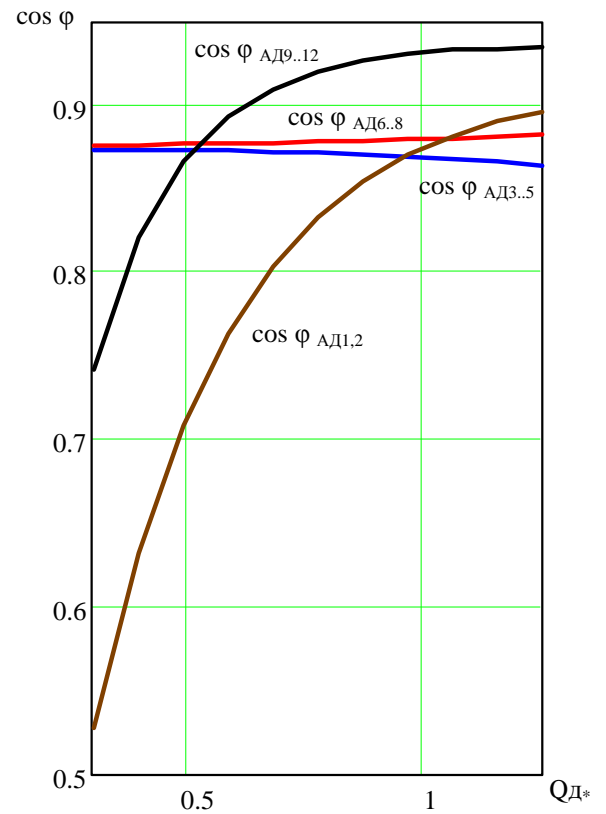


Рис. 4.49 Коефіцієнти потужності АД

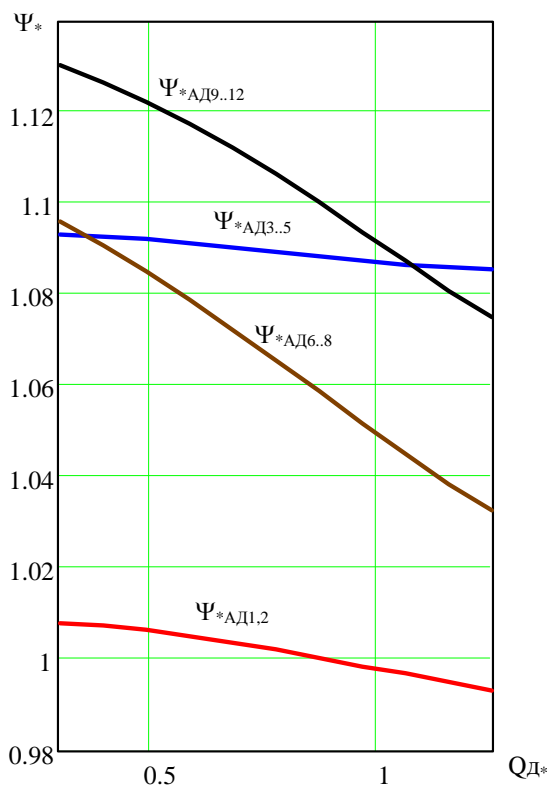


Рис. 4.50 Відносні потокозчеплення АД

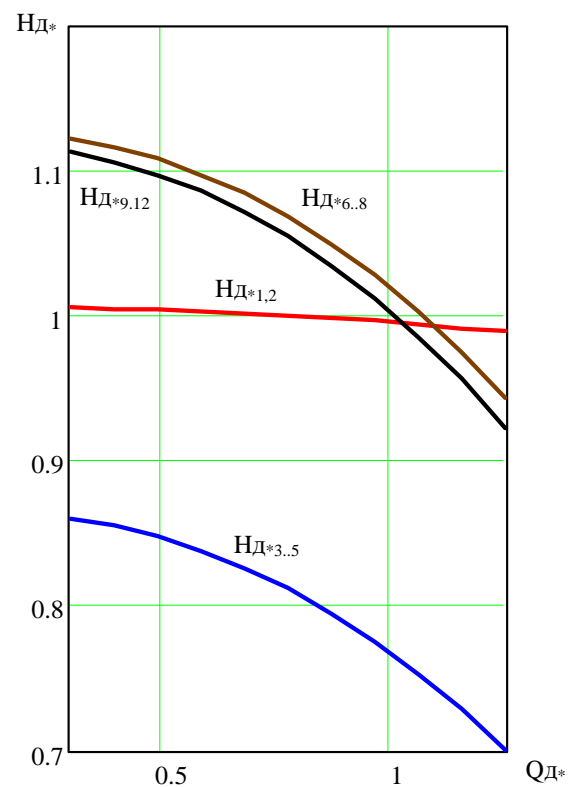


Рис. 4.51 Відносні напори ВП

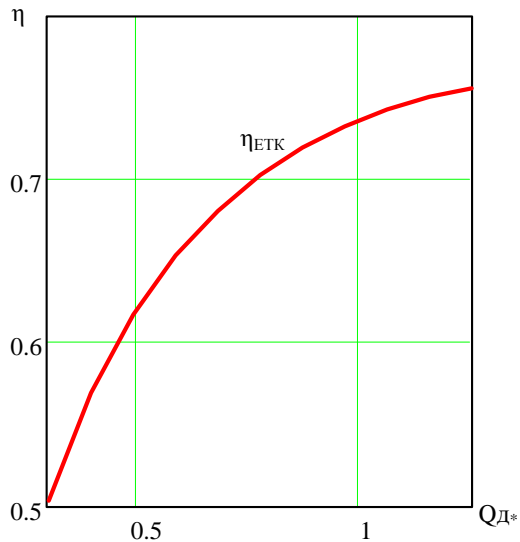


Рис. 4.52 Загальний коефіцієнт
корисної дії ЕТК

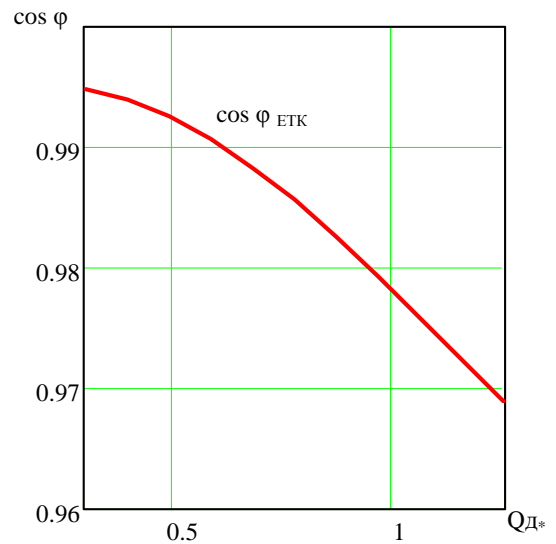


Рис. 4.53 Загальний коефіцієнт
потужності ЕТК

4.3.2 Розрахунок режимів за умови частотного керування двигунами

Для розрахунку усталених режимів ЕТК із частотно керованими агрегатами обрано керування напругою й частотою напруги на затискачах обвиток статорів АД за функцією М. Костенка згідно (2.230).

Розрахунок здійснювався для розділеного на 20 однакових інтервалів діапазону витрати робочої рідини на вході ГМ в межах $Q_{д*}=0,1..1,25$. Гідромережі задані у вигляді сталих, (незалежних від витрат рідини) напорів:

$$H_1(k_{роз.Q_1}^* Q_{д\Sigma}) - 1 = 0;$$

$$H_2(k_{роз.Q_2}^* Q_{д\Sigma}) - 1 = 0.$$

На рис.4.54. .4.63 наведено результати розрахунків у вигляді графічних залежностей координат режиму кожного з агрегатів від сумарної витрати робочої рідини за умови підтримання сталих тисків на обох виходах системи.

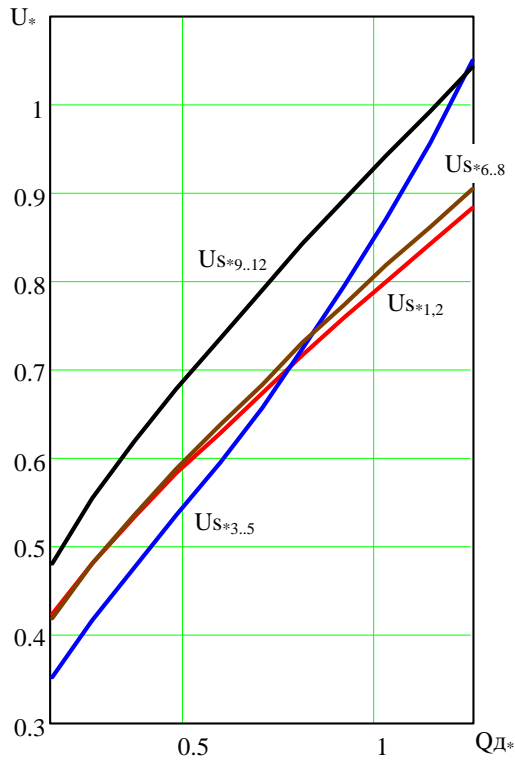


Рис. 4.54 Відносні напруги обвиток статорів АД

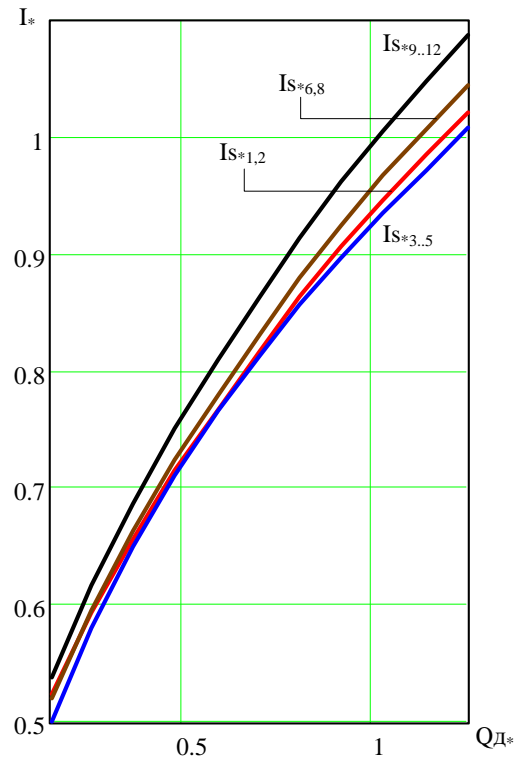


Рис. 4.55 Відносні струми обвиток статорів АД

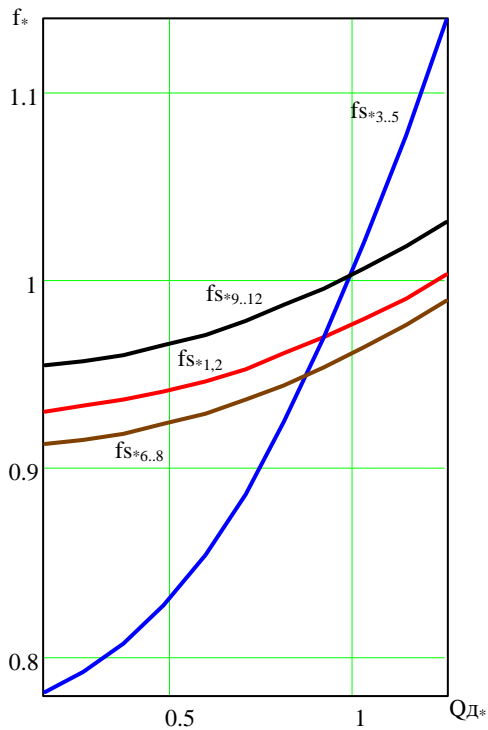


Рис. 4.56 Відносні частоти напруг обвиток статорів АД

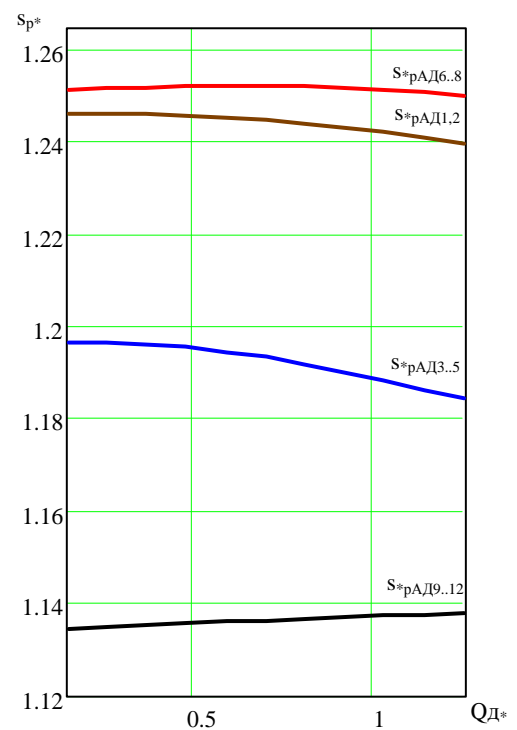


Рис. 4.57 Відносні ковзання роторів АД

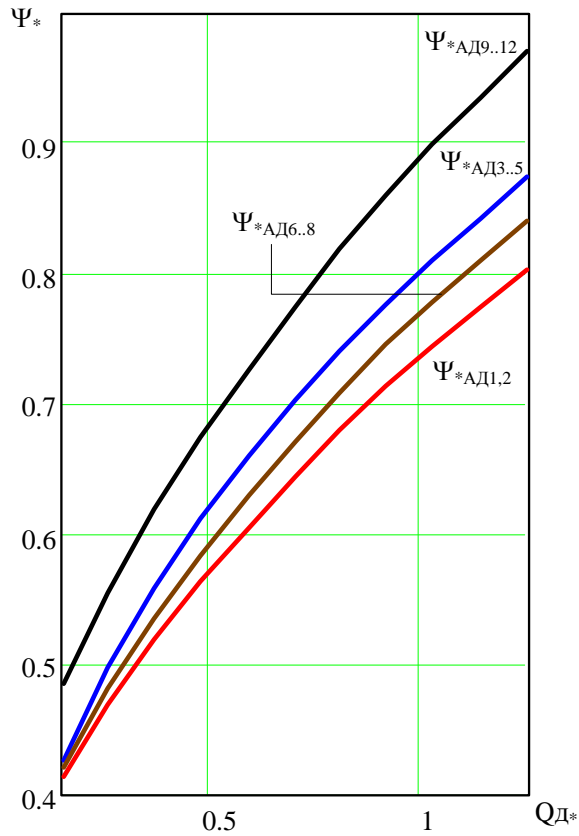


Рис. 4.58 Відносні потокозчеплення асинхронних двигунів

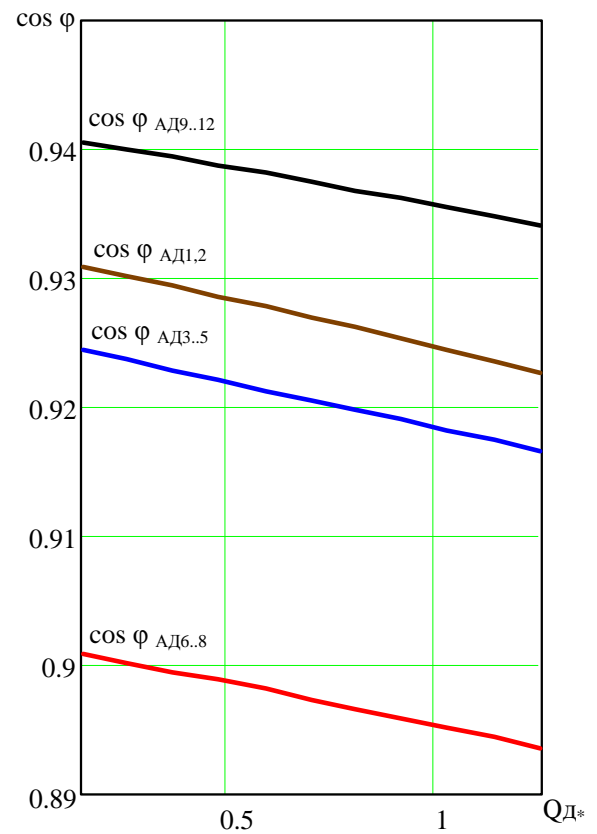


Рис. 4.59 Коефіцієнти потужності асинхронних двигунів

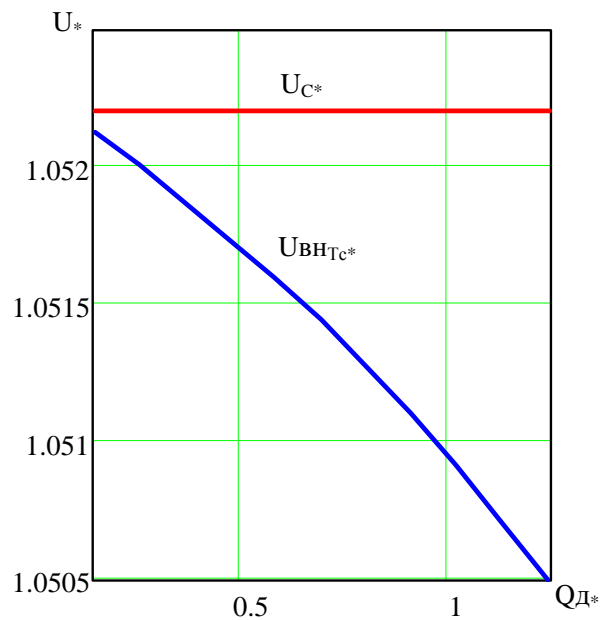


Рис. 4.60. Відносна напруга на шинах ВН трансформатора Тс ЕТК

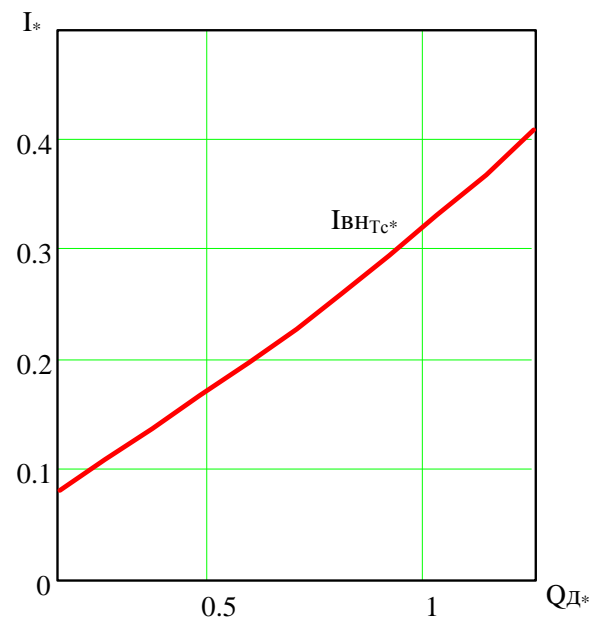


Рис. 4.61 Відносний струм обвитки ВН трансформатора Тс ЕТК

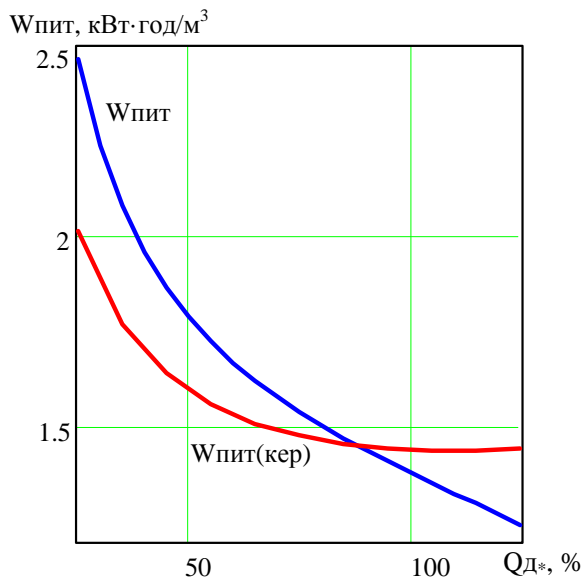


Рис. 4.62 Питомі витрати активної електроенергії ЕТК

($H_{\text{ГМ1ном}}=470,0$ м; $H_{\text{ГМ2ном}}=363,3$ м).

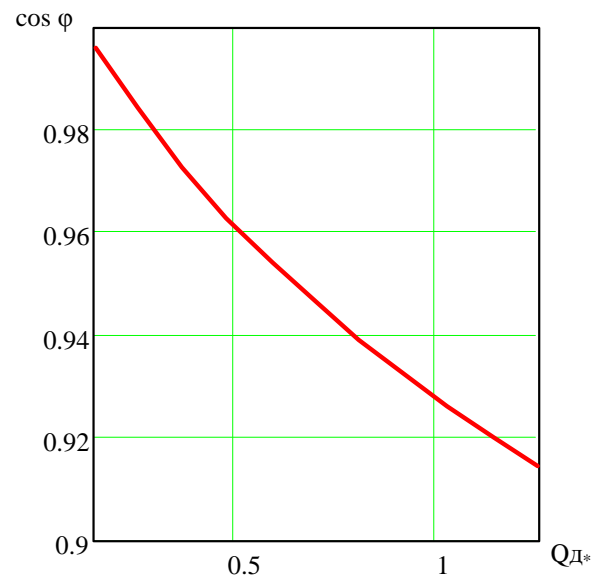


Рис. 4.63 Загальний коефіцієнт потужності ЕТК

4.4 Усталені режими багатоагрегатного електротехнічного комплексу

Продемонструємо застосування моделі для розроблення раціональної схеми живлення та мікропроцесорної системи керування режимами ЕТК, схему електричних і гідравлічних сполучень якого зображено на рис. 4.64. Послідовно працюють група з двох однакових паралельно сполучених підпірних і група з трьох однакових паралельно сполучених основних ВПТА.

Скалярне частотне керування двигуном реалізовано лише для агрегату №3 згідно (2.230): $U_{s_*} = \omega_{s_*} \sqrt{M_{\text{ем}_*}}$; керування роботою інших агрегатів здійснюється шляхом їхнього вмикання чи вимикання. Живлення ЕТК здійснюється від ЕЕС з $U_c=110$ кВ, $S_k^{(3)}=100$ МВ·А через трансформатор T_c типу ТДН-10000/110. Перелік іншого устаткування, параметри якого використано для розрахунків, наведено в п.п. 4.2 , 4.3 . Керування режимами роботи ЕТК полягає в зміні кількості увімкнених ВПТА та застосуванні частотного керування швидкістю обертання ротора АД 3-го агрегату в залежності від об'ємної витрати робочої рідини Q_{Σ} на вході трубопроводу, з метою підтримання незмінного значення напору $H_d = 470$ м на його вході.

