

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»  
Факультет автоматизації виробництва, інформаційних та управлінських  
технологій  
Кафедра автоматизації, електро- та робототехнічних систем

«Допущено до захисту»  
Гарант ОПП

Артем РУХЛОВ

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня бакалавра

за підсумками виконання  
освітньо-професійної програми  
«Інжиніринг електропостачання та електромеханічних систем у металургії  
та гірництві»

за спеціальністю 141 Електроенергетика, електротехніка та  
електромеханіка (G3 Електрична інженерія)  
на тему «Розробка заходів щодо підвищення ефективності  
функціонування пульпонасосної станції»

Керівник роботи

Артем РУХЛОВ

*Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень та напрацювань.  
Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на  
відповідне джерело. Електронний та паперовий варіанти роботи є ідентичними.*

Здобувач

Віктор ЛУКАШ

|                                |  |  |  |
|--------------------------------|--|--|--|
| Підсумкова оцінка за атестацію |  |  |  |
|--------------------------------|--|--|--|

Голова ЕК

Денис КОНОНЮК

Запоріжжя 2026



|                      |  |
|----------------------|--|
|                      | ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»                                 |
| Факультет            | автоматизації виробництва, інформаційних та управлінських технологій               |
| Кафедра              | автоматизації, електро- та робототехнічних систем                                  |
| Ступінь вищої освіти | бакалавр   |
| Спеціальність        | 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка (G3 Електрична інженерія) |
| ОПП                  | Інжиніринг електропостачання та електромеханічних систем у металургії та гірництві |

ЗАТВЕРДЖУЮ

Гарант ОПП

Артем РУХЛОВ

24.02.2026 р.

## ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРА

Лукаша Віктора Олеговича

(прізвище, ім'я, по батькові здобувача)

1. Тема роботи Розробка заходів щодо підвищення ефективності функціонування пульпонасосної станції

керівник роботи Рухлов Артем Володимирович, доцент, кандидат технічних наук

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

затверджені наказом Університету від 23.02.2026 р. №41/23.02.2026

2. Термін подання роботи 12.06.2026 р.

3. Вихідні дані до роботи Навчальна література, державні стандарти з енергоефективності, методична література зі спеціальних дисциплін та дипломування, науково-дослідницькі роботи, літературні джерела, технологічні інструкції, матеріали ПівнГЗК, результати власних експериментів та досліджень тощо

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань) Анотація. Зміст. Вступ. 1. Аналіз предметної області (літературний огляд, технологічний процес, недоліки існуючих систем, сучасні тенденції, постановка задач з підвищення енергоефективності роботи пульпонасосної станції). 2. Спеціальний розділ (2.1. Аналіз існуючого режиму електроспоживання землесосів. 2.2. Обґрунтування типу, параметрів та режиму роботи високовольтного перетворювача частоти. 2.3. Дослідження режимних параметрів роботи землесосів при застосуванні високовольтного перетворювача частоти). 3. Економічне обґрунтування запропонованих заходів. 4. Безпека праці у предметній області. Висновки. Перелік використаних джерел.

5. Перелік графічного (демонстраційного) матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): Структурна схема системи регульованого електроприводу землесосів. Однолінійна схема електропостачання землесосів. Функціональна схема високовольтного перетворювача частоти. Результати розрахунків режимних енергетичних параметрів роботи пульпонасосної станції.

6. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи, що стосуються їх.

| Розділ  | Прізвище, ініціали та посада консультанта |
|---|---|
| Аналіз предметної області                       | доц. Рухлов А.В.                          |
| Спеціальний розділ                              | доц. Рухлов А.В.                          |
| Економічне обґрунтування запропонованих заходів | доц. Рухлов А.В.                          |
| Безпека праці у предметній області              | доц. Рухлов А.В.                          |

7. Дата видачі завдання 24.02.2026

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| № з/п | Назва етапів роботи   | Термін виконання етапів роботи |
|-------|---|--------------------------------|
| 1     | Розділ 1. Аналіз предметної області                                   | 01.04.2026                     |
| 2     | Розділ 2. Спеціальний розділ  | 01.05.2026                     |
| 3     | Розділ 3. Економічне обґрунтування запропонованих заходів             | 08.05.2026                     |
| 4     | Розділ 4. Безпека праці у предметній області                          | 18.05.2026                     |
| 5     | Висновки, перелік посилань, вступ, зміст, реферат                     | 01.06.2026                     |
| 6     | Подання завершеної роботи. Перевірка на академічний плагіат           | 12.06.2026                     |
| 7     | Остаточне оформлення роботи та графічного (презентаційного) матеріалу | 17.06.2026                     |
| 8     | Рецензування завершеної роботи. Захист                                | 22.06.2026                     |

Здобувач

Віктор ЛУКАШ

Керівник роботи

Артем РУХЛОВ

## АНОТАЦІЯ

*Лукаш Віктор Олегович.* Розробка заходів щодо підвищення ефективності функціонування пульпонасосної станції . 63 сторінок машинописного тексту, 18 рисунків, 7 таблиць, 33 джерело. - Кваліфікаційна праця на правах рукопису.

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня бакалавра за спеціальністю 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка (G3 Електрична інженерія). ОПП «Інжиніринг електропостачання та електромеханічних систем у металургії та гірництві». ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», Запоріжжя, 2026.

