

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ "ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА"**

**ЛИСЯК ВЛАДИСЛАВ ГЕОРГІЙОВИЧ**

УДК 621.316.11:621.67

**УСТАЛЕНІ РЕЖИМИ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНОГО КОМПЛЕКСУ  
"ЕЛЕКТРОПОСТАЧАЛЬНА СИСТЕМА – ПОМПОВА СТАНЦІЯ"**

Спеціальність 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

**Львів – 2016**

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі електропостачання промислових підприємств, міст і сільського господарства Національного університету «Львівська політехніка» Міністерства освіти і науки України.

**Науковий керівник:** кандидат технічних наук, доцент  
**Гоголюк Петро Федорович,**  
Національний університет «Львівська політехніка»,  
доцент кафедри електропостачання промислових  
підприємств, міст і сільського господарства.

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор,  
**Лупенко Анатолій Миколайович,**  
Тернопільський національний технічний університет  
імені Івана Пулюя,  
завідувач кафедри світлотехніки та електротехніки

кандидат технічних наук, доцент,  
**Курляк Петро Омелянович,**  
Івано-Франківський національний технічний  
університет нафти і газу,  
доцент кафедри електропостачання та  
електрообладнання промислових підприємств

Захист відбудеться „29” грудня 201\_6 р. о 12 годині 00 хв. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.052.02 у Національному університеті “Львівська політехніка”(79013, м. Львів, вул. С. Бандери, 12, ауд.114 головного корпусу).

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці Національного університету “Львівська політехніка”(79013, м. Львів, вул. Професорська 1).

Автореферат розіслано „26” листопада 201\_6 р.

Учений секретар спеціалізованої  
вченої ради Д 35.052.02,  
к.т.н., доц.

В.І. Коруд

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Аналіз координат експлуатаційних режимів роботи помпових станцій (ПС) із відцентровими помповими турбоагрегатами (ВПТА), проведений низкою дослідників, показав, що витрати pomp повільно змінюються в часі (за винятком пуску, зупинки устаткування й аварійних процесів). Це обґрунтовано дозволяє виокремити такі тривалі режими помпових станцій та їхніх електропостачальних систем (ЕПС) і розглядати їх як квазіусталені, аналіз яких вимагає створення відповідних засобів. Огляд наукових публікацій, присвячених електротехнічним комплексам помпових і компресорних станцій як в цілому, так і їхнім складовим, засвідчив важливість розроблення ефективних методів і засобів аналізу їхніх режимів із метою підвищення енергоефективності.

У більшості наявних математичних моделей (ММ) електроспоживачів, які складаються з нерозривно пов'язаних між собою енергетично впливових підсистем різної фізичної природи, частина їхніх підсистем 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.

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

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Тема дисертації відповідає науковому напрямку кафедри електропостачання промислових підприємств, міст і сільського господарства Національного університету «Львівська політехніка» «Підвищення надійності й ефективності систем енергозабезпечення»; дисертаційна робота виконана в межах науково-дослідної роботи "Математичне моделювання усталених режимів електропостачальних систем помпових станцій" (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 "ЕПС-ПС" для підвищення енергоефективності.

Для досягнення цієї мети необхідно розв'язати такі задачі:

1. Дослідити сучасний стан виконання та енергоефективність функціонування ЕТК "ЕПС-ПС", методи й засоби аналізу режимів їхньої роботи.

2. Розробити стратегію аналізу усталених режимів роботи ЕТК "ЕПС-ПС" як макрооб'єкта, удосконалити наявні ММ основних елементів таких комплексів шляхом їхньої адаптації до подальшої композиції.

3. Сформувати ММ усталених режимів роботи блоків ВПТА, їхніх груп, ЕПС та узагальненого ЕТК "ЕПС-ПС".

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 ЕТК "ЕПС-ПС".

**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 "ЕПС-ПС" 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 "ЕПС-ПС" 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 "ЕПС-ПС" конкретної конфігурації дає змогу ефективно застосовувати її як під час проектування нових енергоефективних структур ЕТК "ЕПС-ПС", так і для покращення режимів роботи діючих ЕТК "ЕПС-ПС".

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 "ЕПС-ПС".

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

5. Створена математична модель усталених режимів узагальненого ЕТК "ЕПС-ПС" може бути використана як основа для розроблення спеціалізованого програмного забезпечення в складі автоматизованих систем проектування ЕТК "ЕПС-ПС".

6. Створена математична модель може бути застосована для комплексного аналізу електромагнітних, гідравлічних і теплових режимів, електротехнологічної ефективності роботи електротехнічного комплексу помпування 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 начальній дисципліні "Оптимізація режимів систем електропостачання" та при підготовці студентів спеціальності 7(8).05070103 "Електротехнічні системи електроспоживання" у начальній 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 "ЕПС-ПС" [7, 9];
- поетапно розроблено математичну модель усталених режимів узагальненого ЕТК "ЕПС-ПС" [2, 3, 4, 5, 6, 7, 9, 10, 11, 12, 13];
- розроблено метод розрахунку розподілу робочої рідини між гідравлічно сполученими ВПТА з неузгодженими номінальними гідравлічними параметрами, що дозволяє отримувати функції керування ними [8];
- розроблено формалізовану методику формування ММ усталених режимів ЕТК "ЕПС-ПС" конкретної конфігурації [9, 10];
- реалізовано ММ для низки варіантів виконання ЕТК "ЕПС-ПС" конкретної конфігурації [1, 9, 10, 14] та перевірено її адекватність.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення і результати досліджень доповідались і були схвалені на: 4-й міжнародній науково-технічній конференції (МНТК) "Математичне моделювання в електротехніці, електроніці та електроенергетиці", присвяченій 75-річчю кафедри "Електричні машини та

апарати"(22-25 жовтня 2003р, м. Львів, Україна); IEEE – Power Systems Conference & Exposition (10–13 October 2004, New York City, NY); XIII International Symposium On Theoretical Electrical Engineering (July 4–7 2005, Lviv, Ukraine); 5-й МНТК "Математичне моделювання в електротехніці та електроенергетиці" (17-20 жовтня 2007 р., м. Львів, Україна); 6-й МНТК "Ефективність та якість електропостачання промислових підприємств" (21-23 травня 2008 р., м. Маріуполь, Україна); IEEE – International Symposium on Industrial Electronics (Cambridge (UK) from 30th June to 2nd July 2008); МНТК "Математичне моделювання в електротехніці й електроенергетиці" ММЕлектро-2009 (03-06 червня 2009 р., м. Львів, Україна); 4-й МНТК "Інтелектуальні енергетичні системи – ESS'15" (09-12 червня 2015 р., Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна); науковому семінарі Інституту електродинаміки НАН України «Моделі та методи комп'ютерного аналізу електричних кіл та електромеханічних систем» (м. Львів, травень 2016р.).

**Публікації.** За результатами виконаних досліджень опубліковано 14 статей із них: 2 – у наукових періодичних виданнях інших держав (з них 1 у виданні, яке включене до міжнародної наукометричної бази даних SCOPUS); 9 – 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, яка додатково відображає наукові результати дисертації.

**Структура й обсяг роботи.** 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.

## **ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ**

**У вступі** обґрунтовано актуальність роботи, визначено її мету, завдання, викладено основні наукові положення та результати, що виносяться на захист. Показано їх новизну й практичне значення. Наведено відомості про апробацію роботи і публікації матеріалів дослідження.