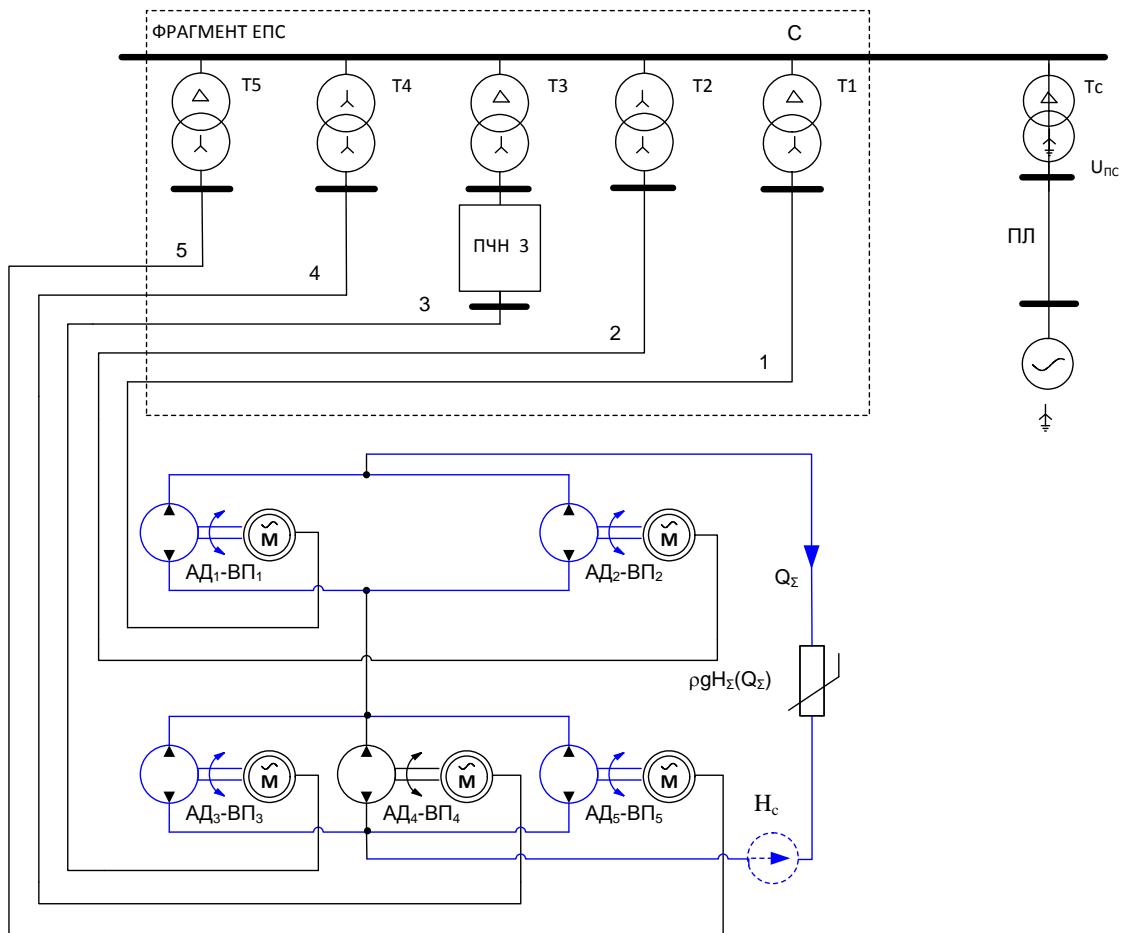


Рис. 4.64 Схема електричних і гідравлічних сполучень електротехнічного комплексу "електропостачальна система – помпова станція"

Така помпова станція забезпечує зазначений напір у діапазоні витрат від нуля до 2370 м³/год. Після перевищення цього значення напір на вході трубопроводу буде зменшуватись, оскільки всі агрегати будуть увімкнені й робочі колеса pomp обертатимуться з максимальними частотами.

4.4.1 Керування усталеними режимами

Здійснені розрахунки (без урахування компенсації реактивної потужності) показали, що ефективна робота досліджуваного ЕТК можлива з чотирма комбінаціями одночасно увімкнених агрегатів. Аналіз витрати електроенергії, необхідної для помпування 1м³ робочої рідини (рис. 4.65), показав, що варіанти з трьома й чотирма одночасно працюючими ВПТА є енергетично подібними. Перелік і номери одночасно увімкнених ВПТА в різних діапазонах витрат робочої рідини наведені в табл. 4.26.

Перелік одночасно увімкнених ВПТА й діапазони витрат робочої рідини

Кількість ВПТА	2	3	4	5
Номери ВПТА	1, 3	1, 3, 4	1, 2, 3, 4	1, 2, 3, 4, 5
Діапазон Q_{Σ} , м ³ /год	0..798	798..1588	910..1597	1597..2370

Із урахуванням доцільності мінімізації кількості задіяного обладнання, необхідність застосування чотирьох одночасно увімкнених ВПТА може виникнути лише в дуже вузькому діапазоні витрат ($1597 - 1588 = 9$ м³/год). Уникнути застосування чотирьох одночасно увімкнених ВПТА можна за рахунок дуже незначного (на 1,3% понад номінальне значення) збільшення частоти обертання АД агрегату №3 для досягнення загальної витрати 1597 м³/год. Це дає підстави рекомендувати застосувати варіанти одночасної роботи двох, трьох чи п'яти агрегатів, які дозволяють забезпечити помпування робочої рідини в усьому діапазоні її витрат. На рис. 4.65..4.68 наведено залежності деяких основних координат усталених режимів ЕТК в цілому. Для порівняння на цих рисунках пунктирними лініями зображено відповідні показники для випадку роботи в усьому діапазоні витрат усіх п'яти частотно керованих агрегатів.

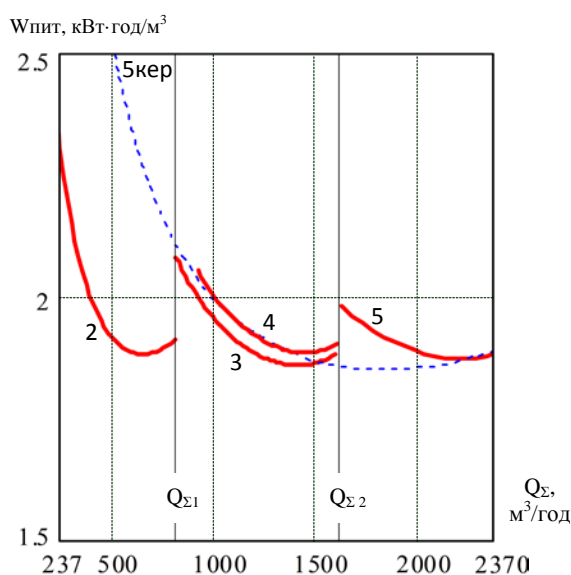


Рис. 4.65 Питомі витрати електроенергії ЕТК ($H_2=470,0$ м)

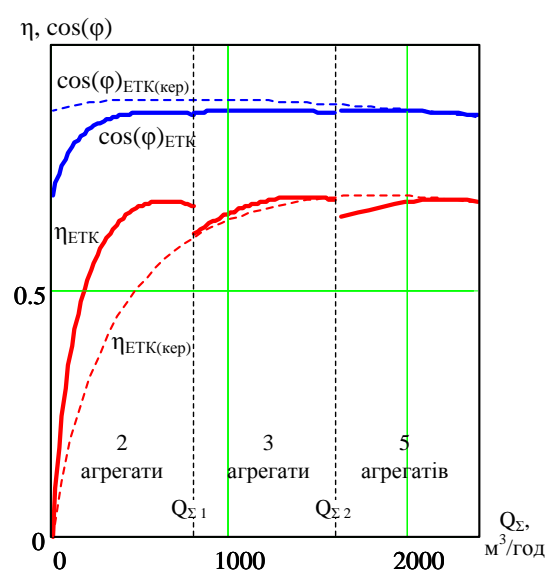


Рис. 4.66 Коефіцієнт потужності та коефіцієнт корисної дії ЕТК

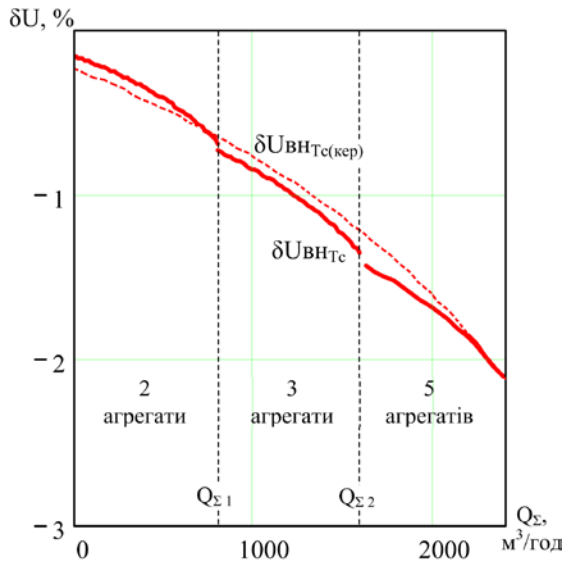


Рис. 4.67 Відхилення напруги $U_{пс}$ на шинах ВН трансформатора T_c ЕТК

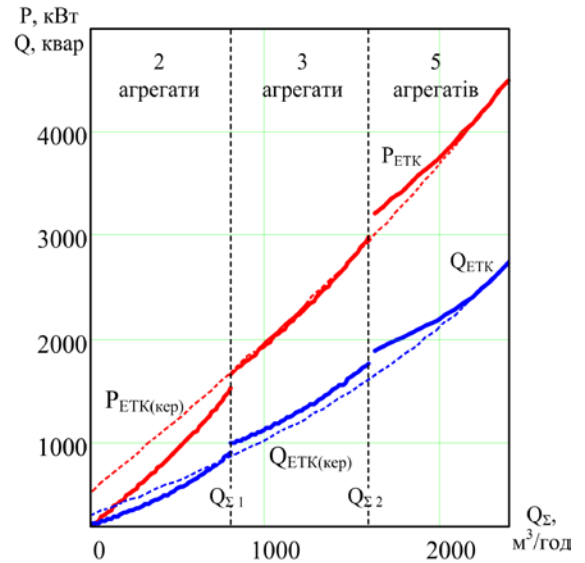


Рис. 4.68 Активна та реактивна потужності ЕТК

Частоти обертання роторів і напори pomp, частоти напруг і напруги обвиток статорів АД, об'ємні витрати окремих pomp та їхні ККД (зокрема для частотно керованого АД агрегату №3) в залежності від об'ємної витрати робочої рідини на вході трубопровода, зображено на рис. 4.69..4.72.

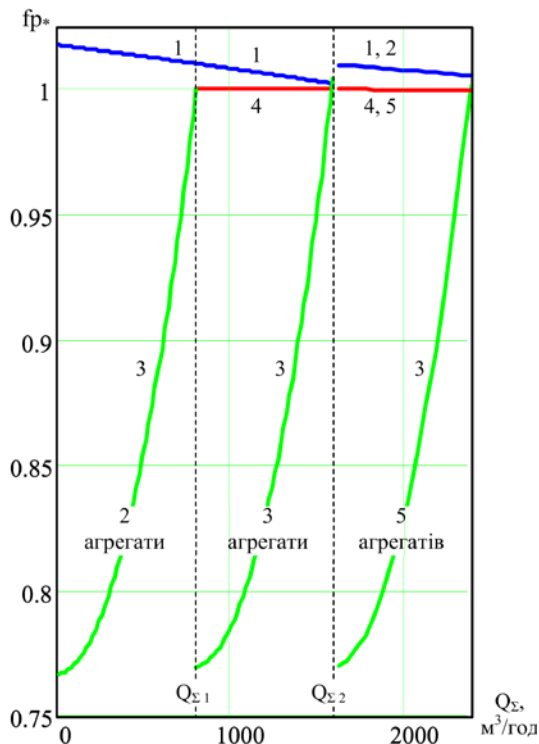


Рис. 4.69 Частоти обертання роторів

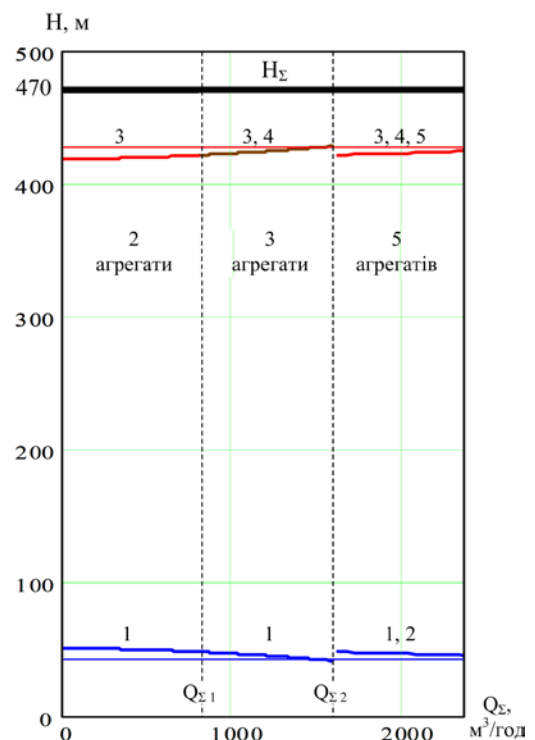


Рис. 4.70 Напори pomp

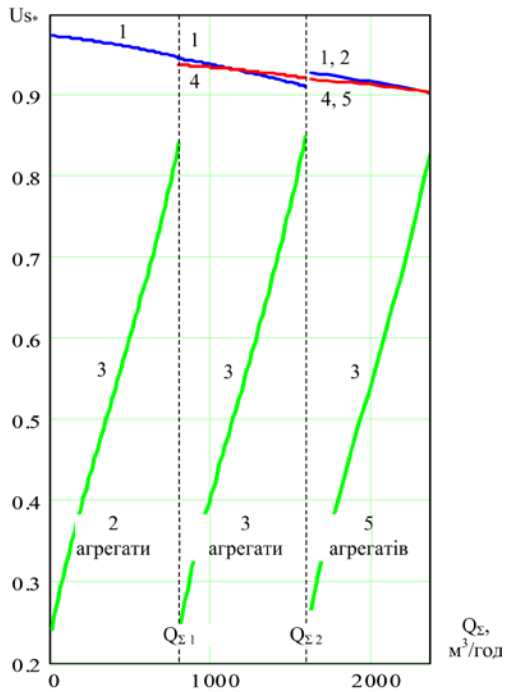


Рис. 4.71 Напруги обвиток статорів АД

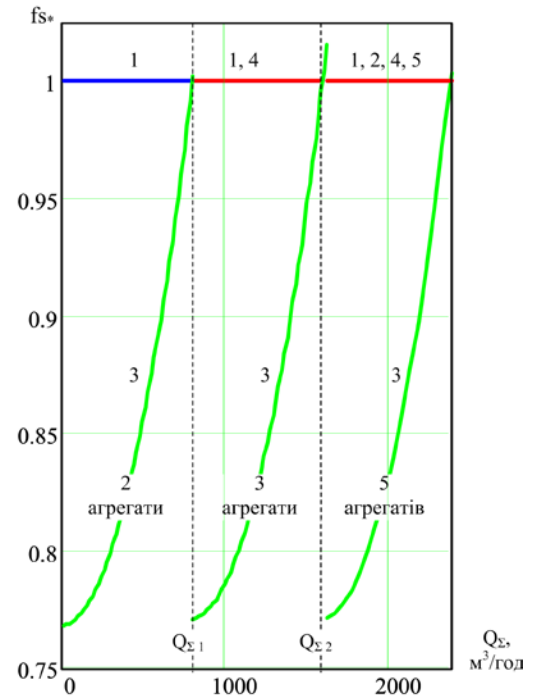


Рис. 4.72 Частоти напруг обвиток статорів АД

Об'ємні витрати окремих pomp та їхні ККД в залежності від об'ємної витрати робочої рідини на вході трубопровода, зображено на рис. 4.73, 4.74.

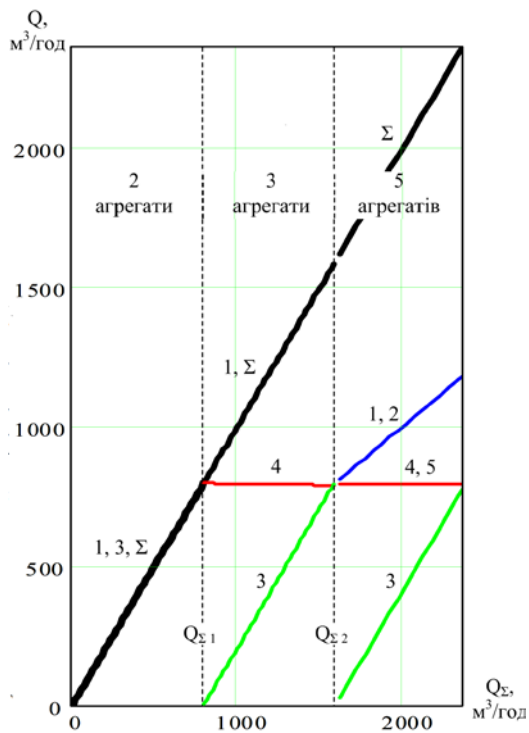


Рис. 4.73 Об'ємні витрати pomp

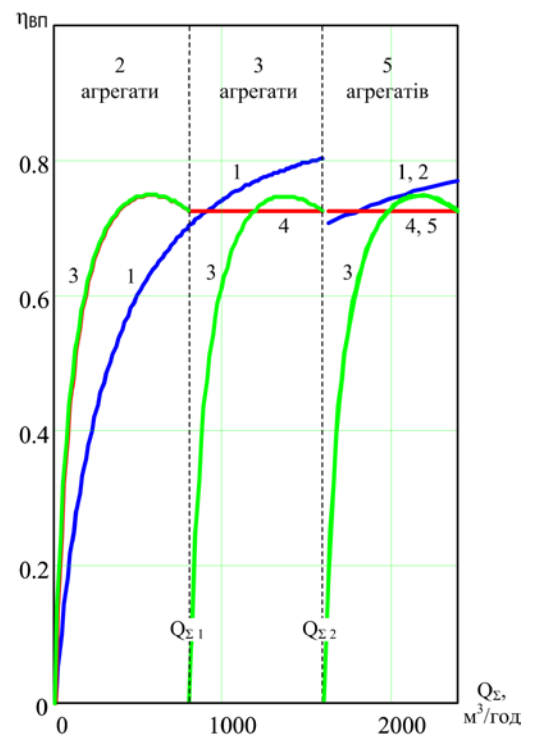


Рис. 4.74 ККД pomp

Керування усталеними режимами роботи досліджуваного ЕТК здійснюється шляхом увімкнення чи вимкнення агрегатів №2, №4, №5 за умови постійно увімкненого агрегату №1 та частотного керування двигуном агрегату №3 в залежності від вимірної давачем об'ємної витрати рідини на вході трубопровода. Ввімкнення чи вимкнення агрегатів повинно здійснюватися під час переходу витрати через значення $Q_{\Sigma 1}=798 \text{ м}^3/\text{год}$ та $Q_{\Sigma 2}=1597 \text{ м}^3/\text{год}$ згідно з табл. 4.26.

Таким чином, за допомогою розробленої ММ проаналізовано різні варіанти керування роботою наведеного ЕТК і обрано найбільш доцільний. Визначено алгоритм керування ЕТК як послідовність комутаційних дій та отримано параметри живлення двигуна частотно керованого агрегату у вигляді відповідних функційних залежностей (крива 3 на рис. 4.71, 4.72) від загальної витрати робочої рідини.

Зважаючи на те, що зменшення об'ємної витрати робочої рідини нижче 10% номінального значення ЕТК призводить до багаторазового збільшення питомої витрати електроенергії на pompування одиниці об'єму рідини (рис. 4.65), надалі не аналізуємо роботу ЕТК у цих неефективних режимах.

4.4.2 Конфігурація електропостачальної системи

Система електропостачання ЕТК, схему якого зображено на рис. 4.64, не є найкращою з міркувань кількості та встановленої потужності електротехнічного обладнання. Для визначення доцільної конфігурації ЕПС порівнюємо між собою два варіанти її виконання, які відрізняються між собою різною кількістю та встановленою потужністю живильних трансформаторів. Ці варіанти відображені у виділеному на рис. 4.64 пунктирною лінією "фрагменті ЕПС". Трансформатор T_c головної знижувальної підстанції однаковий для всіх варіантів.

У першому варіанті виконання системи електропостачання ЕТК (надалі "В1", що на рис. 4.75) живлення підпірних ВПТА 1 і 2 здійснюється від одного трансформатора $T_{12} \text{ ТСЗ-630/10}$. Живлення основних некерованих ВПТА 4 і 5

здійснюється також від одного трансформатора Т45 ТМ-4000/10. Керований ВПТА 3 живиться, як і в початковому варіанті (надалі – "В0", рис. 4.64) окремо – від трансформатора ТМ-2500/10. Встановлена потужність 5-и трансформаторів у В1 складає 7,13 МВ·А. Встановлена потужність 3-х трансформаторів у В0 складає 8,3 МВ·А.

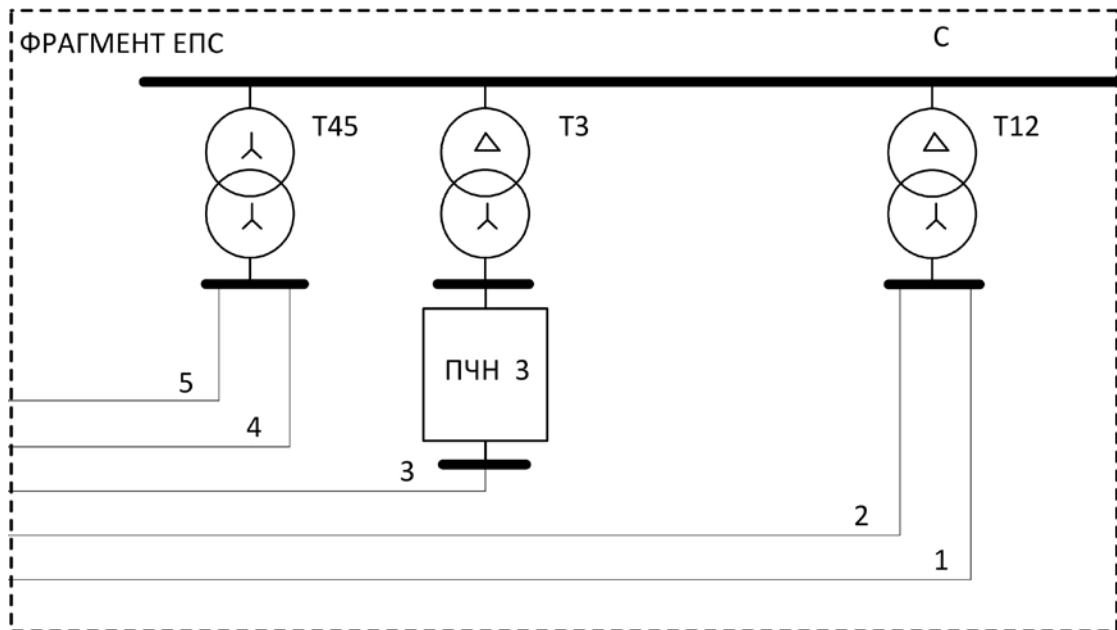


Рис. 4.75 Схема варіанту В1 фрагмента ЕПС (3 трансформатори)

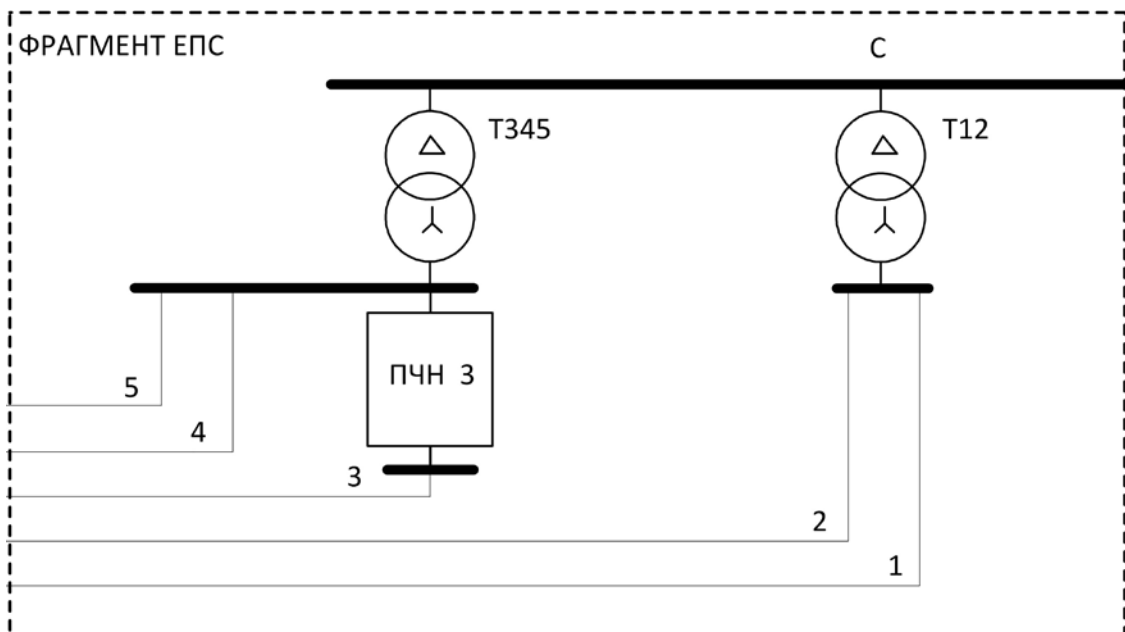


Рис. 4.76 Схема варіанту В2 фрагмента ЕПС (2 трансформатори)

У другому варіанті (надалі – "В2", що на рис. 4.76) живлення підпірних ВПТА 1 і 2 здійснюється так само, як у В1. Живлення всіх основних ВПТА (некерованих 4, 5 і керованого 3) здійснюється від одного трансформатора Т345 ТМ-6300/10. Встановлена потужність 2-х трансформаторів у В2 складає 6,93 МВ·А.

Порівняння режимів роботи ЕТК із трьома зазначеними варіантами виконання ЕПС наведено графічно у вигляді таких найважливіших показників (на шинах ВН трансформатора Т_с ЕТК):

- відсоткової зміни коефіцієнта потужності,
- відсоткової зміни реактивної потужності,
- відсоткової зміни повної потужності,
- зміни відхилення напруги,
- відсоткової зміни питомої витрати електроенергії на помпування одиниці об'єму рідини.

Ці зміни відображені внаслідок переходу від В0 до В1 на рис. 4.77 і 4.78, від В0 до В2 на рис. 4.79 і 4.80, від В1 до В2 на рис. 4.81 і 4.82.

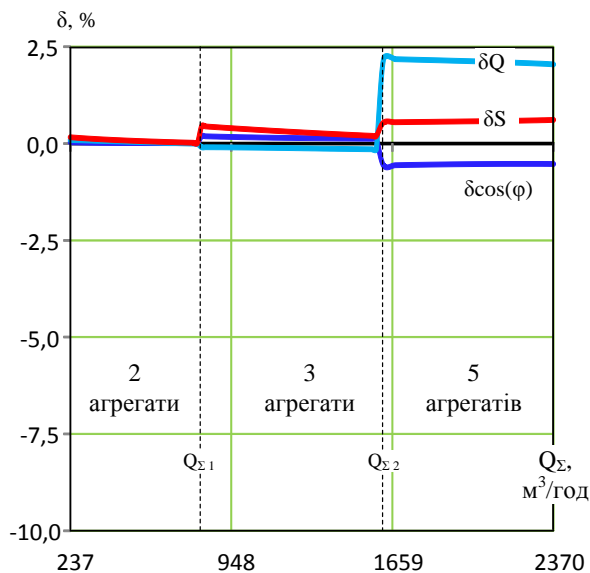


Рис. 4.77 Відсоткові зміни коефіцієнта потужності, реактивної та повної потужностей внаслідок переходу від В0 до В1

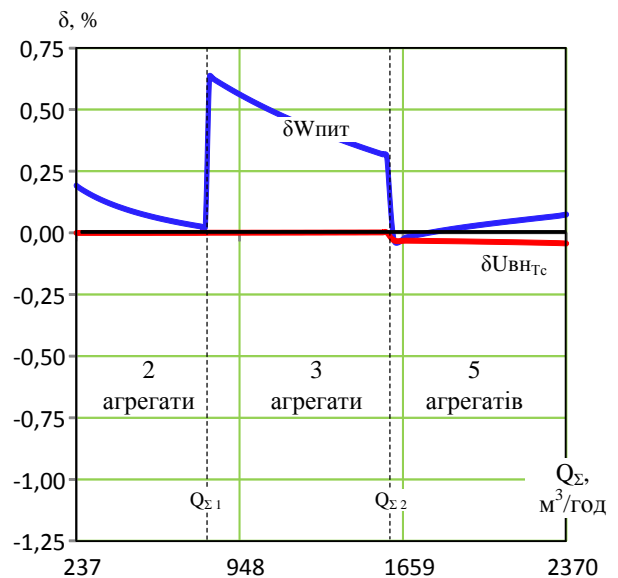


Рис. 4.78 Зміна відхилення напруги на шинах ВН Т_с ЕТК і відсоткова зміна питомої витрати електроенергії внаслідок переходу від В0 до В1

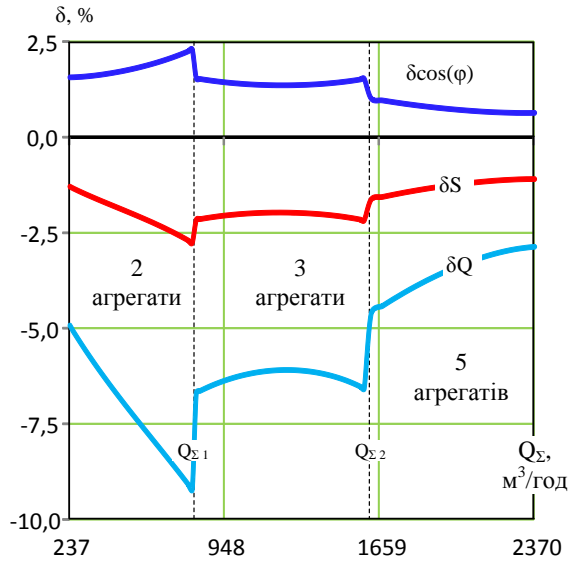


Рис. 4.79 Відсоткові зміни коефіцієнта потужності, реактивної та повної потужностей внаслідок переходу від В0 до В2

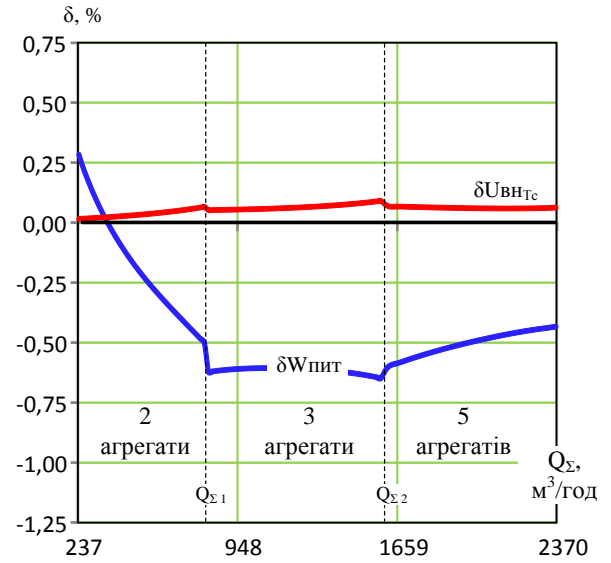


Рис. 4.80 Зміна відхилення напруги на шинах ВН Т_с ЕТК і відсоткова зміна питомої витрати електроенергії внаслідок переходу від В0 до В2

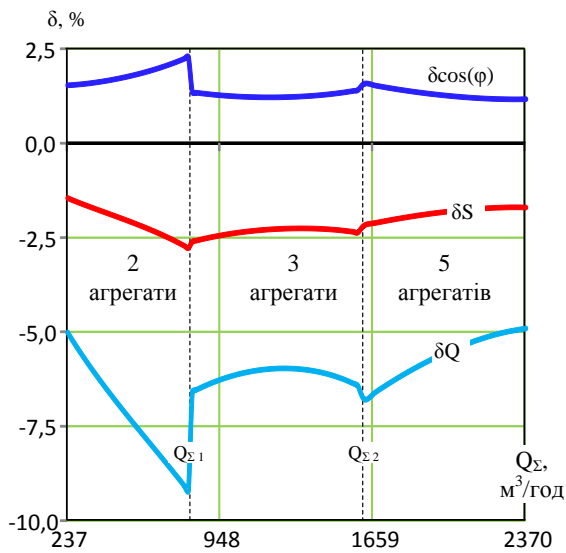


Рис. 4.81 Відсоткові зміни коефіцієнта потужності, реактивної та повної потужностей внаслідок переходу від В1 до В2

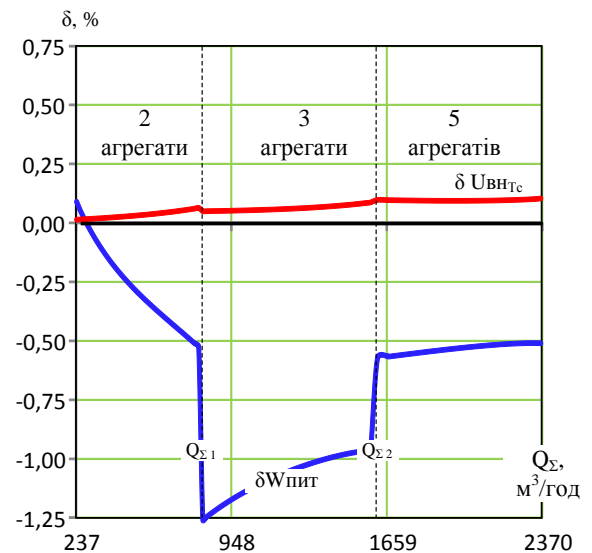


Рис. 4.82 Зміна відхилення напруги на шинах ВН Т_с ЕТК і відсоткова зміна питомої витрати електроенергії внаслідок переходу від В1 до В2

Аналіз отриманих результатів показує, що внаслідок переходу від В0 до В1 (рис. 4.77 і 4.78) усі показники дещо погіршуються, а саме:

- знижуються коефіцієнт потужності й напруга U_{nc} на шинах ВН Тс ЕТК,
- зростають питома витрата електроенергії на помпування одиниці об'єму рідини, реактивна та повна потужності.

Натомість, внаслідок переходу від В0 до В2 (рис. 4.79 і 4.80) ці показники покращуються (деякі з них – досить суттєво), а саме:

- зростають коефіцієнт потужності й напруга U_{nc} на шинах ВН Тс ЕТК,
- знижуються питома витрата електроенергії на помпування одиниці об'єму рідини, реактивна та повна потужності.

Лише в області малих витрат робочої рідини (менше $370 \text{ м}^3/\text{год}$ – 15,6% номінального значення) спостерігається деяке (до 0,26%) зростання питомої витрати електроенергії на помпування одиниці об'єму рідини. Однак, це компенсується покращенням інших показників.

І нарешті, контрольне порівняння між собою варіантів В1 і В2 (рис. 4.81 і 4.82) остаточно визначає В2 як кращий.

Таким чином, можна зробити висновок про доцільність застосування варіанту В2 (рис. 4.76) виконання системи електропостачання, що дозволяє зменшити з 5-ти до 2-х кількість трансформаторів, із $8,3 \text{ МВ} \cdot \text{А}$ до $6,93 \text{ МВ} \cdot \text{А}$ (на 16,5%) їхню встановлену потужність з одночасним відчутним покращенням режимів роботи ЕТК у цілому.

4.4.3 Компенсування реактивної потужності

На базі обраного варіанту В2 (рис. 4.76) виконання системи електропостачання ЕТК визначимо доцільні місця встановлення пристроїв поперечної компенсації реактивної потужності, оцінимо їхні необхідні параметри й перевіримо ефективність компенсування.

Під час визначення доцільних місць встановлення ПКП було враховано місця споживання реактивної потужності, необхідний обсяг компенсації, а також залежність її величини від витрати робочої рідини. Із урахуванням цих

факторів виділено 3 доцільних місця встановлення ПКП 9 (рис. 4.83):

- ПКП₁₂ – напругою 0,4 кВ на шинах НН трансформатора Т12 живлення підпірних ВПТА 1 і 2 (доцільність цього ПКП потребує окремого техніко-економічного обґрунтування, оскільки вплив малопотужних підпірних ВПТА на загальне споживання електроенергії є незначний);
- ПКП₃₄₅ – напругою 6 кВ на шинах НН трансформатора Т345 живлення всіх основних ВПТА (некерованих 4, 5 і керованого 3);
- ПКП₃ – напругою 6 кВ на виході ПЧН [238] основного керованого ВПТА 3 (тут позитивну роль відіграватиме регулювальний ефект ємності, завдяки якому генерування реактивної потужності буде зменшуватись під час зниження напруги й частоти напруги в місці приєднання ПКП).

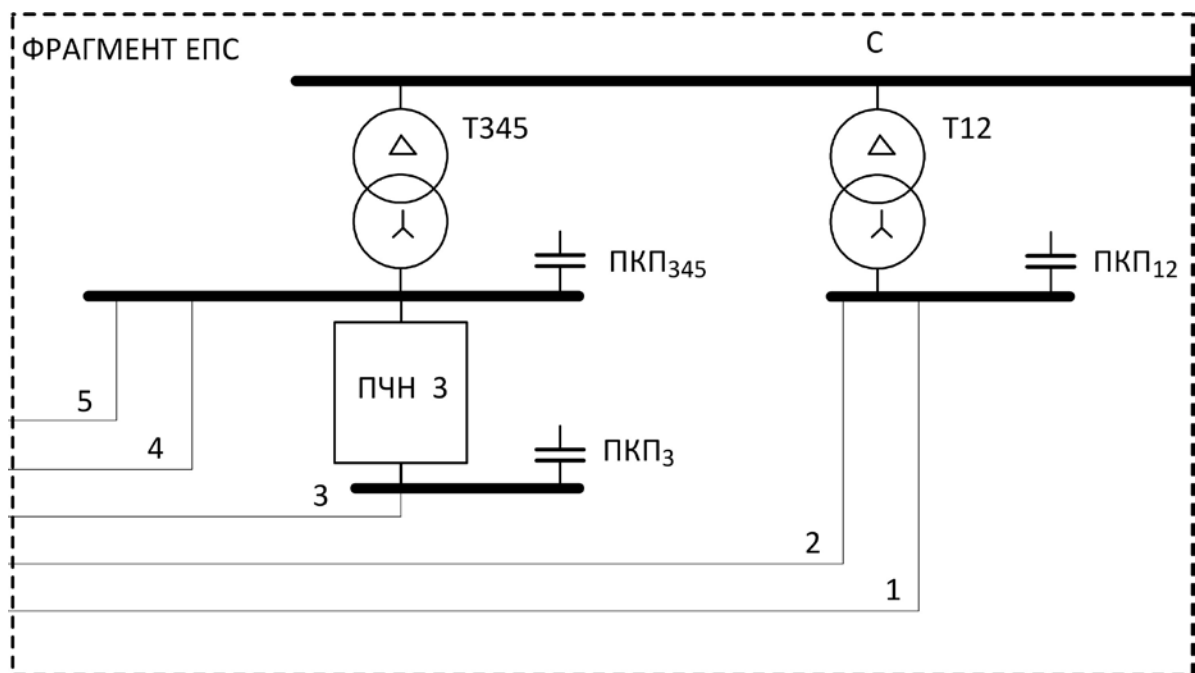


Рис. 4.83 Схема варіанту В2 фрагмента ЕПС з ПКП

У зв'язку з тим, що доцільність застосування ПКП₁₂ потребує додаткового обґрунтування, нами розглянуто два варіанти.

У першому варіанті (надалі – "В2.1") реактивна потужність, генерована ПКП₁₂ рівна нулю. У другому варіанті (надалі – "В2.2") ПКП₁₂ генерує ненульову реактивну потужність. Для порівняння цих варіантів із варіантом

В2 (без компенсації реактивної потужності) застосуємо графічне відображення тих же змін найважливіших показників, які були використані нами під час визначення доцільної конфігурації ЕПС в п. 4.4.2 . Ці зміни відображені внаслідок переходу

- від В2 до В2.1: на рис. 4.84 та 4.85,
- від В2 до В2.2: на рис. 4.86 і 4.87,
- від В2.1 до В2.2: на рис. 4.88 і 4.89.

Вибір необхідних параметрів ПКП передбачав недопущення перекомпенсації реактивної потужності в усьому діапазоні витрат робочої рідини під час роботи ЕТК згідно отриманому в п. 4.4.1 алгоритму керування. Перелік і номери одночасно увімкнених ВПТА й необхідна номінальна реактивна потужність ПКП у різних діапазонах витрат робочої рідини наведені в таблиці 4.27.

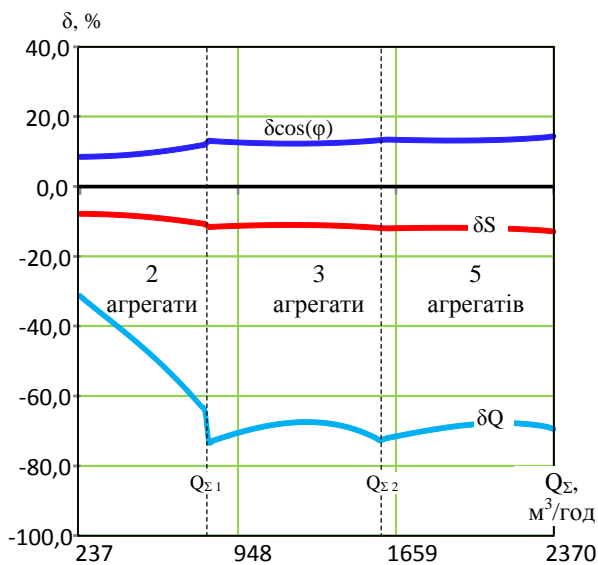


Рис. 4.84 Відсоткові зміни коефіцієнта потужності, реактивної та повної потужностей внаслідок переходу від В2 до В2.1

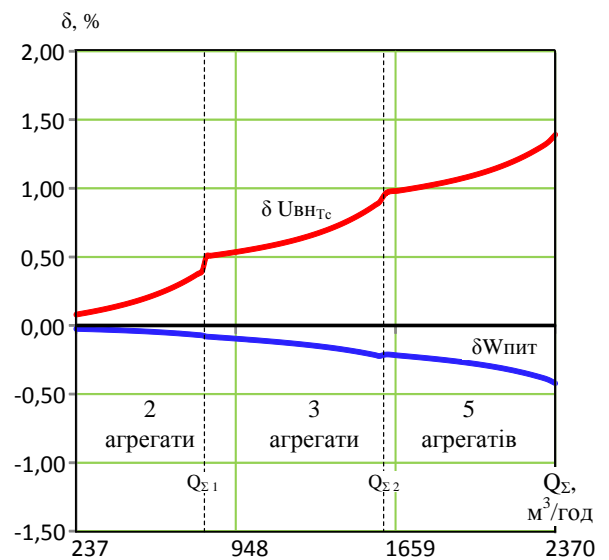


Рис. 4.85 Зміна відхилення напруги на шинах ВН Тс ЕТК і відсоткова зміна питомої витрати електроенергії внаслідок переходу від В2 до В2.1

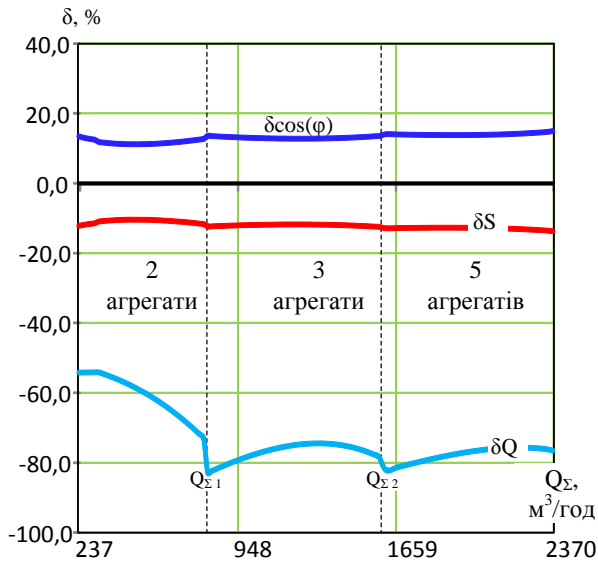


Рис. 4.86 Відсоткові зміни коефіцієнта потужності, реактивної та повної потужностей внаслідок переходу від B2 до B2.2

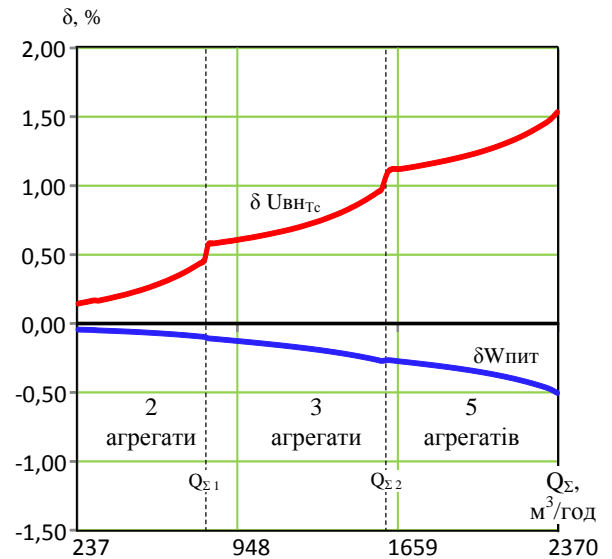


Рис. 4.87 Зміна відхилення напруги на шинах ВН Т_c ЕТК і відсоткова зміна питомої витрати електроенергії внаслідок переходу від B2 до B2.2

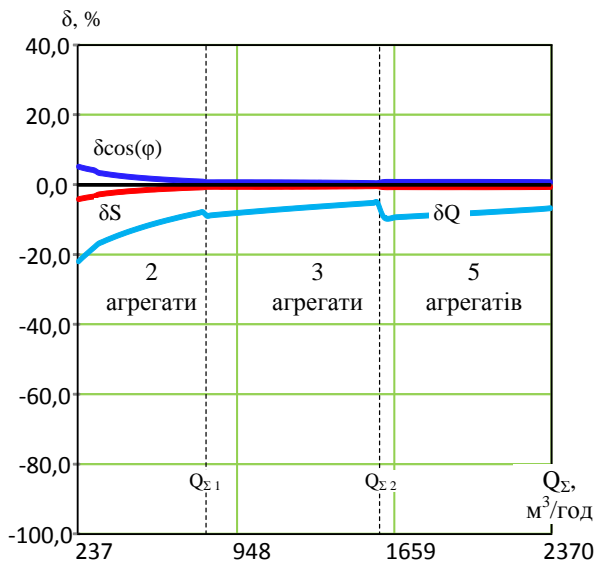


Рис. 4.88 Відсоткові зміни коефіцієнта потужності, реактивної та повної потужностей внаслідок переходу від B2.1 до B2.2

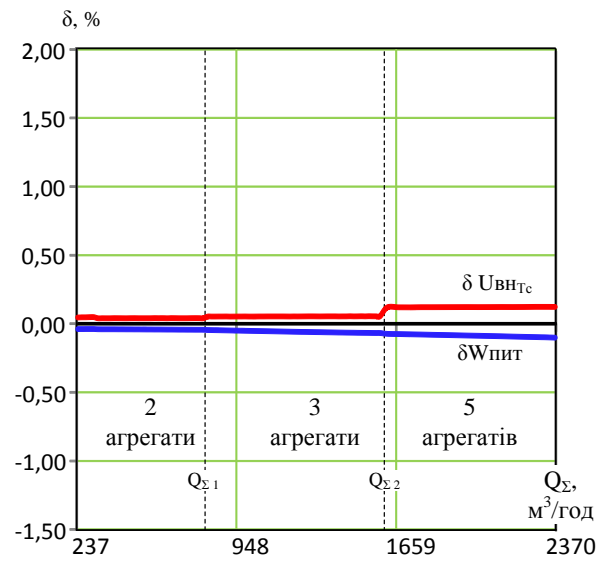


Рис. 4.89 Зміна відхилення напруги на шинах ВН Т_c ЕТК і відсоткова зміна питомої витрати електроенергії внаслідок переходу від B2.1 до B2.2

Аналіз отриманих результатів показує, що внаслідок переходу від B2 до B2.1 (рис. 4.84 та 4.85) усі показники суттєво покращуються, а саме:

- зростають коефіцієнт потужності й напруга U_{nc} на шинах ВН Тс ЕТК,
- знижуються питома витрата електроенергії на помпування одиниці об'єму рідини, реактивна та повна потужності.