**У першому розділі** проведено огляд наукових публікацій вітчизняних і зарубіжних авторів, присвячених електротехнічним комплексам помпових і компресорних станцій як в цілому, так і їхнім складовим.

Рушієм помпових турбоагрегатів є електродвигуни (асинхронні, рідше – синхронні). ПС є суттєвими споживачами електроенергії. Застосування керованого електропривода різних видів турбоагрегатів дозволяє заощадити 25-80% електроенергії. Значний потенціал енергоощадності ВПТА присутній практично скрізь, де вони застосовуються. Тип ПС визначається її призначенням, видом речовини, режимом джерела речовини, типом і характеристиками основного устаткування, а також низкою інших факторів. В цій роботі розглядається ПС з електроприводними ВПТА у нерозривному зв'язку з ЕПС як єдиний електротехнічний комплекс.

Сучасний стан математичного моделювання ПС і їх ЕПС (5) 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.

На підставі цього обґрунтована актуальність досліджень, сформовані мета й завдання дисертаційної роботи.

**У другому розділі** запропоновані загальні засади формування ММ усталених режимів узагальненого ЕТК "ЕПС-ПС", удосконалено наявні ММ основних елементів таких комплексів шляхом відповідної їх адаптації. Під час моделювання гідравлічної підсистеми використано метод ЕГДА. Рівняння ММ усталених режимів елементів узагальненого ЕТК "ЕПС-ПС" формуються у відносних одиницях (в.о.) із використанням основних припущень для кожного них. Із метою формалізації рівняння математичної моделі сформовані в системі обертових ортогональних жорстко зв'язаних з робочим колесом ВП d-q координат.

Рівняння ММ окремих елементів сформовані з відповідними припущеннями у в.о. з використанням характерної для відповідного елемента системи базових величин. Для зв'язку між ММ однотипних елементів застосовано відповідні коефіцієнти переходу між системами базових величин.

ММ усталених режимів узагальненого ЕТК "ЕПС-ПС" побудована з таких ММ:

- 1) відцентрової помпи (ВП) – на підставі перетвореної заступної схеми;
- 2) гідравлічної мережі (ГМ) – на підставі спрощеної заступної схеми трубопровода;
- 3) асинхронного (АД), синхронного (СД) двигунів – із урахуванням нелінійного статичного магнітного опору головного магнітного кола;
- 4) механічного зв'язку двигуна з ВП – на підставі рівності механічних моментів і швидкостей обертання спільного вала двигуна й ВП;
- 5) двообвиткового трансформатора – на підставі Т-подібної заступної схеми з урахуванням нелінійного статичного магнітного опору головного магнітного кола;
- 6) перетворювача частоти й напруги (ПЧН) – у вигляді рівнянь балансів активної та реактивної потужностей;
- 7) пристрою поперечної компенсації реактивної потужності (ПКП) – у вигляді ємності з урахуванням втрат активної потужності;
- 8) лінії електропересилання (ЛЕП) – на підставі П-подібної заступної схеми;
- 9) статичного навантаження (СН) – у вигляді статичних характеристик активної та реактивної потужностей за напругою;
- 10) електроенергетичної системи (ЕЕС) – у вигляді джерела синусоїдної ЕРС зі скінченим індуктансом;
- 11) ММ гідравлічних зв'язків між ВПТА у складі багатоагрегатної системи та розподілу рідини між ВПТА;
- 12) ММ керування окремим ВПТА.

ММ керування окремим ВПТА реалізована для:

- керування напругою та (чи) частотою напруги статорів двигунів ВПТА – у вигляді окремих рівнянь;
- керування за наявності фазного ротора – у складі ММ (3) АД;
- активного керування – у вигляді ММ відповідних ВПТА в генераторному режимі;
- зміни умов роботи ВП (дроселювання, байпасування) – у складі ММ (1) помпи;
- застосування варіаторів – у складі ММ (4) механічного зв'язку двигуна з ВП.

Розкриємо детальніше зміст моделей (1) і (11).

1) За основу взято розроблену проф. Костишиним В. С. заступну схему ВП, зображену на рисунку 1. 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 гідрооперах заступної схеми.

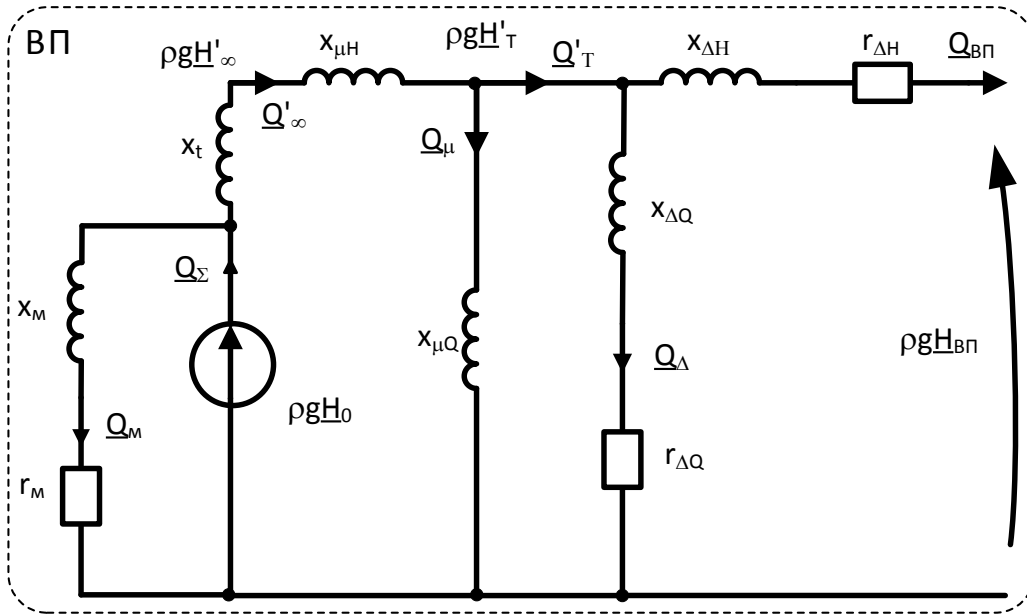


Рис. 1 Заступна електрична схема відцентрової помпи

Кількість рівнянь ММ моделі ВП зменшено шляхом еквівалентного перетворення схеми, що на рис. 1. Із урахуванням дроселя та байпаса отримуємо перетворену заступну схему ВП, зображену на рис. 2.