Таблиця 4.27

Компенсування реактивної потужності

Кількість ВПТА		2	3	5
Номери ВПТА		1, 3	1, 3, 4	1, 2, 3, 4, 5
Номінальна реактивна потужність ПКП, квар	ПКП ₁₂	70	90	180
	ПКП ₃₄₅	0	650	1260
	ПКП ₃	740	740	740
Діапазон Q_{Σ} , м ³ /год		0..798	798.. 1597	понад 1597

Доцільність застосування ПКП₁₂ виникає під час роботи ЕТК з двома одночасно увімкненими ВПТА, коли об'ємна витрата робочої рідини складає менше, ніж 798 м³/год (слабке зниження споживання реактивної потужності, рис. 4.84). Суттєве зменшення споживання реактивної потужності в області малих витрат та покращення цього й решти показників в усіх діапазонах витрат внаслідок переходу від В2 до В2.2 відображено на рис. 4.86 і 4.87.

Порівняння між собою варіантів В2.1 і В2.2 (рис. 4.88 і 4.89) визначає В2.2 як кращий. Таким чином, можна зробити висновок про технічну доцільність застосування варіанту В2.2 (рис. 4.83, таблиця 4.27) компенсування реактивної потужності, що дозволяє максимально наблизити до одиниці коефіцієнт потужності в широкому діапазоні витрат робочої рідини. Однак, як вже було зазначено, остаточне рішення про встановлення ПКП₁₂ потребує окремого техніко-економічного обґрунтування. Загалом, обидва варіанти дозволяють суттєво підвищити коефіцієнт потужності шляхом зниження споживання реактивної потужності, а також підвищити напругу U_{nc} на шинах ВН Тс ЕТК і дещо зменшити питому витрату електроенергії на помпування одиниці об'єму рідини.

4.4.4 Раціональна схема живлення та система автоматичного керування електротехнічного комплексу "електропостачальна система – помпова станція"

Проведені розрахунки усталених режимів для різних варіантів керування, виконання ЕТК і компенсації реактивної потужності дають підстави вважати найкращим варіант В2.2.

Спроектований на основі результатів математичних досліджень, проведених за допомогою розробленої ММ, раціональний варіант схеми електропостачання й компенсації реактивної потужності зображено рис. 4.90.

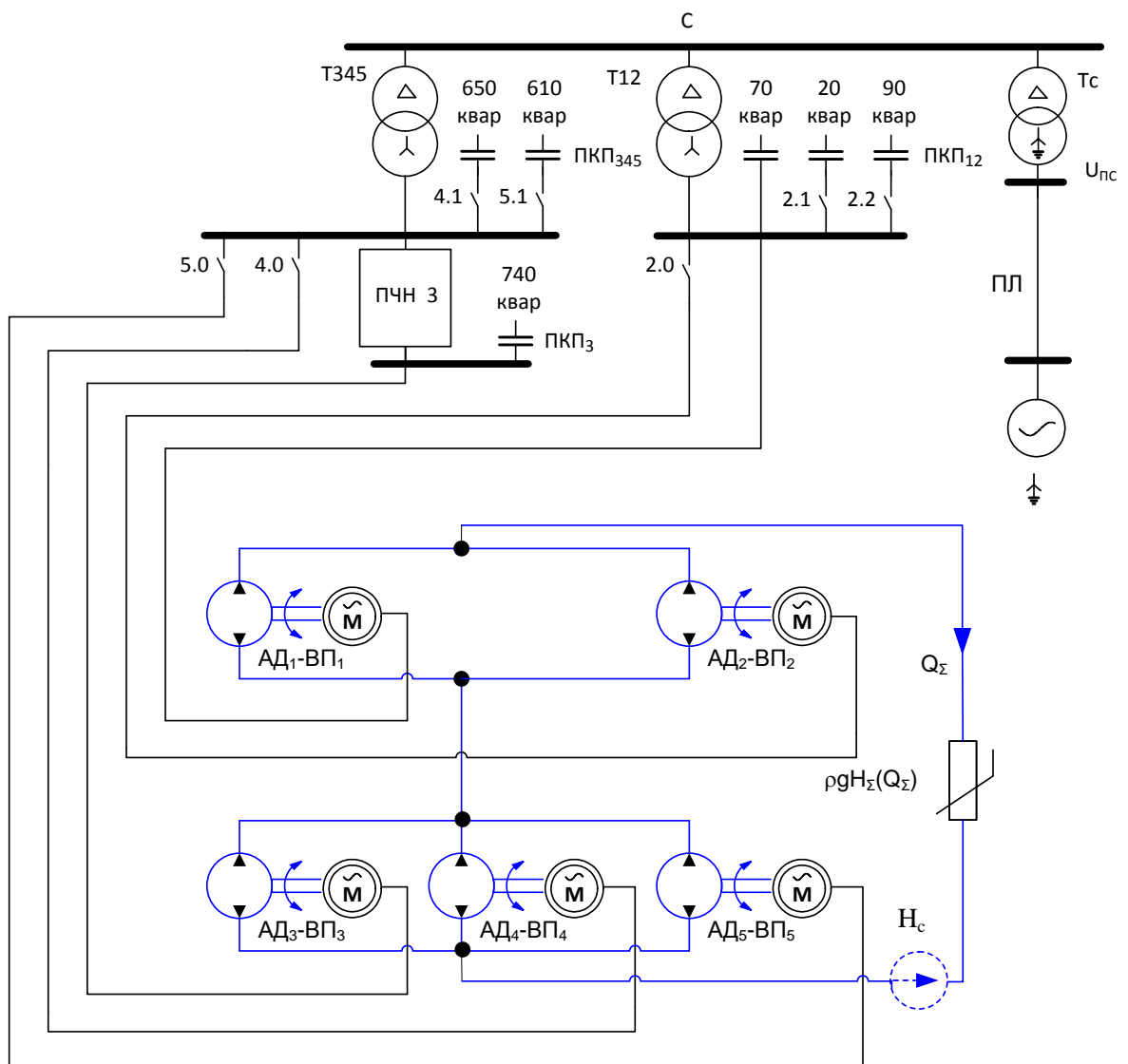


Рис. 4.90 Раціональна схема силових кіл живлення та компенсації реактивної потужності електротехнічного комплексу "електропостачальна система – помпова станція"

Комутаційними апаратами 2.0..5.1, показаними на цій схемі силових кіл, за створеним алгоритмом реалізується оперативна комутація електроприводних ВПТА і ПКП у функції поточного споживання робочої рідини.

У таблиці 4.28 наведено отриманий на основі комп'ютерних розрахунків стан силових комутаційних апаратів при поточному споживанні робочої рідини у трьох піддіапазонах: 0..798 м³/год, 798.. 1597 м³/год і понад 1597 м³/год.

Таблиця 4.28

Таблиця оперативних комутацій силових кіл живлення та компенсації реактивної потужності

Комут. апарат Q _Σ , м ³ /год	2.0	2.1	2.2	4.0	4.1	5.0	5.1
0..798	"Вим."	"Вим."	"Вим."	"Вим."	"Вим."	"Вим."	"Вим."
798.. 1597	"Вим."	"Увим."	"Вим."	"Увим."	"Увим."	"Вим."	"Вим."
понад 1597	"Увим."	"Увим."	"Увим."	"Увим."	"Увим."	"Увим."	"Увим."

На підставі розробленої силової схеми живлення електроприводних ВПТА, підключення комутаційних апаратів (рис. 4.90) і таблиці 4.28 комутації цих агрегатів і ПКП розроблено функціональну схему замкненої системи автоматичного керування режимами помпування робочої рідини (рис. 4.91) та алгоритм її функціонування (рис. 4.92). Ними забезпечуються найкращі з досліджених схем та алгоритмів керування показники електротехнологічної ефективності ЕТК (рис. 4.86..4.89).

Тут доцільно зазначити, що розроблені схема й алгоритм забезпечують ефективну роботу ЕТК у діапазоні 237.. 2370 м³/год витрат робочої рідини. Менші, ніж 237 м³/год витрати призводять до різкого зростання питомої витрати електроенергії та погіршення інших показників. Зростання витрати понад 2370 м³/год призведе до зниження тиску на виході ПС. Режими роботи ЕТК поза межами діапазону витрат 237.. 2370 м³/год не розглядаються.

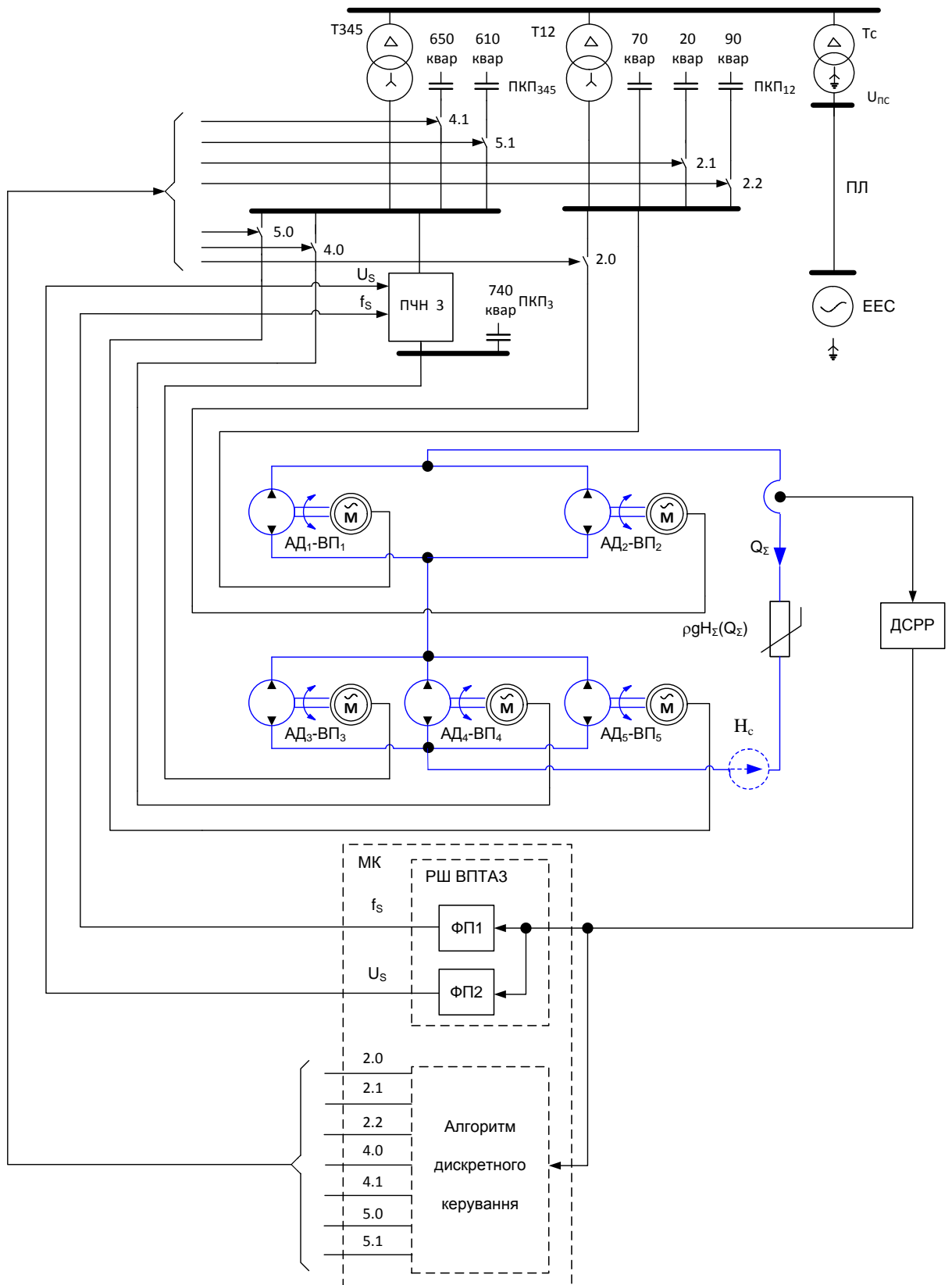


Рис. 4.91 Функціональна блок-схема системи автоматичного керування режимами помпування робочої рідини за варіантом В2.2 електротехнічного комплексу "електропостачальна система – помпова станція"

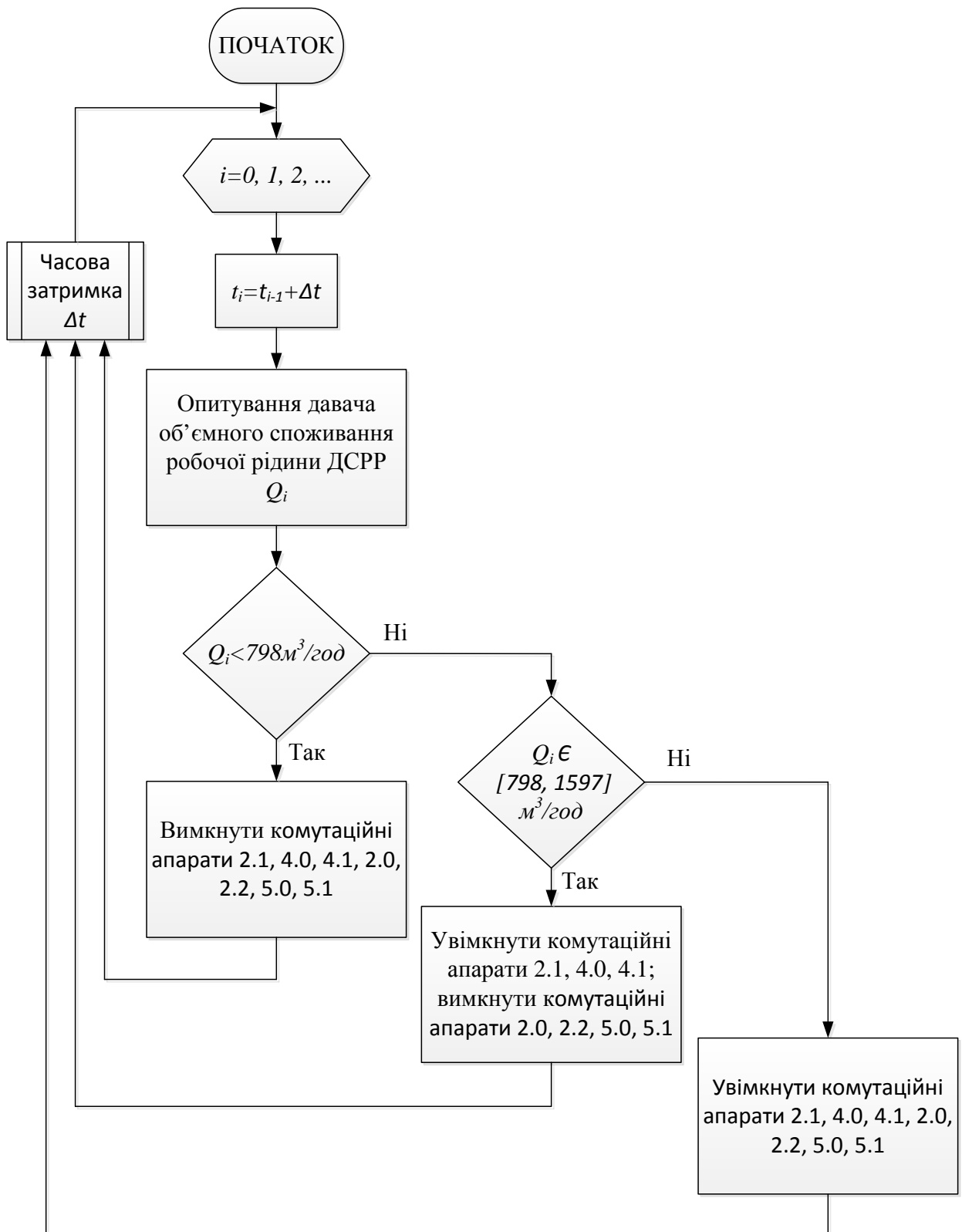


Рис. 4.92 Алгоритм дискретного автоматичного керування (ввімкнення/вимкнення) електроприводними ВПТА і ПКП за варіантом В2.2 електротехнічного комплексу "електропостачальна система – помпова станція"

Розроблену модель САК помпування робочої рідини запропоновано реалізувати на мікропроцесорному пристрої МК (рис. 4.91). Для оперативного непрямого контролю тиску робочої рідини на виході ПС встановлено давач споживання робочої рідини ДСРР. На його виході отримується усереднене на $i-1$ інтервалі часової дискрети (кроку) Δt формування вектора керування системи значення Q_i поточного споживання робочої рідини. Воно подається на аналоговий вхід мікропроцесора МК. У функції цього сигналу на першому та другому виходах формуються аналогові (неперервні) сигнали скалярного керування швидкістю частотно керованого електроприводного ВПТА 3 (АД₃-ВП₃) – сигнал задання частоти f_s і напруги U_s відповідно, які поступають на перетворювач частоти й напруги ПЧН 3. Отримані за допомогою створеної ММ графічні залежності статичних моделей формування цих сигналів у функції поточного значення Q_i споживання робочої рідини показано на рис. 4.71 і 4.72 відповідно. Ці залежності синтезованого раціонального закону скалярного керування $U_{s*} = \omega_{s*} \sqrt{M_{em*}}$ згідно (2.230) відтворюються в двох функціональних перетворювачах ФП1 і ФП2 реалізованого в мікроконтролері регулятора швидкості РШ частотно керованого електроприводного помпувального агрегату ВПТА 3.

Дискретні керуючі сигнали комутаційних апаратів 2.0, 2.1, 2.2, 4.0, 4.1, 5.0, 5.1 формуються згідно отриманого алгоритму (рис. 4.92) у функції поточної витрати робочої рідини Q_i в блоці дискретного (логічного) керування мікроконтролера, в якому програмно реалізується цей алгоритм.

Синтезований алгоритм дискретного керування (увімкнення/вимкнення) помповими агрегатами і ПКП відповідає отриманій таблиці 4.28 оперативних перемикачів. Отримання необхідного значення часової дискрети Δt синтезу оперативного циклічного вектора керування є окремою задачею; воно здійснюється за результатами дослідження динаміки зміни витрати Q_i .

Електротехнологічна доцільність реалізації розробленої моделі САК режимами помпування робочої рідини підтверджується згідно схемного

варіанту В2.2 і алгоритму (рис. 4.92), що йому відповідає, зображеними на рис. 4.93..4.96 функціональними кривими найважливіших показників режимів роботи ЕТК. Тут же наведені аналогічні криві для схемного варіанту В0 (тонкі лінії), що дає змогу порівняти між собою ці варіанти.

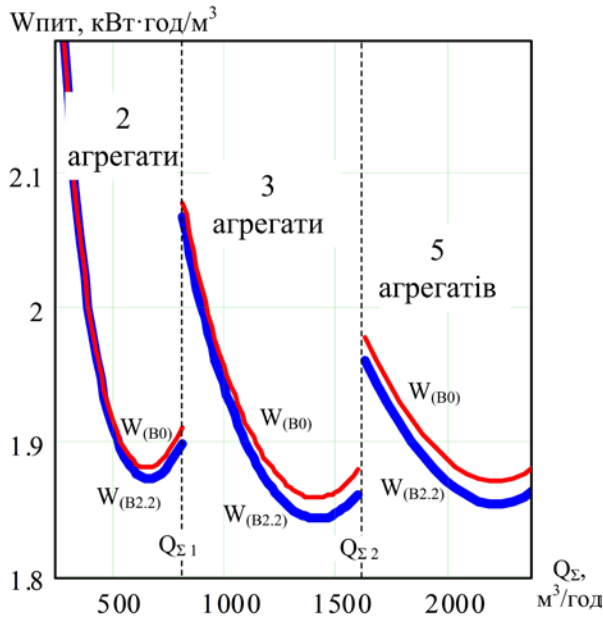


Рис. 4.93 Питомі витрати електроенергії ЕТК ($H_2=470,0$ м)

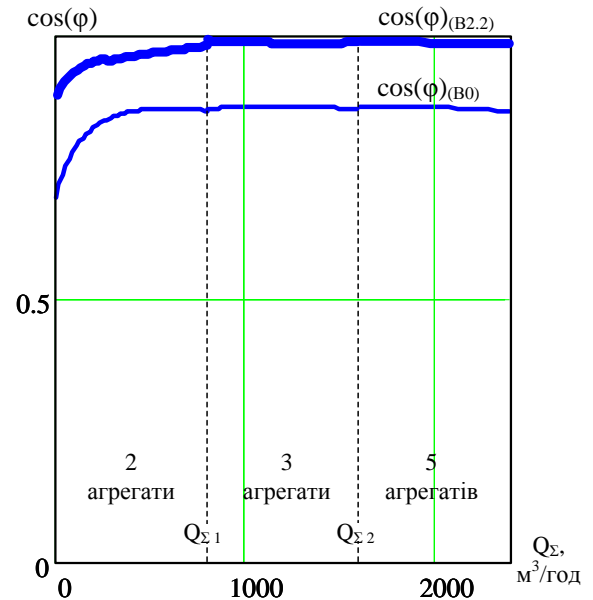


Рис. 4.94 Коефіцієнт потужності ЕТК

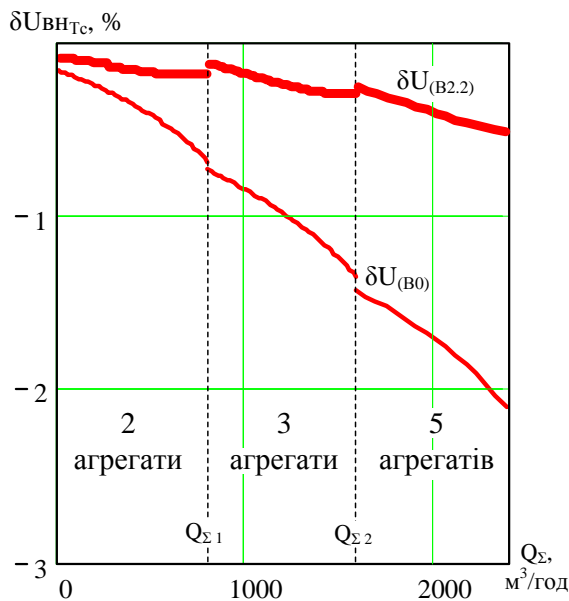


Рис. 4.95 Відхилення напруги $U_{\text{пс}}$ на шинах ВН трансформатора T_c ЕТК

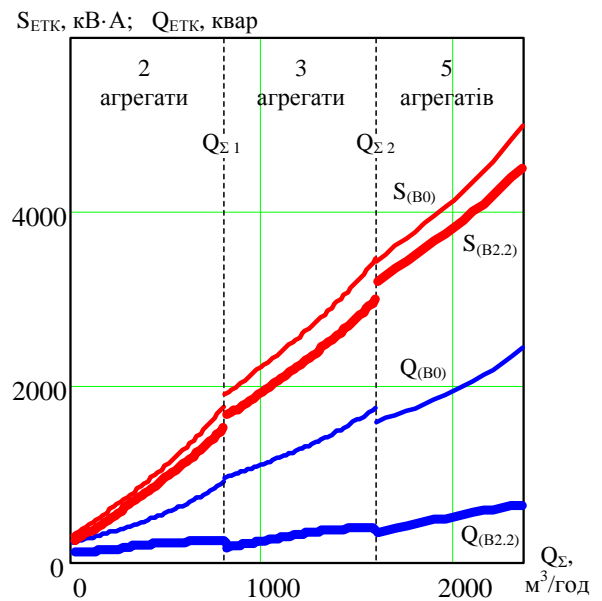


Рис. 4.96 Повна та реактивна потужності ЕТК

Із графіків можна зробити висновок про покращення цих показників, особливо – з наближенням до номінального режиму роботи. У середньому за графіками: питомі витрати електроенергії зменшуються на 0,68 %, коефіцієнт потужності ЕТК збільшується на 14,6 %, відхилення напруги на шинах ВН трансформатора T_c зменшується на 72,5 %, споживані повна й реактивна потужності ЕТК зменшуються на 13,3 % та 73,2 % відповідно.

4.5 Висновки до розділу 4

Перевірено адекватність математичної моделі шляхом симулювання на цифровій моделі усталених режимів натурального об'єкта. Отримані результати показують достатню збіжність результатів моделювання й технологічних показників усталених режимів. На цій підставі математичну модель усталених режимів узагальненого електротехнічного комплексу "електропостачальна система – помпова станція" довільної конфігурації реалізовано у вигляді окремих цифрових моделей для низки варіантів виконання ЕТК конкретної конфігурації.

За допомогою реалізованих моделей здійснено розрахунки усталених режимів ЕТК як з некерованими, так і з частотно керованими агрегатами. Шляхом наведення графічних залежностей низки основних координат режиму від об'ємної витрати робочої рідини продемонстровано широкі можливості застосування створеної моделі для аналізу усталених режимів різних варіантів виконання ЕТК. Продемонстровано застосування ММ для вибору доцільного варіанту виконання ЕТК, покращення режимів його роботи, а також для розроблення мікропроцесорної системи керування.

Обґрунтовано структуру системи дискретно-неперервного автоматичного керування режимами електротехнічного комплексу "електропостачальна система – помпова станція" конкретної конфігурації та алгоритм його функціонування. Проведені модельні дослідження підтвердили комплексне покращення показників ЕТК внаслідок реалізації розробленої моделі системи автоматичного керування раціональною схемою силових кіл живлення та компенсації реактивної потужності ЕТК.

ВИСНОВКИ

У дисертації вирішена актуальна наукова задача удосконалення методів аналізу режимів роботи електротехнічних комплексів з керованими помповими станціями, що дозволило сформувавши математичну модель узагальненого комплексу шляхом композиції моделей нерозривно пов'язаних між собою його підсистем різної фізичної природи для дослідження усталених режимів таких об'єктів з метою підвищення енергоефективності їхнього функціонування.

З виконаних досліджень випливають такі висновки:

1. На даний час немає ефективного засобу аналізу усталених режимів роботи узагальненого електротехнічного комплексу "електропостачальна система – помпова станція", який би дозволяв безпосередньо враховувати взаємний вплив гідравлічних і електромагнітних параметрів і координат режимів, оперуючи безпосередньо їхніми внутрішніми фізичними параметрами.
2. Створення математичної моделі усталених режимів узагальненого електротехнічного комплексу "електропостачальна система – помпова станція" шляхом композиції моделей нерозривно пов'язаних між собою його підсистем дозволило одержати ефективний засіб для прогнозування та дослідження усталених режимів роботи таких об'єктів з метою підвищення енергоефективності їхнього функціонування. Модель дозволяє розраховувати довільні енергетичні, електромагнітні та гідравлічні координати режиму, досліджувати їхній взаємний вплив, оцінювати на цій підставі стан як окремих елементів агрегатів, так і агрегатів у цілому з довільним ступенем деталізації.
3. Неможливість представлення у загальному випадку відцентрової помпи у вигляді момента опору з "вентиляторною" механічною характеристикою доводить необхідність аналізу електроприводних ВПТА як єдиного цілого без декомпозиції на електричну та гідравлічну частини.
4. Розроблений метод розрахунку розподілу робочої рідини між гідравлічно сполученими агрегатами дозволяє отримувати функції керування агрегатами з неузгодженими номінальними гідравлічними параметрами.

5. Створена модель може бути використана як під час проектування ЕТК для вибору раціонального варіанту його виконання, так і для прогнозування й аналізу режимів роботи діючого ЕТК під час його експлуатації, одержання алгоритму та схеми керування ЕТК з метою покращення його показників.
6. Створена математична модель усталених режимів узагальненого електротехнічного комплексу "електропостачальна система – помпова станція" може бути використана як основа для розроблення спеціалізованого програмного забезпечення у складі автоматизованих систем проектування.
7. Обґрунтовано структуру системи дискретно-неперервного автоматичного керування режимами ЕТК конкретної конфігурації та алгоритм його функціонування. Проведені модельні дослідження підтвердили комплексне покращення показників ЕТК внаслідок реалізації розробленої моделі системи автоматичного керування раціональною схемою силових кіл живлення та компенсації реактивної потужності ЕТК.
8. Узагальненість і формалізація, досягнуті під час формування розробленої математичної моделі, показують доцільність подальших досліджень з метою створення математичної моделі перехідних процесів, а також – з метою її адаптації до компресорних станцій.
9. Достовірність отриманих результатів підтверджується математичним обґрунтуванням розробленої моделі, відповідністю отриманих результатів положенням загальних теорій гідравлічних і електричних кіл, електроприводу та електротехніки, збіжністю результатів математичного експерименту з технологічними показниками режиму натурального об'єкта.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Абакумов А. М. Анализ экономической эффективности внедрения частотно-регулируемых электроприводов переменного тока для насосных агрегатов НПЗ / А. М. Абакумов, Д. В. Плешаков // Вестн. Самар. гос. техн. ун-та. – 2008. – № 2 (22). – С. 138–143.
2. Абдулла Ибрагим, Мослем Аль-Удейнат Моделирование и оптимизация режимов работы синхронных электродвигателей крупных насосных станций : автореф. дис. на соискание науч. степени канд. техн. наук : спец. 05.09.03 “Электротехнические комплексы и системы” / Ташкентский Государственный технический университет им. Абуракмана Беруни. – Ташкент, 1998. – 22 с.
3. Агафонов А. И. Высоковольтный преобразователь частоты в электроприводе насоса / А. И. Агафонов // Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика : зб. наук. пр. Дніпродзержинського держ. техн. ун-ту (тех. науки) : темат. вип. – Днепродзержинск. – 2007. – С. 318–319.
4. Алексеев В. Ю. Снижение потерь электроэнергии в сети при замене нерегулируемого привода центробежных насосов на частотно-регулируемый [Электронный ресурс] / В. Ю. Алексеев, О. В. Кабаргина, В. А. Шабанов // Нефтегазовое дело. – Уфа, 2010. – Режим доступа : http://www.ogbus.ru/authors/AlekseevVY/AlekseevVY_1.pdf. – Назва з екрана.
5. Алексеева Ю. А. Требования к построению системы энергоуправления насосным комплексом [Электронный ресурс] / Ю. А. Алексеева, Т. В. Коренькова // Електромеханічні і енергозберігаючі системи : наук.-виробн. журн. – 2010. – Вип. 2/2010. – С. 17–23. – Режим доступа : http://www.nbu.gov.ua/portal/natural/Ees/2010_2/17.pdf. – Назва з екрана.
6. Алексеева Ю. А. Энергетическая эффективность регулируемого насосного агрегату при стабилизации технологического параметра / Ю. А. Алексеева, Т. В. Коренькова // Вісник Кременчуцького держ. політехн. ун-ту

- ім. М. Остроградського. – Кременчук, 2007. – Вип. 3(44). – Ч. 2. – С. 107–111.
7. Алексенко О. В. Реалізація комплексної моделі відцентрового насоса на базі його макромоделі / О. В. Алексенко // Вісник СумДУ. Тех. науки. – Суми, 2007. – № 1. – С. 5–14.
8. Алхимов Д. Н. Математическая модель системы управления давлением в диктующей точке гидравлической схемы с использованием метода дросселирования / Д. Н. Алхимов, Г. Г. Гоппе ; ред. А.П. Хоменко, Ю.Ф. Мухопода // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование : сб. науч. труд. – Иркутск: изд-во ИрГУПС, 2008. – Вып. 4. – С. 80–86.
9. Андронов А. Л. Обоснование энергоэффективных режимов частотно-регулируемых электроприводов в агропромышленном комплексе : автореф. дис. на соискание науч. степени канд. техн. наук : спец. 05.20.02 “Электротехнологии и электрооборудование в сельском хозяйстве” / Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова. – Барнаул, 2005. – 24 с.
10. Андронов А. Л. Особенности работы центробежных насосов и требования к их электроприводу / А. Л. Андронов // Электрификация и теоретические основы электротехники. Ползуновский альманах. – 2004. – № 1 – С. 150–152.
11. Архангельский Б. И. Аналитическое выражение кривой намагничивания электрических машин / Б. И. Архангельский // Электричество, 1950. – №3.
12. Бабакин В. И. Анализ режимов работы частотно-регулируемого электропривода магистрального нефтепровода / В. И. Бабакин // Электротехнологии, электропривод и электрооборудование предприятий: II Всероссийская науч.-техн. конф. : сб. науч. тр. : в 2 т. – Уфа: Изд-во УГНТУ. – 2009. – Т. 1. – С. 44–49. – ISBN 978-5-7831-0867-9.
13. Беспалов В.Я. Перспективы создания отечественных электродвигателей нового поколения для частотно регулируемого электропривода / В.Я. Беспалов // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2006. – № 3. – С. 3–14.
14. Богданов А. А. Оптимизация регулятора широтно-импульсной системы

управления электропривода вентиляционной установки автономного объекта : автореф. дис. на соискание науч. степени канд. техн. наук : спец. 05.09.03 “Электротехнические комплексы и системы” / Томский политехнический университет. – Томск, 2007. – 20 с.

15. Бойко В. С. Проблеми та напрямки підвищення енергоефективності насосного устаткування у системах водопостачання / В. С. Бойко, М. І. Сотник, І. М. Сотник // Вісник Кременчуцького держ. політехн. ун-ту ім. М. Остроградського. – Кременчук, 2007. – Вип. 3(44). ч. 2. – С. 118–121.

16. Борисенко В. П. Реалізація енергозберігаючої системи електроприводу для багатопомпувальної станції ДПВЗ / В. П. Борисенко, С. В. Григор'єв, В. П. Овсянніков О. В. Головін // XIII міжнародна науч.-техн. конф. «Машиностроение и техносфера XXI века» : сб. тр. в 2т. – Севастополь, 2006. – Т. 1. – С. 138–140.

17. Бородацкий Е. Г. Разработка системы управления взаимосвязанным электроприводом центробежных турбомеханизмов станции перекачки жидкости : автореф. дис. на соискание науч. степени канд. техн. наук : спец. 05.09.03 “ Электротехнические комплексы и системы, включая их управление и регулирование ” / Омск, 1999. – 18 с.

18. Бочарников В. Ф. Погружные скважинные центробежные насосы с электроприводом : учеб. пособие / В. Ф. Бочарников. – Тюмень : Вектор Бук, 2003. – 335 с.

19. Браславский И. Я. Энергосберегающий асинхронный электропривод / И. Я. Браславский, З. Ш. Ишматов, В. Н. Поляков. – М.: Академия, 2004. – 256 с.

20. Бур'ян С. О. Двоканальна екстремальна електромеханічна система автоматичного керування насосною установкою / С. О. Бур'ян, Т. В. Грищук // Вісник Нац. техн. ун-та "Харьковский политехнический институт". – Х. : НТУ «ХП», 2010. – № 28. – С. 176–179.

21. Бур'ян С. О. Двоканальна екстремальна електромеханічна система автоматичного керування паралельно з'єднаними насосами водопостачання / С. О. Бур'ян // Проблеми енергоресурсозбереження в електротехнічних

системах. Наука, освіта і практика : наук. вид. – Кременчук : КНУ, 2011. – Вип. 1/2011 (1). – с.160–161.

22. Бур'ян С. О. Дослідження моделі відцентрового насосу у пакеті SIM HYDRAULICS / С. О. Бур'ян, С. В. Ульяновченко, О. В. Кононський // Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації : VIII Всеукраїнської науково-технічної конференції молодих учених і спеціалістів, Кременчук, 08-09 квітня 2010 : зб. наук. пр. – Кременчук : КНУ, 2010. – С. 160–162.

23. Бур'ян С. О. Екстремальна система керування сумарними втратами з частотно-регульованим асинхронним електроприводом [Електронний ресурс] / С. О. Бур'ян, Т. В. Грищук // Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації : VIII Всеукраїнська наук.-техн. конф. молодих учених і спеціалістів, Кременчук, 08-09 квітня 2010 : зб. наук. пр. – Кременчук : КДУ, 2010. – С. 191–193. – Режим доступу : http://so-buryan.edu.kpi.ua/attachments/stud_2010_2.pdf. – Назва з екрана.

24. Бур'ян С. О. Исследование электромеханической системы автоматического управления центробежным насосом в пакете Sym Hydraulics [Електронний ресурс] / С. О. Бур'ян, С. В. Ульяновченко, О. В. Кононський // Сучасні проблеми електротехніки та автоматики : міжнародн. наук.-тех. конф. молодих учених, аспірантів та студентів : доп. за матер. – К. : «Політехніка», 2009. – Т. 2. – С. 197–199. – Режим доступу : http://so-buryan.edu.kpi.ua/attachments/063_Stud_2009_5.pdf. – Назва з екрана.

25. Бур'ян С. О. Оцінювач коефіцієнта корисної дії насосу на основі нейронної мережі та каталожних характеристик / С. О. Бур'ян, Т. В. Грищук // Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації : IX Міжнародна наук.-техн. конф. молодих учених і спеціалістів, Кременчук, 07-08 квітня 2011 : зб. наук. пр. – Кременчук : КНУ, 2011. – С. 97–98.

26. Бур'ян С. О. Екстремальні енергоефективні електромеханічні системи автоматизації багатоагрегатних насосних установок : автореф. дис. на

здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.09.03 “Електротехнічні комплекси та системи” / МОНмолодьспорт, Нац. техн. унт України "Київ. політехн. інт". – Київ, 2012. – 20 с.

27. Бур'ян С. О. Визначення границь роботи екстремального енергоефективного алгоритму для послідовного з'єднання насосів за відсутності реакції споживачів [Електронний ресурс] / С. О. Бур'ян, Т. В. Грищук // Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики : Міжнародна наук.-техн. конф. молодих учених, аспірантів і студентів : доп. за матер. – К. : «Політехніка», 2010. – С. 320–322. – Режим доступу : http://www.so-buryan.edu.kpi.ua/attachments/2010_1.pdf. – Назва з екрана.

28. Бур'ян С. О. Екстремальна електромеханічна система керування паралельно з'єднаними насосами водопостачання / С. О. Бур'ян, Т. В. Грищук // Радіоелектроніка, інформатика, управління. – Запоріжжя : ЗНТУ, 2011. – № 2. – С. 153–162.

29. Бур'ян С. О. Моделювання системи керування продуктивністю відцентрової насосної установки за умов зміни гідравлічного опору мережі / С. О. Бур'ян, О. О. Білецький // Електромеханічні системи, методи моделювання та оптимізації : VII Всеукраїнська наук.-техн. конф. молодих учених і спеціалістів, Кременчук, 2-4 квітня 2009 : зб. наук. пр. – Кременчук : КДПУ, 2009. – С. 96-98.

30. Валов А. В. Импульсно-векторное управление асинхронным электроприводом с фазным ротором : автореф. дис. на соискание науч. степени канд. техн. наук : спец. 05.09.03 “Электротехнические комплексы и системы” / Южно-Уральский государственный университет. – Челябинск, 2009. – 20 с.

31. Ведерников В. А. Модели и методы управления режимами работы и электропотреблением погружных центробежных установок : автореф. дис. на соискание науч. степени д-ра. техн. наук : спец. 05.13.06 “Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (по техническим наукам)” / Тюмен. гос. нефтегазовый ун-т. – Тюмень, 2006. – 32

с.

32. Вейгнер А. М. Регулируемый синхронный электропривод / А. М. Вейгнер. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 224 с.
33. Вечеркин М. В. Разработка и исследование пускорегулирующих устройств высоковольтного электропривода вентиляторной станции : автореф. дис. на соискание науч. степени д-ра. техн. наук : спец. 05.09.03 “Электротехнические комплексы и системы” / Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова. – Тюмень, 2006. – 17 с.
34. Виноградов А. Автоматизация насосной станции с применением частотно-регулируемого электропривода [Электронный ресурс] / А. Виноградов, А. Сибирцев, И. Колодин // Силовая электроника. – 2006. – №2. С. 20–23. – Режим доступа : http://www.power-e.ru/pdf/2006_02_20.pdf. –Назва з екрана.
35. Виноградов А. Б. Векторное управление электроприводами переменного тока / А. Б. Виноградов. – ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2008. – 298 с.
36. Виноградов А. Б. Учет потерь встали, насыщения и поверхностного эффекта при моделировании динамических процессов в частотно-регулируемом асинхронном электроприводе / А. Б. Виноградов // Электротехника. – 2005. – №5. С. 57–61.
37. Вихарев А. Н. Режимы движения, уравнение Бернулли, потери напора, каналы: Учебное пособие. / А. Н. Вихарев, И. И. Долгова. — Архангельск: Изд-во АГТУ, 2001. —92с. — ISBN: 5-261-00060-2.
38. Внедрение преобразователей частоты на насосных станциях. Технико-экономическое обоснование [Электронный ресурс] / ЗАО «Комбарко». – М., 2008. – 37 с. – Режим доступа : <http://ugpromsnab.ru/upload/files/articles/vnedrenie-preobrazovatelei-chastoty-obosnovanie.pdf>. – Назва з екрана.
39. Волков А. В. Математическая модель общих потерь мощности в

- частотно-регулируемом асинхронном электроприводе / А. В. Волков, Ю. С. Скалько // *Електротехніка та електроенергетика*. – 2006. – № 2. – С. 22–27.
40. Вольдек А. И. Электрические машины. Учебник для студентов высш. техн. учебн. заведений / А. И. Вольдек. – [3-е изд. перераб.]. – Л. : Энергия, 1978. – 832 с.: ил.
41. Гармаш В. С. Определение параметров схем замещения асинхронных двигателей из динамических режимов / В. С. Гармаш // *Наукові праці Донецького національного технічного університету*. – Донецьк, 2009. – № 9(158). – С. 169–172.
42. Гоголюк П. Ф. Влияние параметров насосов агрегатов АД–ЦН с параллельным соединением насосов на их установившиеся режимы / П. Ф. Гоголюк, В. Г. Лысяк // *Энергетика и ТЭК*. – Республика Беларусь, г. Минск, 2016. – № 3. – С. 22–24. – ISSN: 1990-6633.
43. Гоголюк П. Ф. Вплив функцій частотного керування на ефективність режимів електропостачальної системи помпової станції / П. Ф. Гоголюк, В. Г. Лисяк // *Вісник Приазовського державного технічного університету*. – 2008. – Вип. № 18. – Ч. 2. – С. 76–80.
44. Гоголюк П. Ф. Математичне моделювання режимів агрегату: асинхронний двигун – відцентрова помпа з автоматичною системою керування / П. Ф. Гоголюк, В. Г. Лисяк // *Вісник Нац. ун-ту "Львівська Політехніка"*. – 2007. – № 596. – С. 79–85.
45. Гоголюк П. Ф. Математичне моделювання усталених режимів вузла навантаження електропостачальної системи з блочним помповим агрегатом / П. Ф. Гоголюк, Т. М. Гречин, В. Г. Лисяк // *Вісник Нац. ун-ту "Львівська Політехніка"*. – 2009. – № 654. – С. 58–64.
46. Гоголюк П. Ф. Математичне моделювання усталених режимів групи агрегатів – асинхронний двигун-відцентрова помпа з послідовним сполученням гідротрактів помп / П. Ф. Гоголюк, В. Г. Лисяк, В. С. Костишин // *Вісник Нац. ун-ту "Львівська Політехніка"*. – 2003. – № 485. – С. 30–44.
47. Гоголюк П. Ф. Математичне моделювання усталених режимів групи

агрегатів – асинхронний двигун – відцентрова помпа з паралельним сполученням гідротрактів pomp / П. Ф. Гоголюк, В. Г. Лисяк, В. С. Костишин // Вісник Нац. ун-ту "Львівська Політехніка". – 2005. – № 544. – С. 47–53.

48. Гоголюк П. Ф. Математичне моделювання усталених режимів електроприймача – асинхронний двигун – відцентрова помпа / П. Ф. Гоголюк, В. Г. Лисяк, В. С. Костишин // Вісник Нац. ун-ту "Львівська Політехніка". – 2003. – № 479. – С. 58–67.