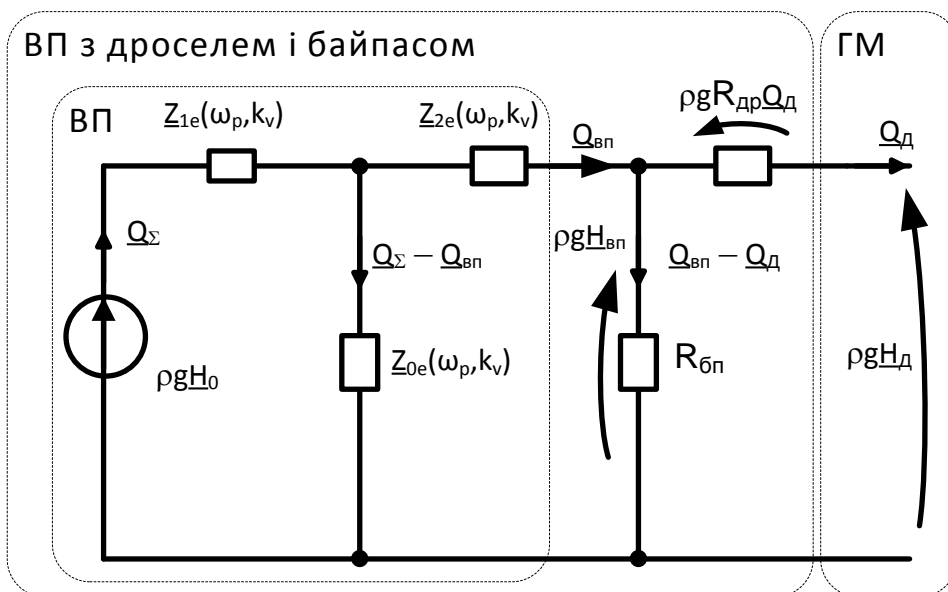


Рис. 2 Перетворена заступна схема відцентрової помпи



На цій схемі:  $H_0$  – розрахунковий напір ідеалізованої ВП;  $Q_d$ ,  $H_d$  – відповідно дійсна об’ємна витрата рідини та дійсний напір з урахуванням дроселя та байпаса реальної ВП;  $R_{др}$ ,  $R_{бп}$  – еквівалентні дисипативні гідроопори дроселя та байпаса, які є функціями кутів повороту засувки;  $R_{1e}$ ,  $X_{1e}$ ,  $R_{2e}$ ,  $X_{2e}$ ,  $R_{0e}$ ,  $X_{0e}$  – еквівалентні дисипативні та індуктивні гідроопори ВП (вони виражаються через опори схеми, що на рисунку 1, внаслідок її еквівалентного перетворення в схему, що на рис. 2, і є функціями в’язкості  $k_v$  робочої рідини та частоти обертання  $\omega_p$  робочого колеса).

**11)** ММ гідравлічних зв’язків багатоагрегатної системи pomp із ГМ та розподілу рідини між ВПТА.

Для однозначного розподілу сумарного напору  $H_d$  та сумарної витрати  $Q_d$  робочої рідини між агрегатами групи задані функції 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. Ці функції однозначно визначають необхідні для забезпечення цього розподілу частоти обертання робочих коліс ВП. Рівняння розподілу сумарного тиску та сумарної витрати робочої рідини між агрегатами групи мають вигляд:

$$H_{dk} = F_{H_k}(\mathbf{p}_H), \quad k = \overline{1, m}; \quad (1)$$

$$Q_{dj} = F_{Q_j}(\mathbf{p}_Q), \quad j = \overline{1, p}, \quad (2)$$

де  $\mathbf{p}_H$  і  $\mathbf{p}_Q$  – параметри цих функцій керування; в загальному випадку ними можуть бути будь-які параметри елементів, координати режиму електропостачальної системи помпової станції, гідромережі, споживачів чи їхня комбінація.

З метою формалізації формування функцій керування введено 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 маємо справу з двома типами неелементарних підгруп.

У загальному випадку з невідомими конкретними вимогами до АСК, логічним буде встановлення таких функцій керування, за яких розподіл об’ємних витрат і напорів агрегатів здійснюється пропорційно до їхніх номінальних значень. У цьому випадку функції керування напором помпи  $k$ -го агрегату та витратою помпи  $j$ -го агрегату набувають вигляду:

$$F_{H_k}(\mathbf{p}_H) = k_{роз.H_k} H_d, \quad k = \overline{1, m}; \quad (3)$$

$$F_{Q_j}(\mathbf{p}_Q) = k_{роз.Q_j} Q_d, \quad j = \overline{1, n}, \quad (4)$$

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

При цьому слід урахувати, 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  $k_{роз.H_k}$  напорів і  $k_{роз.Q_j}$  витрат, яка полягає у поетапному обчисленні цих коефіцієнтів для:

1) послідовної елементарної підгрупи групи агрегатів; 2) паралельної елементарної підгрупи агрегатів; 3) послідовної неелементарної підгрупи агрегатів; 4) паралельної неелементарної підгрупи агрегатів; 5) сполучених неелементарних підгруп.

Зв'язок між усіма ВП агрегатів і ГМ встановлюється на підставі конфігурації гідравлічної частини та обчислених за розробленим методом 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.

Рівняння стану ГМ і кожної з ВП сформовані у в.о. Рівняння розподілу робочої рідини (1) і (2) між агрегатами групи переписемо у в.о. із використанням таких коефіцієнтів переходу між системами базових величин:

$$k_{Q,ВП_{j,i}} = \frac{Q_{ВП.б_{j,i}}}{Q_{ВП.б}}; k_{H,ВП_{j,i}} = \frac{H_{ВП.б_{j,i}}}{H_{ВП.б}}; k_{Q,ГМ} = \frac{Q_{ГМ.б}}{Q_{ВП.б}}; k_{H,ГМ} = \frac{H_{ГМ.б}}{H_{ВП.б}}. \quad (5)$$