49. Гоголюк П. Ф. Метод розрахунку розподілу об'ємних витрат і напорів групи агрегатів – асинхронний двигун – відцентрова помпа / П. Ф. Гоголюк, В. Г. Лисяк, В. С. Костишин // Вісник Нац. ун-ту "Львівська Політехніка". – 2006. – № 563. – С. 27–34.

50. Голубовский А. В. Оптимизация режимов работы синхронных двигателей в узлах нагрузки систем электроснабжения компрессорных станций магистральных газопроводов : автореф. дис. на соискание науч. степени канд. техн. наук : спец. 05.09.03 "Электротехнические комплексы и системы" / Самарский государственный технический университет. – Самара, 2008. – 19 с.

51. Гоппе Г. Г. Методы и технические средства энерго- и ресурсосберегающего управления турбомеханизмами : автореф. дис. на соискание науч. степени д-ра техн. наук : спец. 05.13.06 "Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (по техническим наукам)" / ГОУ ВПО «Иркутский государственный технический университет». – Иркутск, 2009. – 43 с.

52. Гоппе Г. Г. Сравнение совместных энергетических потерь в технологическом комплексе турбомеханизм-трубопроводная магистраль при двух способах управления его производительностью / Г. Г. Гоппе ; ред. А.П. Хоменко, Ю.Ф. Мухопода // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование : сб. науч. труд. – Иркутск: изд-во ИрГУПС, 2008. – Вып. 4. – С. 100-107.

53. Горбань Р. Н. Современный частотно-регулируемый электропривод / Р.

- Н. Горбань, А. Т. Янукович. – Санкт-Петербург : Изд-во Санкт-Петербургская Электротехническая Компания, 2002. – 94 с.
54. Горбійчук М. І. Математична модель трубопроводу системи автоматичного керування процесом компримування природного газу / М. І. Горбійчук, М. І. Когутяк, О. Б. Василенко // Нафтогазова енергетика. – Івано-Франківськ, 2009. – № 2. – С. 40–46.
55. Грабко В. В. Вдосконалення роботи насосної станції водопостачання / В. В. Грабко, М. М. Мошноріз // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2006. – № 6. – С. 124.
56. Гриценко К. Г. Автоматизоване енергозберігаюче управління насосною станцією системи водопостачання : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.13.07 “Автоматизація процесів керування” / Донецький національний технічний університет. – Донецьк, 2002. – 15 с.
57. Гриценко К. Г. Энергоэффективный метод дискретно-непрерывного управления насосными станциями системы водоснабжения [Электронный ресурс] / К. Г. Гриценко, В. Д. Червяков // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2005. – № 6/2 (18). – С. 4–8. – Режим доступа : <http://dspace.uabs.edu.ua/handle/123456789/779>. – Назва з екрана.
58. Дарьенков А. Б. Асинхронный частотно-регулируемый электропривод на базе НПЧЕ для турбомеханизмов : автореф. дис. на соискание науч. степени канд. техн. наук : спец. 05.09.03 “Электротехнические комплексы и системы” / Нижегород. гос. техн. ун-т. – Н. Новгород, 2003. – 21 с.
59. Денисенко К. І. Як отримати максимальну економію електроенергії на насосних станціях? [Електронний ресурс] / К. І. Денисенко, А. Л. Дорошенко, С. Й. Поліщук, І. С. Кутрань // Вода і водоочисні технології. – 2010. – №7-8. – С. 10–16. – Режим доступу : http://www.nbuuv.gov.ua/portal/natural/Ees/2010_2/17.pdf. – Назва з екрана.
60. Дэннис Дж., мл. Численные методы безусловной оптимизации и решения нелинейных уравнений / Дж. Дэннис, мл., Р. Шнабель ; пер. с англ. О. П. Бурдакова ; ред. Ю. Г. Евтушенко. – М. : Мир, 1988. – 440 с.

61. Есаулов А. О. Моделирование систем управления нефтепроводами [Электронный ресурс] / А. О. Есаулов, И. В. Текшева // Трубопроводный транспорт нефти. – № 08-2010. – Режим доступа: <http://www.vipstd.ru/journal/content/view/500/39/>. – Назва з екрана.
62. Завьялов В. Е. Моделирование системы "асинхронный двигатель - центробежный насос" на основе электромеханических и электрогидравлических аналогий : автореф. дис. на соискание науч. степени канд. техн. наук : спец. 05.09.05 "Теоретическая электротехника" / Омский государственный технический университет. – Омск, 2005. – 19 с.
63. Зайцев А. И. Регулируемый электропривод и его роль в энергосбережении / А. И. Зайцев, Ю. С. Лядов // Электротехнические комплексы и системы управления. – 2006. – № 2. – С. 35–37.
64. Залуцкий Э. В. Критерии рационального использования энергии в насосных станциях [Электронный ресурс] / Э. В. Залуцкий // Экологические системы : электронный журнал энергосервисной компании. – Кременчуг, 2004. – № 11. – С. 13–16. – Режим доступа : http://escoecosys.narod.ru/2004_11/art39.htm. – Назва з екрана.
65. Заячук Я. І. Оптимальне керування газоперекачувальними агрегатами компресорних станцій з урахуванням їхніх технічного стану : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.13.07 "Автоматизація процесів керування" / Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу. – Івано-Франківськ, 2009. – 21 с.
66. Идельчик И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / И. Е. Идельчик; под ред. М. О. Штейнберга.– [3-е изд., перераб. и доп.]. – М. : Машиностроение, 1992. – 672 с.: ил.
67. Ильинский Н. Ф. Энергосбережение в электроприводе / Н. Ф. Ильинский, Ю. В.Рожанковский, А. О. Горнов. – М.: Высш. шк..., 1989. – 127 с.
68. Кабаргина О. В. Представление механических характеристик магистральных насосов НПС аналитическими выражениями / О. В.

Кабаргина, В. А. Шабанов, А. Р. Калимгулов // Электротехнологии, электропривод и электрооборудование предприятий: II Всероссийская науч. техн. конф. : сб. науч. тр. : в 2 т. – Уфа : Изд-во УГНТУ, 2009. – Т. 1. – С. 18–22. – ISBN 978-5-7831-0867-9.

69. Кади-Оглы Е. Ф. Сравнительный анализ и оценка эффективности способов регулирования погруженных асинхронных двигателей : автореф. дис. на соискание науч. степени канд. техн. наук : спец. 05.09.01 “Электромеханика и электрические аппараты” / Гос. техн. ун-т. – Санкт-Петербург, 2002. – 16 с.

70. Калинов А. П. Характеристики асинхронных двигателей с учетом нелинейности кривой намагничивания / А. П. Калинов, В. А. Огарь // Электромашинобуд. та електрообладн. Пробл. автомат. електропривода. Теорія і практика : міжвід. наук.-техн. зб. – 2006. – Вип. 66. – С. 226–229.

71. Карелин В.Я. Насосы и насосные станции : Учеб. для вузов / В.Я. Карелин, А.В. Минаев.– [2-е изд., перераб. и доп.]. – М. : Стройиздат, 1986. – 320 с. : ил.

72. Качур О. С. Порівняльний аналіз систем керування частотно-керованим електроприводом магістрального насосу / О. С. Качур, Д. О. Кулагін, П. Д. Андрієнко // Проблеми автоматизированного електропривода. Теорія і практика : вестник Нац. техн. ун-та "Харьковский политехнический институт". – Х., 2008. – Вып. 30. – С. 262–264.

73. Квашнин В. О. Методика аналитического определения характеристик асинхронного двигателя / В. О. Квашнин // Проблемы создания новых машин и технологий : сб. науч. тр. Кременч. гос. политехн. ун-та. – 2000. – Вып. 1(8). – С. 143–145.

74. Кириллов О. Л. Моделирование процесса управления системой перегрузки углеводородных жидких топлив / О. Л. Кириллов, Г. С. Якимчук // Автоматика. Автоматизация. Электротехнические комплексы и системы. Моделирование объектов и систем управления. – Херсон : изд-во Херсонского нац. техн. ун-та, 2009. – №2(24). – С. 5–7.

75. Кінчур О. Ф. Аналіз та синтез нейропредиктора системи керування електропривода насосної станції / О. Ф. Кінчур, І. Р. Головач, М. В. Хай, А. О. Лозинський ; відп. ред. О. Ю. Лозинський // Вісник Нац. ун-ту "Львівська політехніка". – Л. : Нац. ун-т "Львів. політехніка", 2007. – 180 с. – № 597. – С. 142–147. – ISSN 0321-0499.
76. Кінчур О. Ф. Моделювання електроприводу насосної станції системи водопостачання / О. Ф. Кінчур // Вісник Нац. тех. ун-ту "Харківський політехнічний інститут". – Х. : НТУ «ХПІ», 2008. – №30. – С. 241–242.
77. Кіселичник О. І. Ідея інтерактивного енергозберігаючого керування насосом водопостачання [Електронний ресурс] / О. І. Кіселичник, С. О. Бур'ян, К. І. Бабаскін // Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики : Загальноуніверситетська наук.-техн. конф. молодих учених, аспірантів і студентів : тези доп. за матер. – К. : «Політехніка», 2007. – С. 27–28. – Режим доступу : http://so-buryan.edu.kpi.ua/attachments/051_Student_2007_3.pdf. – Назва з екрана.
78. Кіселичник О. І. Технологічна частина експериментальної установки "Інтерактивна енергозберігаюча система керування насосом водопостачання" [Електронний ресурс] / О. І. Кіселичник, С. О. Бур'ян, О. А. Гончаренко // Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики : Загальноуніверситетська наук.-техн. конф. молодих учених, аспірантів і студентів : тези доп. за матер. – К. : «Політехніка», 2007. – С. 25–26. – Режим доступу : http://so-buryan.edu.kpi.ua/attachments/050_Student_2007_2.pdf. – Назва з екрана.
79. Кіселичник О. Математична модель насосу з урахуванням просторового розподілу трубопроводу [Електронний ресурс] / О. Кіселичник, С. Бур'ян, М. Пушкар // Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики : Міжнародна наук.-техн. конф. молодих учених, аспірантів, студентів. – К. : «Політехніка» , 2009 : доп. за матер. – Т. 2. – С. 23–26. – Режим доступу : http://so-buryan.edu.kpi.ua/attachments/059_Stud_2009_1.pdf. – Назва з екрана.
80. Клепиков В. Б. О роли электропривода в решении проблемы

энергоресурсосбережения в Украине / В. Б. Клепиков, В. Ю. Розов // Вестник Нац. техн. ун-та "Харьковский политехнический институт". – Х., 2008. – Вып. 30. – С. 18–21.

81. Ключникова Г. А. Энергетическая оптимизация режимов работы электроприводов насосной станции : автореф. дис. на соискание науч. степени канд. техн. наук : спец. 05.09.03 “Электротехнические комплексы и системы” / Моск. гос. открытый ун-т. – М., 2000. – 20 с.: ил.

82. Ковалев В.З. Моделирование электротехнических комплексов и систем как совокупности взаимодействующих подсистем различной физической природы : автореф. дис. на соискание науч. степени д-ра техн. наук : спец. 05.09.03 “Электротехнические комплексы и системы” / Ом. гос. техн. ун-т. – Омск, 2000. – 39 с.

83. Колесников С. М. Разработка и исследование энергосберегающего частотно-регулируемого электропривода турбомеханизмов : автореф. дис. на соискание науч. степени канд. техн. наук : спец. 05.09.03 “Электротехнические комплексы и системы” / Воронеж. гос. техн. ун-т. – Воронеж, 2005. – 16 с.

84. Комелин А.В. Интеллектуальная автоматизированная система управления установкой электроцентробежного насоса : автореф. дис. на соискание науч. степени канд. техн. наук : спец. 05.13.06 “Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (по техническим наукам)” / Уфимский государственный авиационный технический университет. – Уфа, 2006. – 19 с.

85. Копылов И. П. Математическое моделирование электрических машин : уч. для вузов / И. П. Копылов. – [3-е изд., перераб. и доп.]. – М.: Высш. шк., 2001. – 327 с.

86. Копырин В. С. Повышение эффективности насосной станции бытовых и производственных стоков / В. С. Копырин, Е. Г. Бородацкий, В. П. Бакута // Энергоанализ и эффективность. – 2006 : изд-во "Инновация". – № 4 (17).

87. Коренькова Т. В. Компьютеризированный лабораторный комплекс для

исследования режимов работы насосной установки с регулируемым электроприводом / Т. В. Коренькова, Д. А. Михайличенко, Ю. С. Костюк // Вісник Харківського політехнічного інституту. – Х., 2002. – Вип. 12. – Т. 2. – С. 55–59.

88. Коренькова Т. В. Обоснование целесообразности использования альтернативных способов регулирования параметров насосных станций / Т. В. Коренькова, А. Л. Перекрест, А. М. Кравец // Праці Луганського відділення Міжнародної Академії інформатизації. – 2005. – №1. – С. 136–144.

89. Коренькова Т. В. Раціональний електропривод насосних станцій міського водопостачання : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.09.03 “ Електротехнічні комплекси та системи” / Нац. техн. ун-т України "Київ. політехн. ін-т". – К., 2001. – 19 с.

90. Косенко И. А. Сравнение частотно-токового и частотно-напряженческого способов релейно-векторного управления асинхронными электроприводами с автономным инвертором тока / И. А. Косенко // Електротехніка та електроенергетика. – 2008. – №1. – С. 52–58. – ISSN 1607–6761.

91. Костенко М. П. Электрические машины. Ч.2 / М. П. Костенко, Л. М. Пиотровский. – М. : Наука, 1978. – 280 с.

92. Костишин В. С. Дослідження динамічних режимів роботи електроприводних відцентрових насосних агрегатів за допомогою їхніх комп'ютерно_орієнтованих Bond Graph моделей / В. С. Костишин, П. О. Курляк // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2012. – № 2. – С. 148–153. – ISSN 1997-9266.

93. Костишин В. С. Моделювання режимів роботи відцентрових насосів на основі електрогідравлічної аналогії : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня д-ра техн. наук : спец. 05.15.13 “Нафтогазопроводи, бази та сховища” / Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу. – Івано-Франківськ, 2003. – 36 с.

94. Костишин В. С. Моделювання режимів роботи відцентрових насосів на

основі електрогідравлічної аналогії / В. С. Костишин. – Івано–Франківськ. : Факел, 2000. – 163 с.

95. Костишин В. С. Розроблення комп'ютерно-орієнтованих Bond Graph моделей асинхронних електродвигунів з метою дослідження усталених та перехідних режимів їх роботи / В. С. Костишин, П. О. Курляк // Нафтогазова енергетика. – 2009. – №2(11). – С. 88–93.

96. Костишин В.С. Bond Graph модель магістральних відцентрових насосів нафтоперекачувальних станцій / В. С. Костишин, П. О. Курляк // Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ. – 2007. – №1 (22) – С. 56–63.

97. Крылов Ю. А. Разработка энерго-ресурсосберегающих технологий в топливно-энергетическом хозяйстве города на основе современного электропривода : автореф. дис. на соискание науч. степени д-ра. техн. наук : спец. 05.09.03 “Электротехнические комплексы и системы” / Московский энергетический институт (Технический Университет). – М., 2008. – 40с.

98. Крылов Ю.А. Опыт внедрения регулируемого электропривода в ЖКХ крупного города [Электронный ресурс] / Ю.А. Крылов // ЭЛЕКТРО. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. – 2007. – № 4. – С. 184–185. – Режим доступа : http://www.elektro.elektrozavod.ru/pdf/2007_4.pdf. – Назва з екрана.

99. Кузнецов А. Ю. Энергосберегающие режимы регулируемых асинхронных электроприводов насосов водоснабжающих установок в условиях фермерских хозяйств : автореф. дис. на соискание науч. степени канд. техн. наук : спец. 05.20.02 “Электротехнологии и электрооборудование в сельском хозяйстве” / ФГОУ «Новосибирский государственный аграрный университет». – Барнаул, 2007. – 20 с.

100. Кузьмин И. К. Энергосберегающий синхронный электропривод шахтной вентиляторной установки : автореф. дис. на соискание науч. степени канд. техн. наук : спец. 05.09.03 “Электротехнические комплексы и системы” / Московский энергетический институт. – М., 2007. – 18 с.

101. Курляк П. О. Застосування комп'ютерно-орієнтованого методу bond

graph для дослідження перехідних процесів електроприводних відцентрових насосних агрегатів / П. О. Курляк // Наукові праці Донецького національного технічного університету. – 2011. – № 11(186). – С. 221–225. – SSN 2074-2630.

102. Курляк П. О. Моделирование динамических режимов работы электроприводных відцентрових агрегатів магістральних нафтопроводів на основі методу BOND GRAPH : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.09.03 “Електротехнічні комплекси та системи” / Вінниц. нац. техн. ун-т. – Вінниця, 2012. – 22 с.

103. Куцик А. С. Математична модель системи "частотно-керований електропривод – насос – водопровідна мережа" / А.С. Куцик, А. О. Лозинський, О. Ф. Кінчур // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Електроенергетичні та електромеханічні системи.– 2015.– № 834.– С. 48–55.

104. Кучмистенко О. В. Аналіз і вибір методу виявлення місця і часу витoku або несанкціонованого відбору нафти з магістрального нафтопроводу [Електронний ресурс] / О. В. Кучмистенко, Л. І. Давиденко, Г. Г. Зварич, Г. Н. Семенцов // Научные исследования и их практическое применение. Современное состояние и пути развития : междунар. науч.-пр. конф., 04-15 октября 2011: сб. науч.тр. – Одесса, 2011. – Режим доступа : <http://www.sworld.com.ua/konfer24/471.htm>. – Назва з екрана.

105. Лазарев Г. Б. Частотно-регулируемый электропривод насосных и вентиляторных установок – эффективная технология энерго- и ресурсосбережения на тепловых электростанциях [Електронний ресурс] / Г. Б. Лазарев // Силовая электроника. – 2007. – С. 41–48. – Режим доступа : http://www.power-e.ru/pdf/2007_03_41.pdf. – Назва з екрана.

106. Левин П. Н. Частотный асинхронный электропривод с поддержанием взаимного положения векторов тока статора и потокосцепления ротора : автореф. дис. на соискание науч. степени канд. техн. наук : спец. 05.09.03 “Электротехнические комплексы и системы” / Липец. гос. техн. ун-т. – Липецк, 2005. – 16 с.

107. Лезнов Б. С. Методика расчета экономии энергии при использовании РЭП в насосных установках [Электронный ресурс] / Б. С. Лезнов // Сантехника. Рубрика «Инженерные системы зданий» : журнал. – 2010. – №1. – Режим доступа : http://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=4520. – Назва з екрана.
108. Лезнов Б. С. Применение регулируемого электропривода в насосных установках систем водоснабжения и водоотведения [Электронный ресурс] / Б. С. Лезнов // Экологические системы : электронный журнал энергосервисной компании. – Кременчуг, 2010. – № 11. – С. 9–12. – Режим доступа : http://esco-ecosys.narod.ru/2004_11/art50.htm. – Назва з екрана.
109. Лезнов Б. С. Частотно-регулируемый электропривод насосных установок / Б. С. Лезнов – М.: Машиностроение, 2013. – 176 с., ил. – ISBN 978-5-94275-688-8.
110. Лисенков П. А. Повышение эффективности систем электроснабжения водоперекачивающих станций энергетических объектов : автореф. дис. на соискание науч. степени канд. техн. наук : спец. 05.14.02 “Электростанции и электроэнергетические системы” / Государственная академия водного транспорта. – Новосибирск, 2009. – 22 с.
111. Лисяк В. Г. Математичне моделювання усталених режимів електропостачальної системи помпової станції / В. Г. Лисяк // Технічна електродинаміка. – К., 2008. – № 2. – С. 43–50.
112. Лисяк В. Г. Узагальнена математична модель усталених режимів електропостачальної системи помпової станції / В. Г. Лисяк, П. Ф. Гоголюк // Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України. – 2015. – Вип. 42. – С. 22-26.
113. Лозинський А. О. Синтез нейропредиктора системи керування електроприводом насосної станції на основі нейронних мереж прямого поширення сигналу / А.О. Лозинський, О.Ф. Кінчур // Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика : збірник наук. праць Дніпродзержинського держ. техн. ун-та (техн. науки) : темат. вип. –

Дніпродзержинськ, 2007. – С. 142–147.

114. Локарев В. И. Расчет энергетических характеристик асинхронного электропривода при решении задач энергосбережения / В. И. Локарев, Я. Б. Волянская // *Электромашинобуд. та електрообладн. : міжвід. наук.-техн. зб.* – К., 2004. – Вип. 62. – С. 13–16.

115. Луккерт Гаральд. Методика расчета долгосрочных режимов работы каскада насосных станций : автореф. дис. на соискание науч. степени канд. техн. наук : спец. 05.14.10 “Гидроэлектростанции и гидроэнергетические установки” / РГБ. – Ленинград, 1985. – 21 с.

116. Лукпанов Ж. К. Электропривод нефтеперекачивающих станций с преобразователями частоты : автореф. дис. на соискание науч. степени канд. техн. наук : спец. 05.09.03 “Электротехнические комплексы и системы” / НАО «Алматинский институт энергетики и связи». – Алматы, 2007. – 25 с.

117. Макаров В. Г. Асинхронный электропривод электромеханических систем с оптимальными режимами работы по критерию энергосбережения : автореф. дис. на соискание науч. степени д-ра. техн. наук : спец. 05.09.03 “Электротехнические комплексы и системы” / Казанский национальный исследовательский технологический университет. – Казань, 2011. – 40 с.

118. Макеев М.С. Алгоритм расчета параметров схемы замещения асинхронного двигателя по каталожным данным / М.С. Макеев, А.А. Кувшинов // *Вектор науки ТГУ.* – Тольятти, 2013. – № 1 (23). – С. 108–112.

119. Макшанцев В. Г. Исследование и моделирование электропривода насосной станции с частотным регулированием для гидросбыва окалины на прокатном стане / В. Г. Макшанцев, К. Ю. Статива, М. А. Ольховский // *Вісник Донбаської держ. машинобудівної акад.* – 2007. – № 2Е (10). – С. 134–141.

120. Маліновський А. А. Пошук нульового наближення в задачах оптимізації режимів теплопостачальних мереж / А. А. Маліновський, В. Г. Турковський, А. З. Музичак; відп. ред. О. Ю.Лозинський // *Вісник Нац. ун-ту "Львівська політехніка".* – Л. : Нац. ун-т "Львів. політехніка", 2007. – 180 с. – № 597. – С.

139–142. – ISSN 0321-0499.

121. Машнев А. Е. Экономия электроэнергии при водоснабжении большого города / А. Е. Машнев, И. В. Бовдуй // Вестник Нац. техн. ун-та "Харьковский политехнический институт". – 2008. – Вып. 30. – С. 507–508.

122. Мелихов А. Ю. Автоматизация процессов управления плавным пуском асинхронных двигателей насосной станции системы водоснабжения : автореф. дис. на соискание науч. степени канд. техн. наук : спец. 05.13.06 "Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (по техническим наукам)" / Орлов. гос. техн. ун-т. – Орел, 2007. – 20 с.