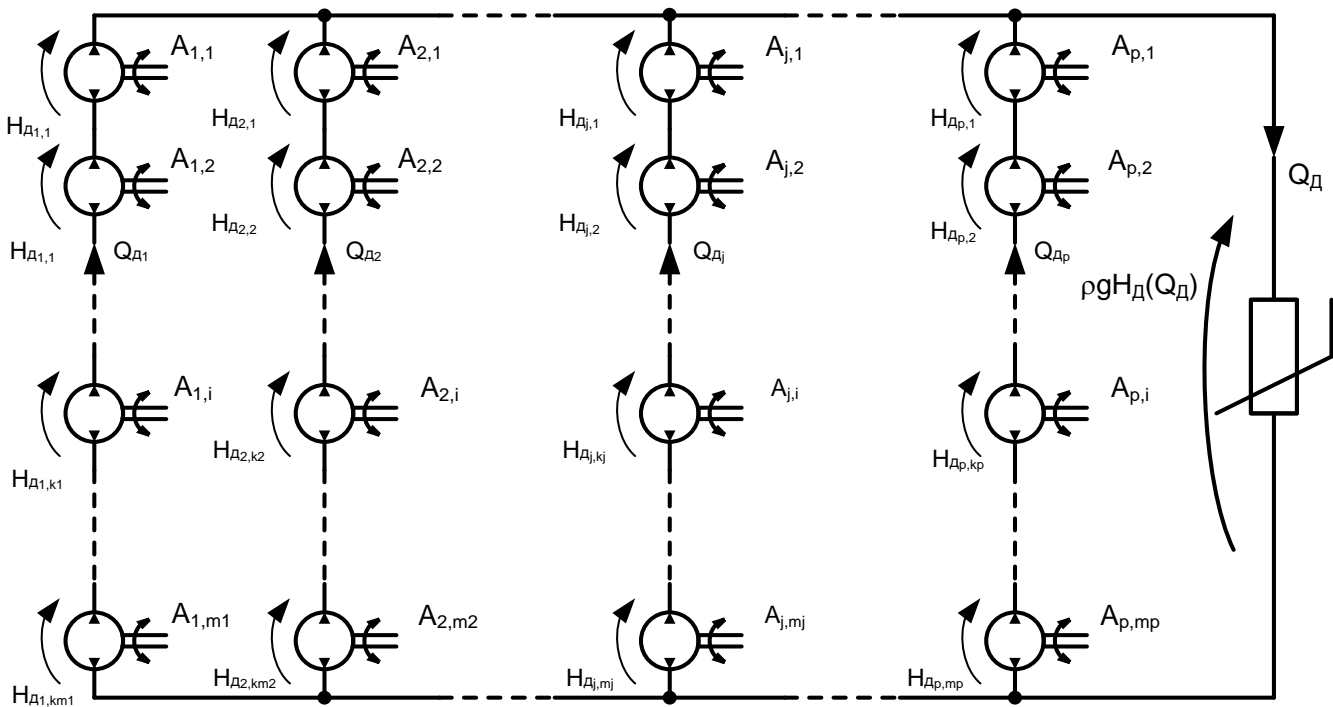


Рис. 3 Схема комбінованого сполучення гідротрактів pomp агрегатів

Візьмемо за основу схему сполучення ВПТА, що показана на рис. 3. 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 гідротрактів агрегатів.

Нумерація цих агрегатів у кожній із груп така:  $i=1,2,\dots,m_j$ . Таким чином, уся 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  $A_{j,i}$ .

Окремо слід зауважити, що під агрегатом  $A_{j,i}$  можна також розглядати й неелементарну підгрупу. Рівняння зв'язку між ГМ та всією групою ВП за витратою встановлюється на підставі балансу витрат і має такий вигляд:

$$\sum_{j=1}^p (k_{Q,ВП_{j,i}} Q_{d_{j,i}}) - k_{Q,ГМ} Q_d = 0, \quad i - \text{довільне} : 1 \text{ рівняння.} \quad (6)$$

Рівняння зв'язку між ГМ та всією групою ВП за напором встановлюється на підставі балансу напорів і має такий вигляд:

$$\sum_{i=1}^{m_j} (k_{H,ВП_{j,i}} H_{d_{j,i}}) - k_{H,ГМ} H_d = 0, \quad j - \text{довільне} : 1 \text{ рівняння.} \quad (7)$$

Рівняння розподілу витрат між ВП всієї групи має такий вигляд:

$$k_{Q,ВП_{j,i}} Q_{d_{j,i}} - k_{Q,ГМ} F_{Q_j}(\mathbf{p}_{Q_j}) = 0, \quad j = \overline{1, p-1}, \quad i - \text{довільне} : p-1 \text{ рівнянь.} \quad (8)$$

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

$$k_{H,ВП_{j,i}} H_{d_{j,i}} - k_{H,ГМ} F_{H_{j,i}}(\mathbf{p}_{H_{j,i}}) = 0, \quad j = \overline{1, p}, \quad i = \overline{1, m_j - 1} : n-p \text{ рівнянь.} \quad (9)$$

Рівність витрат  $m_j$  послідовно сполучених гідротрактами ВП у кожній  $j$ -й підгрупі відображається наступним рівнянням:

$$k_{Q,ВП_{j,i}} Q_{d_{j,i}} - k_{Q,ВП_{j,i+1}} Q_{d_{j,i+1}} = 0, \quad j = \overline{1, p}, \quad i = \overline{1, m_j - 1} : n-p \text{ рівнянь.} \quad (10)$$

Рівність напорів усіх  $p$  паралельно сполучених гідротрактами підгруп відображається наступним рівнянням:

$$\sum_{i=1}^{m_j} (k_{H,ВП_{j,i}} H_{d_{j,i}}) - \sum_{i=1}^{m_{j+1}} (k_{H,ВП_{j+1,i}} H_{d_{j+1,i}}) = 0, \quad j = \overline{1, p-1} : p-1 \text{ рівнянь.} \quad (11)$$

Для зображеної на рис. 3 схеми комбінованого сполучення гідротрактами ВП 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 (4), (3) маємо:

$$F_{Q_j}(\mathbf{p}_{Q_j}) = k_{\text{роз},Q_j} Q_d; \quad (12)$$

$$F_{H_{j,i}}(\mathbf{p}_{H_{j,i}}) = k_{\text{роз},H_{j,i}} H_d. \quad (13)$$

У матрично-векторній формі рівняння (6)..(11) ММ гідравлічних зв'язків багатоагрегатної системи набувають вигляду:

$$\mathbf{f}_{зв}(\mathbf{X}_{зв}) = \mathbf{0}, \quad (14)$$

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

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

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

Для пошуку нульових наближень із метою розв'язання нелінійної системи скінчених рівнянь (НССР) математичної моделі використано диференційний метод у формі  $h$ -характеристик. Для розв'язання НССР стану ММ одиничного

асинхронного агрегату АД–ВП застосовано метод Ньютона. Ефективність цього методу виявилась недостатньою для розв'язання НССР математичної моделі ЕТК "ЕПС-ПС" внаслідок значної розрідженості матриці Якобі такої системи. Застосування методу Левенберга-Марквардта в середовищі Mathcad допомогло вирішити цю проблему.

У третьому розділі поетапно наведено формування ММ усталених режимів узагальненого ЕТК "ЕПС-ПС" довільної конфігурації зі змішаним сполученням гідротрактів ВП на підставі розроблених у другому розділі цієї роботи ММ окремих елементів. З метою досягнення максимально можливої адаптації розроблюваної ММ до тих чи інших конкретних умов представимо ЕТК "ЕПС-ПС" узагальненою структурною схемою, що наведена на рис. 4, умовно розділивши його на дві частини: ЕПС та групу блоків електроприводних ВПТА із ГМ, між якими існує електричний зв'язок за напругою та струмом. 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 із різним рівнем напруги. Ця інформація стає відомою лише під час аналізу схеми ЕПС конкретного електроприймача. Таким чином, сформувавши математичну модель ЕПС та, об'єднавши її за допомогою рівнянь зв'язку з ММ групи ВПТА, ми отримаємо ММ усталених режимів узагальненого ЕТК "ЕПС-ПС".

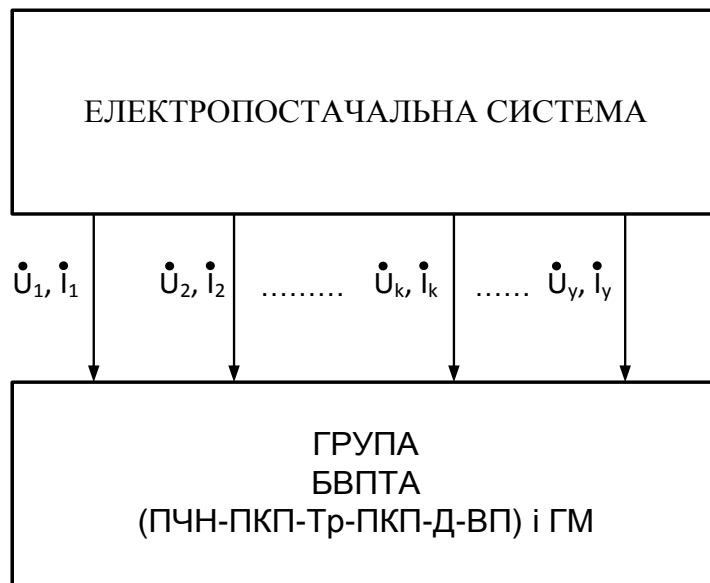


Рис. 4. Структурна схема узагальненого ЕТК "ЕПС-ПС"

Зважаючи на те, що, схема приєднання електроприводних ВПТА до ЕПС наперед невідома, вбачається доцільним записати рівняння зв'язку між ЕПС і групою ВПТА у такому вигляді:

$$U_{нд_k} - U_{1пчд_{g_k}} = 0, \quad g_k = \overline{1, w_k}, \quad k = \overline{1, y}; \quad (15)$$

$$U_{нд_k} - U_{1пчq_{g_k}} = 0, \quad g_k = \overline{1, w_k}, \quad k = \overline{1, y}; \quad (16)$$

$$I_{нд_{г_k}} - I_{пкнд_{k,2}} - I_{наvd_{k,2}} - \sum_{g_k=1}^{w_k} I_{1пчд_{g_k}} = 0, \quad k = \overline{1, y}; \quad (17)$$

$$I_{ндгk} - I_{пкпк,2} - I_{навк,2} - \sum_{g_k=1}^{w_k} I_{пчq_{gk}} = 0, \quad k = \overline{1, y}, \quad (18)$$

де  $U_{ндk}, U_{нqk}$  – ортогональні складові напруги обвитки НН знижувального трансформатора  $T_k$   $k$ -ї ланки;  $U_{пчд_{gk}}, U_{пчq_{gk}}$  – ортогональні складові вхідної напруги ПЧН  $g_k$ -го ВПТА, приєднаного до  $k$ -ї ланки;  $I_{ндгk}, I_{нqгk}$  – ортогональні складові струму обвитки НН знижувального трансформатора  $T_k$   $k$ -ї ланки;  $I_{пкпд_{k,2}}, I_{пкпк,2}$  – ортогональні складові струму ПКП  $C_{k2}$   $k$ -ї ланки;  $I_{навд_{k,2}}, I_{навк,2}$  – ортогональні складові струму СН  $R_{k2}, Q_{k2}$   $k$ -ї ланки;  $I_{пчд_{gk}}, I_{пчq_{gk}}$  – ортогональні складові вхідного струму ПЧН та напруги  $g_k$ -го ВПТА, приєднаного до  $k$ -ї ланки;  $W_k$  – кількість помпових агрегатів, ПЧН яких приєднані до  $k$ -ї ланки.

Кількість рівнянь зв'язку дорівнює:

$$N_{P.GP-EPC} = 2y + 2n_{AD} + 2n_{CD}. \quad (19)$$

На підставі даних про кількість рівнянь і невідомих для групи ВПТА, ЕПС та зв'язку ЕПС з групою ВПТА, отримуємо систему

$$\begin{aligned} N_{P.ETK} \text{ "ЕПС-ПС"} &= N_{P.GP} + N_{P.EPC} + N_{P.GP-EPC} = 38n_{AD} + 36n_{CD} + 26y + 26 \text{ рівнянь із} \\ N_{H.ETK} \text{ "ЕПС-ПС"} &= N_{H.GP} + N_{H.EPC} + N_{H.GP-EPC} = 38n_{AD} + 36n_{CD} + 26y + 27 \text{ невідомими,} \end{aligned} \quad (20)$$

де  $n_{AD}$  – кількість асинхронних ВПТА;  $n_{CD}$  – кількість синхронних ВПТА;  $y$  – кількість ланок ЕПС (рис. 4).

У матрично-векторному вигляді система рівнянь ММ набуває вигляду:

$$\mathbf{f}_{ETK}(\mathbf{X}_{ETK}) = \mathbf{0}, \quad (21)$$

де  $\mathbf{X}_{ETK}$  "ЕПС-ПС" – вектор-стовпець координат режиму ЕТК "ЕПС-ПС".

Рівняння (21) є одновимірною ( $N_{H.PC} - N_{P.PC} = 1$ ) неявною характеристикою ЕТК "ЕПС-ПС" у  $N_{H.PC}$ -вимірному просторі. Вектор  $\mathbf{X}_{ETK}$  "ЕПС-ПС" координат цього простору є сукупністю  $N_{H.PC}$  координат усталеного режиму ЕТК "ЕПС-ПС":

$$\mathbf{X}_{ETK} = (X_1, X_2, \dots, X_v, \dots, X_{N_{H.ETK}})_t. \quad (22)$$

Будь-яку з координат вектора (22) можна прийняти за незалежну. Тоді всі інші координати стають залежними від неї:

$$\mathbf{X}_{ETK}^v = (X_1, X_2, \dots, X_{v-1}, X_{v+1}, \dots, X_{N_{H.PC}-1}, X_{N_{H.ETK}})_t = \varphi(X_v), \quad (23)$$

де  $\mathbf{X}_{ETK}^v$  – вектор-стовпець залежних від  $X_v$  координат усталеного режиму узагальненого ЕТК "ЕПС-ПС".

У цьому разі рівняння (21) перетворюється в нуль-вимірну характеристику й описує усталений режим ЕТК "ЕПС-ПС", який визначається  $N_{H.PC}-1$  координатами вектора  $\mathbf{X}_{ETK}^v$ . Послідовно надаючи числових значень обраній незалежній координаті  $X_v$  і, щоразу розв'язуючи числовим методом НССР (21), ми отримуємо функційні залежності (23) вектора  $\mathbf{X}_{ETK}^v$  усіх інших залежних від неї координат. Таким чином ми одержуємо функційні залежності координат усталеного режиму від заданої незалежної змінної. Наприклад, задаючи низку різних значень витрати рідини ГМ, ми розраховуємо всі інші координати усталеного режиму всіх елементів ЕТК "ЕПС-ПС".

У четвертому розділі для перевірки адекватності створеної ММ здійснено розрахунок ustalених режимів паралельно сполучених гідротрактами двох асинхронних електроприводних ВПТА магістральної ПС №1 першої черги ЛВДС "Сколе". Адекватність відтворення ММ технологічних показників режиму агрегату (рис. 5 – експериментальні дані показано крапками; на рисунку додатково зображено прогнозовану активну потужність АД за умови частотного керування АД за функцією М. Костенка) оцінено відносною похибкою розрахункової активної потужності на затискачах АД агрегату (рис. 6).

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% та перевищує 11,7% зі зниженням відносного значення витрати менше 6,9%. Середньоквадратична відносна похибка в усьому діапазоні витрат складає 6,1%. 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%.