123. Мелихов А. Ю. Разработка энергосберегающего алгоритма управления плавным пуском асинхронных двигателей насосной станции. Часть 2. Математическая модель энергетической подсистемы насосной станции / А. Ю. Мелихов, Ю. В. Колоколов // Системы управления и информационные технологии. – 2009. – № 1.3(35). – С. 369–374.

124. Мелихов А. Ю. Разработка энергосберегающего алгоритма управления плавным пуском асинхронных двигателей насосной станции. Часть 3. Математическая модель гидравлической подсистемы насосной станции / А. Ю. Мелихов // Системы управления и информационные технологии. – 2009. – № 3.2(37). – С. 263–267.

125. Місюренко В. О. Частотно-керований електропривод насосної станції водовідведення / В. О. Місюренко // Міжвід. наук.-техн. зб. «Пробл. автомат. електропривода. Теорія і практика. Електромашинобуд. та електрообладн». – 2006. – Вип. 66. – С. 184–185.

126. Морозов Д. И. Управляемый по ротору асинхронный электропривод с улучшенным энергопотреблением / Д. И. Морозов, И. С. Шевченко, Е. В. Полипов // Вестник Нац. техн. ун-та "Харьковский политехнический институт". – Х., 2008. – Вып. 30. – С. 69–71.

127. Мошнорізі М. М. Алгоритм роботи системи керування групою паралельно працюючих насосів станції водопостачання / М. М. Мошнорізі //

Проблеми енергоресурсозбереження в електротехнічних системах : наук. вид. «Наука, освіта і практика». – Кременчук : КНУ, 2011. – Вип. 1/2011 (1). – С. 68–69.

128. Мошнорізі М. М. Визначення оптимального співвідношення продуктивностей насосних агрегатів станції для забезпечення їх спільної роботи / М. М. Мошнорізі // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2008. – № 1. – С. 69–73.

129. Мошнорізі М. М. Розробка моделі системи керування насосною станцією другого підйому [Електронний ресурс] / М. М. Мошнорізі // Наукові праці ВНТУ. – 2007. – № 1. – 4 с. – Режим доступу : <http://www.nbuiv.gov.ua/e-journals/VNTU/2007-1/ukr/07mmmtsа.pdf>. – Назва з екрана.

130. Мощинский Ю. А. Определение параметров схемы замещения асинхронной машины по каталожным данным / Ю. А. Мощинский, В.Я. Беспалов, А. А. Кирякин // Электричество. – 1998. – №4. – С. 38–42.

131. Музичак А. З. Математичні моделі й алгоритми аналізу та удосконалення режимів систем централізованого теплопостачання : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.14.01 “Енергетичні системи та комплекси” / НАН України, Ін-т техн. теплофізики. – Київ, 2014. – 20 с.

132. Мусаев В. Г. Структурный анализ динамических процессов в магистральных нефтепроводах [Електронний ресурс] / В. Г. Мусаев // Нефтегазовое дело : электронный научный журнал. – Уфа, 2007. – 9 с. – Режим доступу: http://www.ogbus.ru/authors/Musaev_1.pdf. – Назва з екрана.

133. Мустафин М. А. Энергосберегающие системы электропривода центробежных насосных агрегатов : автореф. дис. на соискание науч. степени д-ра техн. наук : спец. 05.09.03 “Электротехнические комплексы и системы” / НАО «Алматинский институт энергетики и связи». – Алматы, 2007. – 42 с.

134. Мухортов И. С. Повышение энергетической эффективности группы электроприводов систем поддержания пластового давления : автореф. дис. на соискание науч. степени канд. техн. наук : спец. 05.09.03

“Электротехнические комплексы и системы” / ГПНТБ России. – Самара, 2014. – 24 с. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://d21221704.samgtu.ru/sites/d21221704.samgtu.ru/files/dissertaciya_muhortov_i.s.pdf

135. Неклепаев Б. Н. Электрическая часть электростанций и подстанций: справочные материалы для курсового и дипломного проектирования: Учеб.пособие для вузов / Б. Н. Неклепаев, И. П. Крючков. – [4-е изд., перераб. и доп.]. – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 608 с.: ил.

136. Николаев В. Г. Энергосберегающие способы управления лопастными насосными агрегатами в системах водоснабжения при нестационарной нагрузке [Электронный ресурс] / В. Г. Николаев // Сантехника. Рубрика «Водоснабжение» : журнал. – 2006. – № 4. – С. 22–28. – Режим доступа : http://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=3355. – Назва з екрана.

137. Нурбосынов Д. Н. Минимизация потерь энергии в электротехнических комплексах предприятий нефтедобычи: автореф. дис. на соискание науч. степени д-ра техн. наук: спец. 05.09.03 “Электротехнические комплексы и системы” / Альметьевский нефтяной институт; Санкт-Петербургский государственный политехнический университет. – Санкт-Петербург, 2003. – 43с.

138. Огарь В. О. Дослідження характеристик асинхронного двигуна з урахуванням нелінійності кривої намагнічування при живленні від перетворювача частоти / В. О. Огарь, В. Г. Фомін // Вісник КДУ імені Михайла Остроградського. – К., 2010. – Вип. 4/2010 (63). Ч. 2. – С. 45–50.

139. Окунеева Н. А. Разработка и исследование электропривода для нефтедобывающих насосов с погружным магнитоэлектрическим двигателем : автореф. дис. на соискание науч. степени канд. техн. наук : спец. 05.09.03 “Электротехнические комплексы и системы” / Московский энергетический институт (технический университет). – М., 2008. – 20 с.

140. Осипов П. А. Закон управления частотно-регулируемым асинхронным электроприводом с поддержанием постоянства магнитного потока и оптимизацией по тепловой нагрузке / П. А. Осипов, В. Н. Полузадов //

Материалы уральской горнопромышленной декады, Екатеринбург, 14-23 апреля 2008. – Екатеринбург : УГГУ, 2008. – С. 222–223.

141. Павловский Н. Н. Теория движения грунтовых вод под гидротехническими сооружениями и ее основные приложения / Николай Николаевич Павловский // ГПНТБ России. – М. : Изд.-во АН СССР, 1956. – Собр. соч. – Т. 2. – 352 с.

142. Перекрест А. Л. Системы активного регулирования параметров насосных комплексов. Итоги и направления развития / А. Л. Перекрест // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – 2011. – Вип. 1. – С. 15–20.

143. Перекрест А. Л. Структура системы регулирования параметров насосной установки с активным регулирующим устройством / А. Л. Перекрест, Т. В. Коренькова // Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика" : зб. наук. пр. Дніпродзержинського держ. техн. ун-та : темат. вип. – 2007. – С. 267–272.

144. Перхач В. С. Математичні задачі електроенергетики / В. С. Перхач. – Львів : Вища шк., 1989. – 464 с.

145. Петрушин В. С. Энергетические показатели асинхронного двигателя в частотном электроприводе при различных законах управления / В. С. Петрушин, А. А. Таньков // Електромашинобудування та електрообладнання: Респ. міжвід.наук.-техн. зб. – 2000. – Вип. 55. – С. 11–15.

146. Петунин А. А. Вентильный индукторный электропривод для водяных насосов центробежного типа : автореф. дис. на соискание науч. степени канд. техн. наук : спец. 05.09.03 “Электротехнические комплексы и системы” / Липец. гос. техн. ун-т. – Липецк, 2005. – 18 с.

147. Плахтына Е. Г. Математическое моделирование электромашинных вентильных систем / Е. Г. Плахтына. – Львов: Вища шк. Изд-во при Львов. ун-те, 1986. – 164 с.

148. Поляков В. Н. Экспериментальные исследования энергоэффективных режимов управления асинхронным двигателем / В. Н. Поляков, М. Ю. Бородин, О. С. Сусенко // Вестник Национального технического

университета "Харьковский политехнический институт". – Х., 2008. – Вып. 30. – С. 426–426.

149. Попович М. Г. Адаптивні електромеханічні системи автоматичного керування насосними установками з векторно-керованими асинхронними двигунами / М. Г. Попович, О. І. Кіселичник, С. О. Бур'ян, К. І. Бабаскін // Вісник КДПУ імені Михайла Остроградського. – 2008. – Вип. 3/2008 (50). – Частина 1. – С. 72–79.

150. Попович М. Г. Динаміка електромеханічних систем автоматичного керування турбомеханізмами з екстремальними напірними характеристиками / М. Г. Попович, М. В. Печеник, О. І. Кіселичник, С. О. Бур'ян // Проблеми автоматизованого електропривода : збірн. наук. пр. Дніпродзержинського держ. тех. ун-ту : темат. вип. – 2007. – С. 407–411.

151. Попович М. Г. Експериментальні дослідження роботи інтерактивного енергозберігаючого контролера на гібридній моделі насосної установки / М. Г. Попович, О. І. Кіселичник, С. О. Бур'ян, О. Ф. Соколовський // Вісник Кременчуцького держ. політехн. ун-ту ім. Михайла Остроградського. – К. : «Політехніка», 2009. – Вип. 3/2007 (44). – Ч. 1. – С. 72–75.

152. Попович М. Г. Електромеханічна система автоматизації насосної установки з оцінюванням продуктивності за допомогою нейронної мережі / М. Г. Попович, Б. І. Приймак, С. О. Бур'ян // Вісн. Кременчуцького держ. політехн. ун-ту ім. М. Остроградського. – 2009. – Вип. 3/2009 (56). – Ч. 2. – С. 57–59.

153. Попович М. Г. Електромеханічні системи автоматичного керування робочими параметрами турбомеханізмів на основі принципу пасивності / М. Г. Попович, О. І. Кіселичник // Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика : Вісн. НТУ "ХПІ". – 2004. – Вип. 43. – С. 16–19.

154. Попович М. Г. Енергозберігаючі інтерактивні адаптивні системи автоматичного керування насосними установками з векторно-керованими асинхронними двигунами / М. Г. Попович, О. І. Кіселичник, М. В. Печеник // Вісник Нац. техн. ун-ту "Харківський політехнічний інститут". – Х., 2008. –

Вип. 30. – С. 473–476.

155. Попович М. Г. Енергозберігаючі інтерактивні електромеханічні системи автоматичного керування насосними установками / М. Г. Попович, М. В. Печеник, О. І. Кіселичник, О. Ф. Соколовський // Електромашинобудування та електрообладнання. Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика : міжвідомчий наук.-техн. зб. : темат. вип. – К., 2006. – Вип. 66 : "Техніка". – Ч. 2. – С. 311–314.

156. Попович М. Г. Задачі автоматизації установок водопостачання на основі електромеханічних систем керування / М. Г. Попович, О. І. Кіселичник // Вісник КДПУ імені Михайла Остроградського. – 2008. – Вип. 3/2008 (50). – ч. 2. – С. 8–12.

157. Попович М. Г. Особливості організації екстремальних енергозберігаючих систем при різних методах керування асинхронних електроприводів / М. Г. Попович, М. В. Печеник, О. І. Кіселичник, О. В. Ковальчук // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – 2002. – Вип. 1 (12). – С. 129–132.

158. Попович М. Г. Питання теорії автоматизації багатоагрегатних насосних станцій на основі принципу пасивності / М. Г. Попович, О. І. Кіселичник // Проблеми сучасної електротехніки : темат. вип. журналу „Технічна електродинаміка“. – К., 2006. – Ч. 5. – С. 54–59.

159. Попович М. Г. Технологічна частина експериментальної установки "Інтерактивна енергозберігаюча система керування насосом водопостачання" [Електронний ресурс] / М. Г. Попович, О. І. Кіселичник, С. О. Бур'ян // Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики : Загальноуніверситетська наук.-техн. конф. молодих учених, аспірантів і студентів : тези доп. за матер. – К. : «Політехніка», 2007. – С. 22–23. – Режим доступу : http://so-buryan.edu.kpi.ua/attachments/049_Student_2007_1.pdf. – Назва з екрана.

160. Потапенко Е. М. Универсальное векторное управление асинхронным приводом / Е. М. Потапенко // Вестник Нац. техн. ун-та "Харьковский

политехнический институт". – X., 2008. – Вып. 30. – С. 113–116.

161. Потапенко О. В. Синтез регулятора продуктивності насосної установки / О. В. Потапенко, О. І. Кіселичник // Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації : IX Міжнародна наук.-техн. конф. молодих учених і спеціалістів, Кременчук, 07-08 квітня 2011 : зб. наук. пр. – Кременчук : КНУ, 2011. – С. 331–332.

162. Приймак Б. И. Аналитическое определение энергетически оптимального значения потока ротора асинхронной машины / Б. И. Приймак // Электричество. – 2005. – № 12. – С. 36–44. – ISSN 0013-5380.

163. Приймак Б. І. Алгоритми керування потоком для оптимізації втрат потужності в асинхронній машині / Б. І. Приймак // Технічна електродинаміка. – 2005. – № 6. – С. 48-52. – ISSN 0204-3599.

164. Приймак Б. І. Модель асинхронного двигуна із врахуванням втрат у залізі при орієнтуванні координат за потокозчепленням статора / Б. І. Приймак, В. О. Благодір // Вісник Нац. техн. ун-ту “Харківський політехнічний інститут”. – X. : НТУ “ХПІ”, 2010. – Т. вып. 28 : Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика. – С. 144–145.

165. Приймак Б. І. Оцінювання потоку ротора асинхронного двигуна з врахуванням нелінійності магнітного кола / Б. І. Приймак // Технічна електродинаміка. – 2005. – № 4. – С. 51–58. – ISSN 0204-3599.

166. Приймак Б. І. Оцінювач продуктивності відцентрової насосної установки на основі нейронної мережі / Б. І. Приймак, С. О. Бур’ян, О. М. Халімовський // Вісник Нац. техн. ун-ту “Харківський політехнічний інститут”. – X. : НТУ «ХПІ», 2008. – № 30. – С. 589–591.

167. Приймак Б. І. Розширені математичні моделі асинхронного двигуна при орієнтуванні координат за головним потокозчепленням / Б. І. Приймак, В. О. Благодір // Праці Ін-ту електродинаміки НАН України. – 2010. – № 3 (27). – С. 58–61.

168. Пустоветов М. Компьютерное моделирование асинхронных двигателей и трансформаторов. Примеры взаимодействия с силовыми электронными

преобразователями / М. Пустоветов, К. Солтус, И. Синявский. – (Saarbrücken) Саарбрюккен, (Deutschland) Германия: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. – 199 с. – ISBN-13: 978-3-659-40776-5. – ISBN-10: 3659407763.

169. Рассказов Ф. Н. Оптимизация системы регулирования давления электроприводного газоперекачивающего агрегата / Ф. Н. Рассказов, С. В. Князев // Электротехнологии, электропривод и электрооборудование предприятий : Всероссийская науч.-техн. конф. : сб. науч. тр. : в 2 т. – Уфа : изд-во УГНТУ, 2009. – Т. 2. – С. 169–171. – ISBN 978-5-7831-0867-9.

170. Родин Я. Н. Каскадно-частотное управление асинхронными двигателями на насосных станциях. / Я. Н. Родин, А. Е. Сидорин // Электротехнические комплексы и системы управления. – 2006. – № 2. – С. 21–28.

171. Рябухин М. И. Разработка и математическое моделирование аксиального центробежного двигателя-насоса с короткозамкнутым ротором : автореф. дис. на соискание науч. степени канд. техн. наук : спец. 05.09.03 “Электротехнические комплексы и системы” / Кубан. гос. технол. ун-т. – Краснодар, 2005. – 24 с.

172. Сарваров А. Энергосберегающий электропривод вентиляторных механизмов по системе ННЧ-АД с программным формированием напряжения : автореф. дис. на соискание науч. степени д-ра. техн. наук : спец. 05.09.03 “Электротехнические комплексы и системы” / ЮУрГУ. – Челябинск : изд. ЮУрГУ, 2002. – 36 с.

173. Сивокобыленко В. Ф. Математическое моделирование в электротехнике и энергетике : Науч. пособие / В. Ф. Сивокобыленко. – Донецк : РВА ДонНТУ, 2005. – 350 с.

174. Сивокобыленко В. Ф. Параметры и схемы замещения асинхронных электродвигателей с вытеснением тока в роторе / В. Ф. Сивокобыленко, В. А. Павлюков // Электрические станции. – 1976. – № 2. – С. 51–54.

175. Сипайлов В. А. Оптимальное управление установкой электроцентробежного насоса с частотно регулируемым асинхронным приводом / В. А. Сипайлов, В. Г. Букреев, Н. Ю. Сипайлова // Известия

ВУЗов. Электромеханика. – Новочеркасск : изд-во Южно-Российского гос. техн. ун-та, 2009. – №4. – С. 66–69.

176. Сипайлов В. А. Оптимизация режимов работы установок электроцентробежных насосов механизированной добычи нефти : автореф. дис. на соискание науч. степени канд. техн. наук : спец. 05.09.03 “Электротехнические комплексы и системы” / ГОУ ВПО «Томский политехнический университет». – Томск, 2009. – 19 с.

177. Сипайлов Г. А. Математическое моделирование электрических машин / Г. А. Сипайлов, А. В. Лоос. – М. : Высш. шк., 1980. – 176 с.

178. Скалько Ю. С. Сравнение электромеханических процессов для высоковольтного асинхронного электропривода со скалярным, квазивекторным и векторным принципами частотного управления / Ю. С. Скалько // Електротехніка та електроенергетика. – Запоріжжя, 2008. – №1. – С. 24–31.

179. Снегирев Д. А. Асинхронный электродвигатель для частотно-регулируемого электропривода турбомеханизмов : автореф. дис. на соискание науч. степени канд. техн. наук : спец. 05.09.01 “Электромеханика и электрические аппараты” / Воронежский государственный технический университет. – Воронеж, 2006. – 15 с.

180. Соколов Н. И. Применение аналоговых вычислительных машин в энергетических системах. Методы исследования переходных процессов / [К. П. Кадомская, Н. И. Соколов И. М. и др.] ; под ред. Н. И. Соколова. – [Изд. 2-е, перераб. и доп.]. – М. : Энергия, 1970. – 400 с.

181. Соколовський О. Ф. Електромеханічні системи автоматизації багатоагрегатних насосних установок при енерго- та ресурсоощадливому керуванні : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.14.02 “Електричні станції, мережі і системи” / Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут". – К., 2009. – 16 с.

182. Соколовський О. Ф. Застосування інтерактивного алгоритму в схемах багатоагрегатних насосних установок / О. Ф. Соколовський // Вісник ЖДТУ.

– 2007. – Вип. 4 (43). – С. 48–54.

183. Соколовський О. Ф. Інтерактивна електромеханічна система автоматичного керування паралельно працюючими насосними агрегатами / О. Ф. Соколовський // Вісник ЖДТУ. – 2007. – Вип. 3 (42). – С. 133–138.

184. Соколовський О. Ф. Контроль режимів насосів в інтерактивній електромеханічній системі автоматичного керування паралельно працюючими агрегатами / О. Ф. Соколовський // Вісник ЖДТУ. – 2012. – Вип. 1 (60). – С. 64–68.

185. Соколовський О. Ф. Напрямки енергозбереження в насосних установках / О. Ф. Соколовський // Вісник ЖДТУ. – 2008. – № 3 (46). – С. 39–47.

186. Суворов И. Ф. Эффективность энергоресурсосбережения на насосных станциях [Электронный ресурс] / И. Ф. Суворов, С. А. Викулов, В. Н. Долгов, Н. М. Филипов // Энергосбережение в городском хозяйстве, энергетике, промышленности : четвертая российская науч.-техн. конф., Ульяновск, 24-25 апреля 2003 : матер. конф. – С. 250-252. – Режим доступа : http://escosys.narod.ru/2004_11/art51.pdf. – Назва з екрана.

187. Сутырин А. В. Повышение эффективности буровых насосных агрегатов с регулируемым электроприводом путем оптимизации режимов их работы : автореф. дис. на соискание науч. степени канд. техн. наук : спец. 05.04.07 “Машины и агрегаты нефтяной и газовой промышленности” / Гос. акад. нефти и газа. – М., 1997. – 24 с.

188. Табачникова Т. В. Оптимизация режимов работы электротехнического комплексу предприятий нефтегазодобывающей промышленности: автореф. дис. на соискание науч. степени канд. техн. наук : спец. 05.09.03 “Электротехнические комплексы и системы” / ООО “Научно-производственная фирма ОЛТА”. – Санкт-Петерб., 2006. – 23 с.

189. Терещина О. Г. Система управления группой из нечетного числа асинхронных электроприводов водяных насосов / О. Г. Терещина // Состояние и перспективы развития энерготехнологий: сб. науч. тр. – Иваново, 2005. т. 1. – С. 203.

190. Терещина О. Г. Электроприводы с параллельными каналами регулирования на основе многозонных интегрирующих развертывающих преобразователей : автореф. дис. на соискание науч. степени канд. техн. наук : спец. 05.09.03 “Электротехнические комплексы и системы” / Южно-Уральский гос. ун-т. – Челябинск, 2007. – 21 с.
191. Теряев В. І. Підвищення продуктивності насосної установки з частотно-регульованим електроприводом та нейронною мережею [Електронний ресурс] / В. І. Теряєв, С. О. Бур’ян, М. І. Брус // Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики : Міжнародна наук.-техн. конф. молодих учених, аспірантів, студентів : доп. за матер. – К. : «Політехніка», 2008. – С.300-303. – Режим доступу : http://so-buryan.edu.kpi.ua/attachments/052_Stud_2008_1.pdf. – Назва з екрана.
192. Тигист Т. Т. Разработка и исследование систем управления электроприводами насосов магистрального трубопровода : автореф. дис. на соискание науч. степени канд. техн. наук : спец. 05.09.03 “Электротехнические комплексы и системы” / С.-Петерб. гос. электротехн. ун-т ЛЭТИ им. В. И. Ульянова (Ленина). – С.-Петербург., 2003. – 15 с.
193. Ткачук О. А., Ткачук А. О. Основні типи змін робочих характеристик насосних агрегатів водопровідних насосних станцій / О. А. Ткачук, А. О. Ткачук // Пробл. водопостачання, водовідведення та гідравліки. – 2006. – Вип. 7. – С. 43–50.
194. Толочко О. І. Моделювання роботи електроприводу турбомеханізму системи водопостачання [Електронний ресурс] / О. І. Толочко, С. В. Кононенко // Електромеханічні системи, методи моделювання та оптимізації : VIII Всеукраїнської наук.-техн. конф. молодих учених і спеціалістів : матер. конф. – Донецьк, 2010. – С. 328–330. – Режим доступу : www.polytech.poltava.ua/statti/tezi/Tezi_EES_%20pdf/328.pdf. – Назва з екрана.
195. Толпаров Д. В. Бездатчиковая система регулирования давления центробежного насоса на базе преобразовательной техники / Д. В. Толпаров // Современные техника и технологии : XV Международная науч.-практ. конф.

студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 26–30 марта 2007 : сб. тр. – Томск, 2007. – Т. 1. – С. 465–467.

196. Толпаров Д. В. Разработка модели центробежного насоса для создания эффективных систем регулирования на базе преобразовательной техники [Электронный ресурс] / Д. В. Толпаров // Современные техника и технологии : Международная науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 4-8 мая 2009 : сб. тр. : в 3 т. – Томск : ТПУ, 2009. – Т. 1. – С. 484–486. – Режим доступа : <http://portal.tpu.ru/tpu/files/ctt2009-tom1.pdf>. – Назва з екрана.