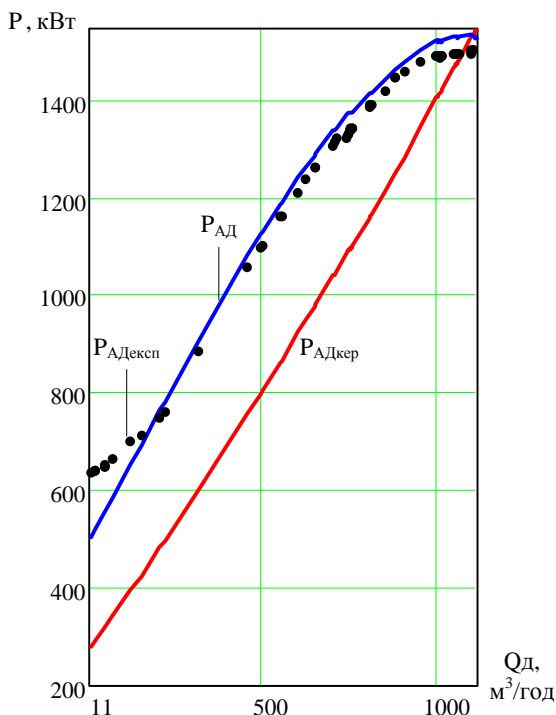


Рис. 5 Активна потужність на затискачах статора двигуна

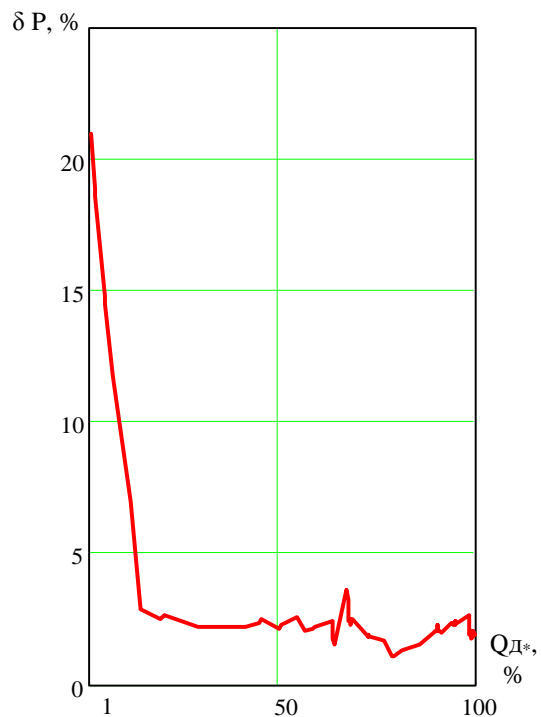


Рис. 6 Відносна похибка моделювання

Крім цього, у четвертому розділі здійснено розрахунки координат ustalених режимів низки ЕТК "ЕПС-ПС" конкретної конфігурації та проведено аналіз їхніх результатів.

Четвертий розділ завершується прикладом застосування розробленої ММ для аналізу ustalених режимів та розроблення системи керування ними на прикладі ЕТК "ЕПС-ПС", функціональну блок-схему системи автоматичного керування (САК) режимами помпування робочої рідини якого зображено на рис. 7. Обґрунтовано раціональний варіант схеми силових кіл живлення та

компенсації реактивної потужності електротехнічного комплексу "електропостачальна система – помпова станція". Послідовно працюють група з двох однакових паралельно сполучених підпірних і група з трьох однакових паралельно сполучених основних ВПТА.

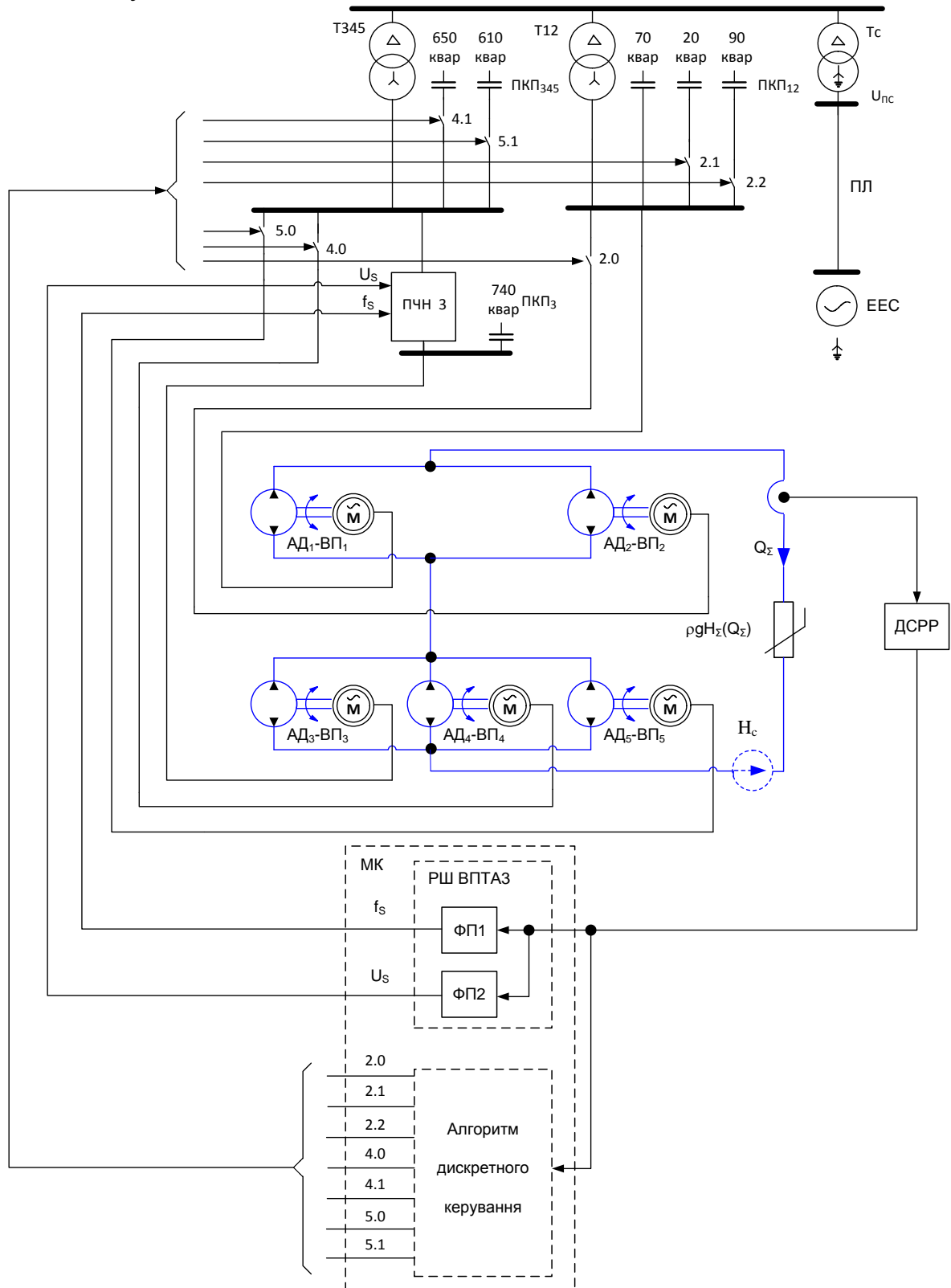


Рис. 7 Функціональна блок-схема системи автоматичного керування режимами помпування робочої рідини електротехнічного комплексу "електропостачальна система – помпова станція"





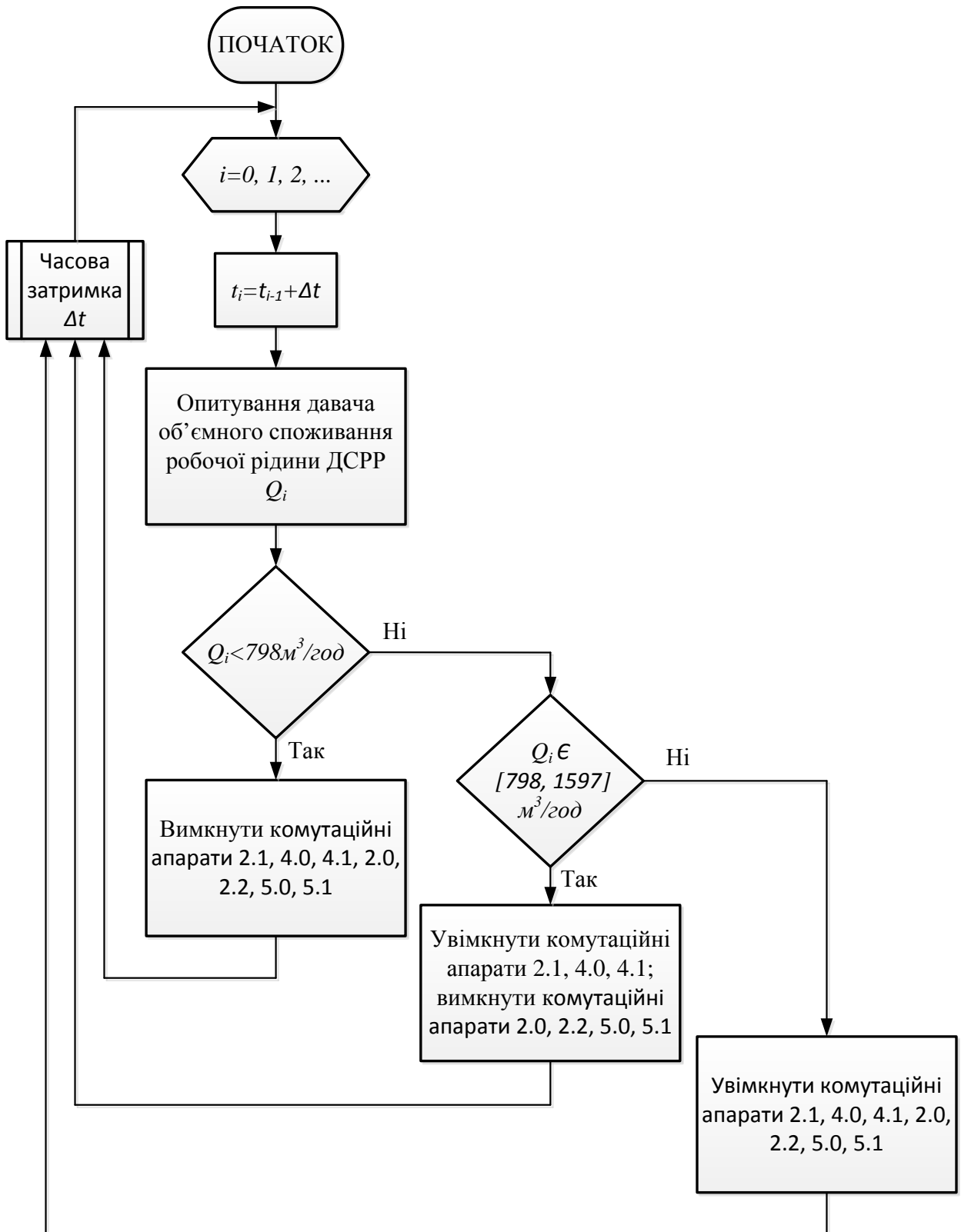


Рис. 8 Алгоритм дискретного автоматичного керування (увімкнення/вимкнення) електроприводними ВПГА і ПКП електротехнічного комплексу "електропостачальна система – помпова станція"

Синтезований алгоритм дискретного керування (увімкнення/вимкнення) помповими агрегатами і ПКП відповідає отриманій таблиці 2 оперативних

перемикань. Обчислення необхідного значення часової дискрети  $\Delta t$  синтезу вектора керування є окремою задачею; воно здійснюється за результатами статистичних дослідження динаміки зміни витрати  $Q_i$ .

Вихідні дискретні керуючі сигнали комутаційних апаратів 2.0, 2.1, 2.2, 4.0, 4.1, 5.0, 5.1 формуються згідно отриманого алгоритму (рис. 8) у функції поточної витрати робочої рідини  $Q_i$  в блоці дискретного (логічного) керування мікроконтролера, в якому програмно реалізується цей алгоритм.

Отримані за допомогою створеної ММ графічні залежності статичних моделей формування цих сигналів у функції поточного значення  $Q_i$  споживання робочої рідини показано на рис. 9 і 10 відповідно. Ці залежності синтезованого раціонального закону скалярного керування згідно (2.230) відтворюються в двох функціональних перетворювачах ФП1 і ФП2 реалізованого в мікроконтролері регулятора швидкості РШ частотно керованого помпувального агрегату ВПТА 3.