197. Туркин М. А. Синхронный электропривод турбокомпрессорных установок с системой частотного управления : автореф. дис. на соискание науч. степени канд. техн. наук : спец. 05.09.03 “Электротехнические комплексы и системы” / Липецкий государственный технический университет. – Липецк, 2007. – 18с.

198. Тютеева П. В. Исследование характеристик насосных агрегатов и трубопроводов / П. В. Тютеева, О. О. Муравлева // Современные техника и технологии : Международная науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 26–30 марта 2007 : сб. тр. – Томск, 2007. – Т. 1. – С. 470–472.

199. Усатый Д. Ю. Разработка и исследование системы НПЧ-АД с программным формированием частоты вращения для механизмов вентиляторного типа : автореф. дис. на соискание науч. степени канд. техн. наук : спец. 05.09.03 “Электротехнические комплексы и системы” / Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова. – Челябинск, 2000. – 20 с.

200. Усольцев А. А. Определение параметров схемы замещения асинхронного двигателя по справочным данным [Электронный ресурс] / А. А. Усольцев. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2011. – 14 с. – Режим доступа : http://ets.ifmo.ru/usolzev/wopros/op_ad.pdf. – Назва з екрана.

201. Усольцев А.А. Частотное управление асинхронными двигателями:

- учебное пособие / А.А. Усольцев. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2006. – 94 с.
202. Фильц Р. В. Математические основы теории электромеханических преобразователей / Р. В. Фильц. – К. : Наук. думка, 1979. – 208 с.
203. Фильц Р. В. Математическое моделирование явнополюсных синхронных машин / Р. В. Фильц, Н. Н. Лябук. – Львов. : Свит, 1991. – 172 с.
204. Чертов Р. А. Математическое моделирование электротехнического комплексу "установка электроцентробежного насоса" нефтегазодобывающих предприятий : автореф. дис. на соискание науч. степени канд. техн. наук : спец. 05.09.03 "Электротехнические комплексы и системы" / Ом. гос. техн. ун-т. – Омск, 2005. – 20 с.
205. Шадрина Л. К. Проблемы моделирования процессов транспортировки нефти магистральными трубопроводами / Л. К. Шадрина, З. Х. Ягубов // X Міжнародна науково-технічна конференція аспірантів і студентів, Донецьк, 18-20 травня 2010 : зб. наук. пр. – Донецьк, 2010. – С. 250–252.
206. Шаммазов А.М. Проектирование и эксплуатация насосных и компрессорных станций / А.М. Шаммазов, В.Н. Александров, А.И. Гольянов. – Уфа. : Изд-во УГНТУ, 2005. – 403 с. – ISBN: 5-247-03881-9.
207. Шарапов В. И. Регулирование нагрузки систем теплоснабжения / В. И. Шарапов, П. В. Ротов. – М. : Изд-во "Новости теплоснабжения", 2007. – 164 с.
208. Шелепетень Т. М. Обчислення інтегральних параметрів електромагнітних апаратів з допомогою цифрових моделей / Т. М. Шелепетень // Технічна електродинаміка : спец. вип. за матер. II Міжнародної наук.-техн. конф. «Математичне моделювання в електротехніці і електродинаміці». – К., 1998. – С. 169–172.
209. Шишков А. Н. Асинхронный электропривод крановых механизмов с дроссельным регулированием скорости : автореф. дис. на соискание науч. степени канд. техн. наук: спец. 05.09.03 "Электротехнические комплексы и системы" / Южно-Уральский государственный университет. – Челябинск, 2007. – 18 с.
210. Шулік П. В. Стохастичні моделі і методи оперативного управління

режимами роботи насосних станцій систем водопостачання і водовідведення в реальному часі : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 01.05.04 “Системний аналіз і теорія оптимальних рішень” / Харк. нац. ун-т радіо електрон. – Х., 2003. – 19 с.

211. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения [Текст] : ГОСТ 13109-97. – [Чинний від 1999-01-01]. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 1999. – 31 с. – (Межгосударственный стандарт).

212. Яковлев В.В. Способы регулирования насосных агрегатов при организации их работы на приток [Электронный ресурс] / В.В. Яковлев, В.И. Мизерный // Материалы IX Международной научно-технической студенческой конференции. – Донецк: ДонНТУ, 2010. – Режим доступа : <http://ea.donntu.org/handle/123456789/12640>. – Назва з екрана.

213. Ярыш Р. Ф. Повышение эффективности работы электротехнических комплексов предприятий нефтедобычи : автореф. дис. на соискание науч. степени канд. техн. наук : спец. 05.09.03 “Электротехнические комплексы и системы” / ГПНТБ России. – Чебоксары, 2003. – 24 с.

214. Bergen A. R. Power Systems Analysis / A. R. Bergen, Vittal V. // Upper Saddle River, NJ, Prentice Hall. – 2000. – 619 p.

215. Berten S. Rotor-Stator Interaction Induced Pressure Fluctuations: CFD and Hydroacoustic Simulations in the Stationary Components of a Multistage Centrifugal Pump [Electronic resource] / Berten Stefan, Dupont Philippe, Farhat Mohamed, Avellan Francois. – Proceedings of ASME 2007 5th Joint ASME/JSME Fluids Engineering Conference. – San Diego, California USA: July 30 – August 2, 2007. – Mode of access : <http://infoscience.epfl.ch/record/112276/files/FEDSM2007-37549.pdf>.

216. Ebrahim O.S ANN-based optimal energy control of induction motor in pumping applications / O.S. Ebrahim, A.S. Algendy, M.A. Badr, P.K. Jain // Electrical Power & Energy Conference (EPEC), 2009 IEEE. – E-ISBN: 978-1-

4244-4509-7. – Print ISBN: 978-1-4244-4508-0. – DOI: 10.1109/EPEC.2009.5420914.

217. Eker I. Modelling and Simulation of Water Supply Systems for Feedback Control [Electronic resource] / I. Eker, T. Kara // Power Engineering. – Department of Electrical and Electronic Engineering, University of Gaziantep : 27310 Gaziantep, Turkey, 2001. – P. 49–55. – Mode of access : http://www.cder.dz/vlib/revue/nspeciauxpdf/upec_6.pdf. – Title from the screen.

218. Garcia-Hernandez A. Hydraulic modeling and simulation of pumping systems [Electronic resource] / Augusto Garcia-Hernandez, Melissa Wilcox, Thomas Moore // Proceedings of The International Pump Users Symposium "Hydraulic modeling and simulation of pumping systems" : 2010. – 2010. – P. 81–88. – Mode of access : http://pdf-release.net/external/1361036/pdf-release-dot-net-ch10_Hernandez.pdf. – Title from the screen.

219. Gogolyuk P. Influence Of Frequency Control Strategies On Induction Motor-Centrifugal Pump Unit And Its Modes [Electronic resource] / P. Gogolyuk, V. Lysiak, I. Grinberg // Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics. – 2008. – Vol 3. – P. 656–661. – Mode of access: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=4676893>. – Title from the screen.- Print ISSN: 2163-5137.- Electronic ISSN: 2163-5145. DOI: [10.1109/ISIE.2008.4676893](https://doi.org/10.1109/ISIE.2008.4676893).

220. Gogolyuk P. Mathematical Modeling and Simulation of Transients in Power Distribution Systems with Valve Devices and Dynamic Loading / P. Gogolyuk, T. Grechyn, A. Ravlyk, I. Grinberg // IEEE Power Engineering Society General Meeting Conf., 2003 : in Proc. – Print ISBN: 0-7803-7989-6. – DOI: 10.1109/PES.2003.1267391

221. Gogolyuk P. Mathematical Modeling Of A Synchronous Motor And Centrifugal Pump Combination In Steady State [Electronic resource] / P. Gogolyuk, V. Lysiak, I. Grinberg // IEEE PES Power Systems Conference & Exposition, 10–13 October 2004, New York City, NY : Conference Publications. – 2004. – Vol. 3. – P. 1444–1448. – Mode of access :

<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1397473>. – Title from the screen. – Print ISBN 0-7803-8718-X. – DOI: [10.1109/PSCE.2004.1397473](https://doi.org/10.1109/PSCE.2004.1397473). (SCOPUS, <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=8265223800>).

222. Gogolyuk P. Mathematical Modeling of Electric Power Distribution Systems for Electrical Drives of Oil Wells Displacement Pumps [Electronic resource] / P. Gogolyuk, Y. Zhovnir, I. Grinberg // IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition, 21-24 May, 2006 : Conference Publications. – 2005. – P. 197–201. – Mode of access : <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1397473>. – Title from the screen.

223. Gogolyuk P. Mathematical Modeling Of Steady-State Modes Of Induction Motor-Centrifugal Pump Combination With Pump Hydraulic Tracts Combined Connection / P. Gogolyuk, V. Lysiak, V. Kostyshyn, I. Grinberg // XIII International Symposium On Theoretical Electrical Engineering ISTET'05, Lviv, Ukraine, July 4–7, 2005 : Conference Publications. – 2005. – P. 353–356.

224. Harihara P. Fault Diagnosis of Centrifugal Pumps Using Motor Electrical Signals [Electronic resource] / Parasuram P. Harihara, Alexander G. Parlos, Dr. Dimitris Papantonis (Ed.) // Texas A&M University. – USA, 2012. – Vol. 20. – №. 1. – P. 15–32. – Mode of access: <http://www.intechopen.com/books/centrifugal-pumps/fault-diagnosis-of-centrifugal-pumps-using-motor-electrical-signals>. – Title from the screen. – ISBN: 978-953-51-0051-5. – DOI: 10.5772/26439.

225. Hernandez-Solis A. Diagnosis of Submersible Centrifugal Pumps: A Motor Current and Power Signature Approaches [Electronic resource] / Augusto Hernandez-Solis, Fredrik Carlsson // EPE Journal. – March 2010. – Vol. 20. – №. 1. – P. 58–64. – Mode of access: <http://infoscience.epfl.ch/record/112276/files/FEDSM2007-37549.pdf>. – Title from the screen. – DOI: 10.1080/09398368.2010.11463749.

226. Kallesøe C. S. Fault Detection and Isolation in Centrifugal Pumps [Electronic resource] / C. S. Kallesøe // Ph.D. thesis. – Aalborg: Department of Control Engineering, Aalborg University. – 2005. – 211 p. – Mode of access :

<http://vbn.aau.dk/files/501583/thesis-1a.pdf>. – Title from the screen. – ISBN: 8790664221 (print).

227. Kallesoe C. S. Model Based Fault Detection in a Centrifugal Pump Application [Electronic resource] / C. S. Kallesoe, V. Cocquempot, R. Izadi-Zamanabadi // IEEE Transactions on Control Systems Technology. – 2006. – Vol. 14. – Issue 2. – P. 204–215. – Mode of access : <http://www.vbn.aau.dk/files/168785/fulltext>. – Title from the screen.

228. Kallesoe C. S. Model Based Fault Diagnosis in a Centrifugal Pump Application using Structural Analysis [Electronic resource] / C. S. Kallesoe, V. Cocquempot, R. Izadi-Zamanabadi, H. Rasmussen // IEEE International Conference on Control Applications, 2004 : V Cocquempot in Proceedings. – Vol. 2. – P. 1229–1235. – Mode of access : <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=1387541>. – Title from the screen.

229. Kiselychnyk O. Interactive energy saving control of water supply pump based on pressure measurement / O. Kiselychnyk, M. Bodson, H. Werner // Вісник КДПУ імені Михайла Остроградського. – 2009. – Вип. 3/2009 (56). Ч. 1. – С. 166–172.

230. Kiselychnyk O. Improved interactive energy saving control algorithms of water supply pump based on head measurement [Electronic resource] / O. Kiselychnyk, S. Buryan, M. Bodson, H. Werner // Electroinform : scientific and technical journal. – Lviv, 2009. – P. 349–354. – Mode of access : http://www.soburyan.edu.kpi.ua/attachments/048_Paper_Kiselychnyk_Buryan_Bodson_Werner.pdf. – Title from the screen.

231. Kiselychnyk O. Nonsensor control of centrifugal water pump with asynchronous electric-drive motor based on extended Kalman filter / O. Kiselychnyk, M. Bodson // Russian Electrical Engineering. – 2011. – Vol. 82. – N 2. – P. 69-75. – ISSN 1068-3712.

232. Kiselychnyk O. Overview of Energy Efficient Control Solutions for Water Supply Systems [Electronic resource] / O. Kiselychnyk, M. Bodson, H. Werner // Transactions of Kremenchuk State Polytechnic University. – 2009. – N 3/2009

- (56). – part 1. – P. 40–45. – Mode of access : http://scholar.googleusercontent.com/scholar?q=cache:FhLQldP0an8J:scholar.google.com/&hl=uk&as_sdt=0,5. – Title from the screen.
233. Levi E. Modeling of Magnetic Saturation in Smooth Air–Gap Synchronous Machines / E. Levi // *IEEE Trans. on Energy Conversion*, 1997. – Vol. 12. – No 2. – pp. 151–156.
234. Lysiak V. Influence of Parameters of Induction Motor-Centrifugal Pump Units with Hydropaths Connected in Series on their Modes / Vladyslav Lysiak // *Energy Engineering and Control Systems*. – 2015. – Vol. 1. – №. 2. – ISSN: 2411-8028. – P. 85–90.
235. Mermoud A. Pump Behaviour Modelling For Use In A General Pv Simulation Software [Electronic resource] / André Mermoud // *Proceedings of The 19th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU PVSEC): Paris, France, 7-11 June 2004*. – Mode of access: http://www.pvsyst.com/images/papers/pump_model_paris2004.pdf. – Title from the screen.
236. Miedema S. A. Modeling and Simulation of the Dynamic Behavior of a Pump/Pipeline System [Electronic resource] / S. A. Miedema // *17th Annual Meeting & Technical Conference of the Western Dredging Association*. – New Orleans, 1996. – Mode of access : http://www.dredgingengineering.com/dredging/media/LectureNotes/Miedema/1996_WEDA/WEDA96.pdf. – Title from the screen.
237. Misiunas D. Burst Detection and Location in Pipelines and Pipe Networks with application in water distribution systems [Electronic resource] / D. Misiunas // *Department of Industrial Electrical Engineering and Automation Lund University*. – Sweden : Lund, 2004. – ISBN 91-88934-30-6. – Mode of access : <http://www.iea.lth.se/publications/Theses/LTH-IEA-1038.pdf>. – Title from the screen.
238. Nakamura H. Quasi Current Resonant DC Link AC/AC Converter / H. Nakamura, Y. Murai , T. A. Lipo // [IEEE Transactions on Power Electronics](#), 1994. – Volume: 9. – [Issue: 6](#). – P. 594–600. – ISSN 0885-8993. – DOI:

[10.1109/63.334774](https://doi.org/10.1109/63.334774).

239. Nasser A.A. Modal Analysis of a Centrifugal Pump [Electronic resource] / A.A. Nasser, M.A. Nasser**, E.H.T. El-Shirbeeney, S.M. Abdel-Rahman // Proceedings-Spie The International Society For Optical Engineering; 1, 3243; 550-557 of The 16th International Modal Analysis Conference (IMAC XVI) : 1998. – Mode of access : <http://sem-proceedings.com/16i/sem.org-IMAC-XVI-16th-Int-161606-Modal-Analysis-Centrifugal-Pump.pdf>. – Title from the screen. – P. 550–557. – ISBN : 0912053593. – ISSN : 1046-6770.

240. Ong Chee–Mun. Dynamic Simulation of Electric Machinery / Ong Chee–Mun // Upper Saddle River, NJ, Prentice Hall. – 1998. – 626 p.

241. Orlovskis G. Start-up and Reverse Analysis of Induction Motor Model in Pump Regime [Electronic resource] / G. Orlovskis, K. Ketners // Power & Electrical Engineering. – January 2013. – Vol. 31. – P. 117–122. – ISSN: 14077345. – Mode of access: <https://ortus.rtu.lv/science/en/publications/16580/fulltext/pub16580.pdf>. – Title from the screen.

242. Ortega J. M. Iterative solution of nonlinear equations in several variables/ J. M. Ortega, W. C. Rheinboldt – New York and London: Academic Press, 2000. – 572 p. DOI: [10.1137/1.9780898719468](https://doi.org/10.1137/1.9780898719468).

243. Pechenik M. Experimental research of interactive energy saving controller of water supply pump based on flow rate measurement / M. Pechenik, O. Kiselychnyk, S. Buryan // Transactions of Kharkiv National Technical University. – 2010. – N 28. – P. 272–274.

244. Pechenik M. Sensorless control of water supply pump based on neural network estimation [Electronic resource] / M. Pechenik, O. Kiselychnyk, S. Buryan, D. Petukhova // Electrotechnic and Computer Systems : scientific and technical journal. – Odesa, 2011. – N 03(79) (56). – Part 1. – P. 462–466. – Mode of access : http://so-buryan.edu.kpi.ua/attachments/2011_7.pdf. – Title from the screen.

245. Perovic S. Fuzzy logic system to detect pump faults from motor current spectra / S. Perovic, P. J. Unsworth, E. H. Higham // Industry Applications Conference: in Proc. – Chicago, Ill. – USA, 2001. – Vol. 1. – P. 274–280. – ISSN:

0197-2618. – Print ISBN: 0-7803-7114-3. – DOI:

<http://dx.doi.org/10.1109/IAS.2001.955423>.

246. Popovich M., D. Extremal electromechanical control system of water supply pumps connected in series / M. Popovich, O. Kiselychnyk, S. Buryan // Вісник КДУ імені Михайла Остроградського. – К., 2010. – Вип. 3/2010 (62). Ч. 2. – С. 37–41.

247. Romero G. Simulation of an Asynchronous Machine by using a Pseudo Bond Graph [Electronic resource] / G. Romero, J. Félez, J. Maroto, M.L. Martínez // AIP Conference Proceedings. – 2008. – Mode of access : <http://dx.doi.org/10.1063/1.3037038>. – Title from the screen. – ISSN: 0094-243X.

248. Stickland M.T. Numerical simulation of centrifugal pumps / M.T. Stickland, T.J. Scanlon, E. Blanco-Marigorta; J. Fernandez-Francos, C. Santolaria-Morros, J.L. Parrondo-Gayo. – Proceedings of ASME 2000 Fluids Engineering Division Summer Meeting. – Boston, Massachusetts: June 11-15, 2000. – paper FEDSM2000-11281. – P.1–6. – ISBN 0791819665.

249. Vasquez H. A new simplified mathematical model for a switched reluctance motor in a variable speed pumping application / H. Vasquez, J. K. Parker // Mechatronics. – November, 2004. – Vol. 14. – Issue 9. – P. 1055–1068. – DOI: 10.1016/j.mechatronics.2004.04.007.

250. Zargari N. A Medium Voltage AC Drive for Oil Sands Applications / Navid Zargari, Manish Pande, Richard Paes // IEEE Canadian Review [Electronic resource] / IEEE Canada. – 2008. – No 57. — Mode of access : www.ieee.ca/canrev/cr57/IEEECanadianReview_no57.pdf. – Title from the screen.

ДОДАТКИ

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Директор
ЛМКП «Львівводоканал»

В. В. Воцьський

«31» _____ 2016 р.

А К Т

**впровадження результатів кандидатської
дисертаційної роботи Лисяка В. Г.
"Математичне моделювання усталених режимів
електропостачальних систем помпових станцій"**

Цим актом підтверджуємо впровадження результатів наукових досліджень кандидатської дисертаційної роботи старшого викладача кафедри електропостачання промислових підприємств міст і сільського господарства Національного університету «Львівська політехніка» Лисяка В. Г. у виконаному для ЛМКП «Львівводоканал» аналізі експлуатаційних режимів електропостачальної системи каналізаційної помпової станції та оцінки ефективності впровадження частотного керування двигунами pomp.

Робота виконувалась із використанням розробленої Лисяком В.Г. математичної моделі усталених режимів електротехнічного комплексу "електропостачальна система – помпова станція" й базується на таких наукових результатах дисертаційної роботи:

- математичній моделі узагальненого електротехнічного комплексу "електропостачальна система – помпова станція";
- аналізі гідравлічних режимів помпової станції та електромагнітних режимів електропостачальної системи як нерозривно пов'язаних між собою об'єктів різної фізичної природи;
- можливості урахування взаємного впливу довільних електричних і гідравлічних параметрів і координат режимів із довільним ступенем деталізації;
- методі розрахунку розподілу робочої рідини між гідравлічно сполученими помпами з розбіжними гідравлічними параметрами, який дозволяє отримувати функції керування ними;
- можливості урахування наявних способів керування продуктивністю помпових агрегатів і порівняння їх з іншими поширеними способами.

Упровадження результатів роботи дозволило:

- здійснити аналіз наявних усталених режимів помпової стації та її електропостачальної системи, виявити теоретичний потенціал енергозаощадження близько 21% електроенергії;
- порівняти показники усталених режимів для різних можливих варіантів керування продуктивністю помпових агрегатів;
- сформулювати рекомендації стосовно запровадження частотного керування двигунами помпових агрегатів, як основних електроприймачів, що дозволить заощадити 14-16% електроенергії.

Результати дисертаційної роботи Лисяка В.Г. формують методичну базу оптимізації режимів помпової стації та її електропостачальної системи, мають наукове і прикладне значення з відчутним економічним ефектом.

Головний інженер

ЛМКП «Львівводоканал»



А. М. Шимоняк

ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з науково-педагогічної
роботи Національного університету
«Львівська політехніка»

Давидчак О. Р.

_____ 2016 р.



АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

результатів дисертаційної роботи Лисяка Владислава Георгійовича
"Усталені режими електротехнічного комплексу
"електропостачальна система – помпова станція"

Комісія у складі:

Голова: зав. кафедри електропостачання промислових підприємств, міст і сільського господарства (ЕПМС), д.т.н., професор Малиновський А. А.

Члени: доц. каф. ЕПМС, к.т.н., доц. Турковський В. Г.,
доц. каф. ЕПМС, к.т.н., доц. Шелех Ю. Л.

склали цей акт про те, що основні положення та результати дисертаційної роботи Лисяка Владислава Георгійовича на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук використовуються у навчальному процесі кафедр ЕПМС, а саме: розроблена автором математична модель усталених режимів електротехнічного комплексу "електропостачальна система – помпова станція" використовується при підготовці студентів базового напрямку 6.050701 "Електротехніка та електротехнології" з подальшим навчанням за спеціальністю 7(8).05070108 "Енергетичний менеджмент" у початковій дисципліні "Оптимізація режимів систем електропостачання" (Тема 3: "Основні характеристики та режими роботи електропостачальних систем із асинхронним навантаженням") та при підготовці студентів спеціальності 7(8).05070103 "Електротехнічні системи електроспоживання" у початковій дисципліні "Режими електропостачальних систем та керування ними" (Тема 19: "Енергоощадність й оптимізація енергоспоживання промислових об'єктів").

Зав. каф. ЕПМС, д.т.н., проф.

Малиновський А. А.

Доц. каф. ЕПМС, к.т.н., доц.

Турковський В. Г.

Доц. каф. ЕПМС, к.т.н., доц.

Шелех Ю. Л.