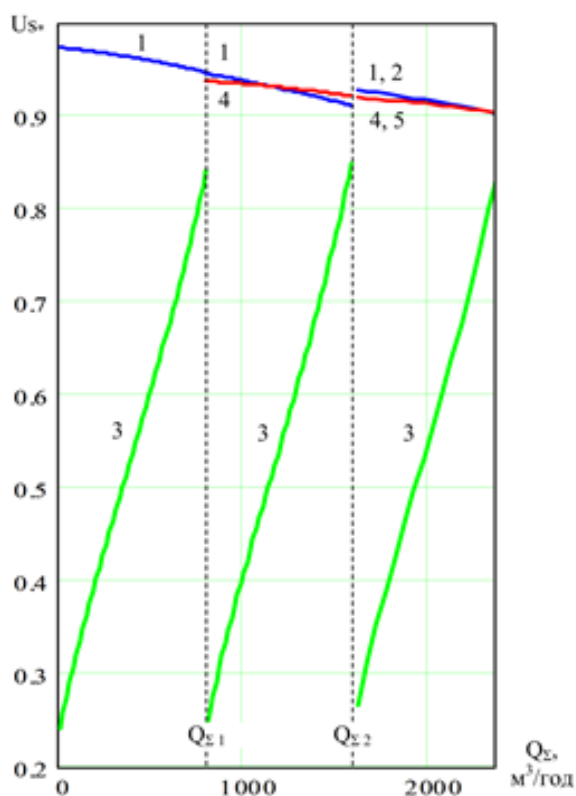


Рис. 9 Відносні напруги обмоток статорів АД

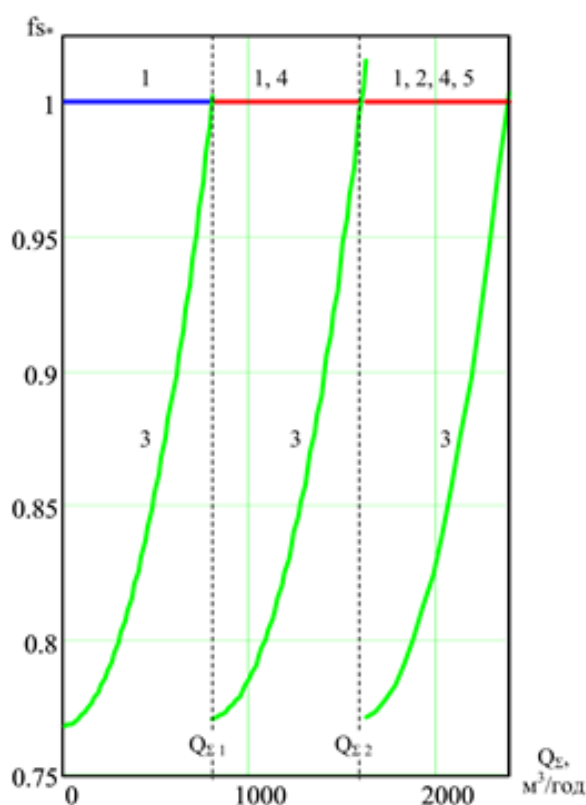


Рис. 10 Відносні частоти напруг обмоток статорів АД

## ВИСНОВКИ

У дисертації вирішено актуальне науково-прикладне завдання удосконалення методів аналізу режимів роботи електротехнічних комплексів з керованими помповими станціями, що дозволило розробити дискретно-неперервну математичну модель синтезу сигналу автоматичного керування помповими агрегатами й комутаційними пристроями такого комплексу й отримати найкращі техніко-економічні показники в повному діапазоні зміни витрати робочої рідини за підтримання постійного тиску в магістралі.

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 "ЕПС-ПС" для вибору раціонального варіанту його виконання, так і для прогнозування й аналізу режимів роботи діючого ЕТК "ЕПС-ПС" під час його експлуатації, одержання алгоритму та схеми керування ЕТК "ЕПС-ПС" 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 "ЕПС-ПС" конкретної конфігурації та алгоритм його функціонування. Проведені модельні дослідження підтвердили комплексне покращення показників ЕТК "ЕПС-ПС" внаслідок реалізації розробленої моделі системи автоматичного керування раціональною схемою силових кіл живлення та компенсації реактивної потужності ЕТК "ЕПС-ПС".

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 натурного об'єкта.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. 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.
2. 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.
3. 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.
4. 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.
5. Гоголюк П. Ф. Математичне моделювання усталених режимів групи агрегатів – асинхронний двигун-відцентрова помпа з послідовним сполученням гідротрактів pomp / П. Ф. Гоголюк, В. Г. Лисяк, В. С. Костишин // Вісник Нац. ун-ту "Львівська Політехніка". – 2003. – № 485. – С. 30–44.
6. 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.
7. 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.
8. 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.
9. Лисяк В. Г. Математичне моделювання усталених режимів електропостачальної системи помпової станції / В. Г. Лисяк // Технічна електродинаміка. – К., 2008. – № 2. – С. 43–50.
10. 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.
11. 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).
12. 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. – DOI: 10.1109/PSCE.2004.1397473.

13. 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.

14. 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.

### АНОТАЦІЯ

Лисяк В.Г. Усталені режими електротехнічного комплексу "електропостачальна система – помпова станція". – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи. – Національний університет "Львівська політехніка" Міністерства освіти і науки України, Львів, 2016.

Дисертація присвячена удосконаленню методів аналізу режимів роботи електротехнічних комплексів з керованими помповими станціями, що дозволило сформулювати математичну модель узагальненого комплексу шляхом композиції моделей нерозривно пов'язаних між собою його підсистем різної фізичної природи.

Формалізовано одержання математичної моделі комплексу конкретної конфігурації на підставі математичної моделі узагальненого комплексу. Розроблено дискретно-неперервну математичну модель синтезу сигналу автоматичного керування двигунами 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.

**Ключові слова:** електротехнічний комплекс, електропостачальна система, помпова станція, усталений режим, двигун, агрегат, керування, відцентрова помпа, гідравлічна мережа, математична модель.

### АННОТАЦИЯ

Лысяк В.Г. Установившиеся режимы электротехнического комплекса "система электроснабжения – насосная станция". – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03 – электротехнические комплексы и системы. – Национальный университет "Львовская политехника" Министерства образования и науки Украины, Львов, 2016.

Диссертация посвящена совершенствованию методов анализа режимов работы электротехнических комплексов с управляемыми насосными станциями, что позволило сформировать математическую модель обобщенного комплекса путем композиции моделей неразрывно связанных между собой его подсистем различной физической природы.

Формализовано получение математической модели комплекса конкретной

конфигурации на основании математической модели обобщенного комплекса. Проверено адекватность созданной модели. Разработана дискретно-непрерывная математическая модель синтеза сигнала автоматического управления двигателями и коммутационными устройствами электротехнического комплекса "система электроснабжения – насосная станция", что позволило получить наилучшие технико-экономические показатели комплекса в полном диапазоне изменения расхода рабочей жидкости за поддержание постоянного давления в магистрали.

**Ключевые слова:** электротехнический комплекс, системы электроснабжения, насосная станция, установившийся режим, двигатель, агрегат, управления, центробежный насос, гидравлическая сеть, математическая модель.

### ABSTRACT

Lysiak V.G. Steady-state regimes of the electro-technical complex "electric power distribution system - pump station". – On the rights of manuscript.

The thesis for the degree of candidate of technical sciences, specialty 05.09.03 - electrotechnical complexes and systems. – Lviv Polytechnic National University Ministry of Education and Science of Ukraine, Lviv, 2016.

Dissertation is devoted to the improvement of methods of analysis modes of electrical systems with controllable pumping stations, allowing to form a complex mathematical model generalized by the composition of models inextricably linked its subsystems with different physical nature to study the steady state of such facilities in order to improve the energy efficiency of their operation.

Analysis coordinate operational modes of pumping stations with centrifugal pumping turbine units carried out by a number of researchers has shown that the cost of pumps vary slowly in time (except for the start, stop, emergency equipment and processes). This allows you to reasonably allocate such continuous operation and consider them as quasi-stationary, the analysis of which requires the establishment of appropriate means.

Overview of scientific publications devoted to electrical complex pumping and compressor stations, both in general and their components has shown the importance of developing effective means of analyzing their regimes.

The thesis is a mathematical model of steady-state regimes of the generalized complex electrical "power system – pumping station" centrifugal pump, which takes into account the mutual influence of electrical and hydraulic parameters and coordinates modes with arbitrary granularity.

The method of calculating the distribution of the working fluid between the hydraulic connection units with mismatched nominal hydraulic parameters, which allows you to receive a management function.

Formalized mathematical model to obtain a set of specific configuration on the basis of a mathematical model of the generalized complex. It reviews the adequacy of the developed model. An example of its application to calculate the coordinates of the established modes set specific configuration, allowing to carry out a comparative analysis of the various embodiments thereof, various methods and control algorithms, and combinations thereof.

Developed discrete-continuous mathematical model synthesis signal automatic motor control and switching devices electrical complex "electricity supply system - pumping

station", which allowed for the best technical and economic parameters set in the full range of costs changes the working fluid for maintaining constant pressure in the line.

The resulting mathematical model can be used for the development of specialized software in automated design systems. Generalization and formalization achieved in the process of forming a mathematical model indicate the advisability of further studies in order to adapt it to the compressor stations as well – in order to create the mathematical modeling of transients.

**Keywords:** Electrotechnical complex power systems, pumping station, steady state, motor assembly, control, centrifugal pumps, hydraulic network, mathematical model.