Об'єкт дослідження: пульпонасосна станція ПНС-1 з гідротранспортування залізорудної пульпи.

Предмет дослідження: режими роботи електроприводу землесосів та системи автоматизації пульпонасосної станції.

Мета роботи: розробка заходів щодо підвищення енергоефективності функціонування пульпонасосної станції шляхом впровадження високовольтного частотно-регульованого приводу та модернізації системи автоматизації.

У першому проведено аналіз технологічного процесу гідротранспортування пульпи, розглянуто сучасні наукові дослідження у галузі, визначено недоліки існуючих систем регулювання продуктивності насосних агрегатів.

У другому розділі виконано аналіз існуючого режиму електроспоживання землесосів, обґрунтовано вибір типу та параметрів високовольтного перетворювача частоти ATV6000, проведено дослідження режимних параметрів роботи насосів при застосуванні частотного регулювання, визначено робочі точки на суміщених характеристиках насоса та мережі.

У третьому виконано економічне обґрунтування запропонованих заходів: розраховано капітальні інвестиції (17,9 млн грн), річну економію експлуатаційних витрат (88,24 млн грн), визначено дисконтований строк окупності проекту (0,28 року).

У четвертому розглянуто питання безпеки праці при експлуатації електроустановок пульпонасосної станції відповідно до вимог НПАОП.

ПУЛЬПОНАСОСНА СТАНЦІЯ, ЗЕМЛЕСОС, ЧАСТОТНО-РЕГУЛЬОВАНИЙ ПРИВОД, ВИСОКОВОЛЬТНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ ЧАСТОТИ, ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ, ГІДРОТРАНСПОРТ, АВТОМАТИЗАЦІЯ, ЕКОНОМІЧНЕ ОБґРУНТУВАННЯ.

## ЗМІСТ

|  |    |
|--|----|
| ВСТУП .....  | 6  |
| 1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ .....  | 8  |
| 1.1 Технологічний процес гідротранспортування пульпи та стан наукових досліджень у галузі .....                    | 8  |
| 1.2. Характеристика основного електротехнічного та електромеханічного обладнання об'єкта .....                     | 11 |
| 1.3 Схема електропостачання пульпонасосної станції ПНС-1 .....   | 13 |
| 1.4 Аналіз недоліків існуючих систем та сучасні тенденції підвищення енергоефективності ПНС .....                  | 16 |
| 1.5 Обґрунтування напрямів модернізації та постановка задач дослідження .....                                      | 21 |
| 2 СПЕЦІАЛЬНИЙ РОЗДІЛ .....   | 23 |
| 2.1 Аналіз існуючого режиму електроспоживання землесосів .....   | 23 |
| 2.2 Обґрунтування типу, параметрів та режиму роботи високовольтного перетворювача частоти .....                    | 28 |
| 2.3 Дослідження режимних параметрів роботи землесосів при застосуванні високовольтного перетворювача частоти ..... | 36 |
| 3. ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ЗАПРОПОНОВАНИХ ЗАХОДІВ .....   | 44 |
| 3.1 Визначення капітальних витрат на модернізацію .....  | 44 |
| 3.2 Розрахунок річної економії експлуатаційних витрат .....  | 45 |
| 3.3 Визначення показників економічної ефективності проекту.....  | 48 |
| 4 БЕЗПЕКА ПРАЦІ У ПРЕДМЕТНІЙ ОБЛАСТІ .....   | 53 |
| 4.1 Аналіз небезпечних і шкідливих виробничих факторів .....   | 53 |
| 4.2 Заходи безпеки в існуючій системі та їх недоліки.....  | 54 |
| 4.3. Підвищення рівня безпеки праці завдяки впровадженню частотно-регульованого електроприводу .....               | 55 |
| 4.4. Організаційно-технічні заходи безпеки .....   | 55 |
| 4.5 Особливості забезпечення електробезпеки при експлуатації високовольтного обладнання .....                      | 56 |
| 4.6 Заходи пожежної безпеки в приміщенні ПНС та модульному боксі ПЧ .....  | 57 |
| 4.7 Безпека при обслуговуванні пульпопроводів та запірної арматури під тиском .....                                | 58 |
| ВИСНОВКИ .....   | 59 |
| ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....  | 61 |


## ВСТУП

Безперервність технологічного циклу гірничо-збагачувальних комбінатів, зокрема ПрАТ «ПІВНГЗК», жорстко лімітується надійністю та енергоефективністю систем гідротранспортування відходів збагачення. Ключовим елементом цієї інфраструктури є пульпонасосні станції (ПНС), які забезпечують перекачування високоабразивної гідросуміші (густиною до  $1,5 \text{ т/м}^3$ ) на відстані, що перевищують 5000 м. Експлуатація магістральних землесосів типу GIW 24\*26 LHD 49 з високовольтними асинхронними двигунами потужністю 3500 кВт (напругою 6 кВ) в умовах змінного гідравлічного опору мережі супроводжується низкою критичних інженерних проблем. Існуюча практика регулювання продуктивності шляхом дроселювання потоку клиновими засувками призводить до марної дисипації надлишкового напору (близько 25 м), зниження загального ККД насосної установки та інтенсивного гідроабразивного зносу проточної частини й запірної арматури. Крім того, прямі пуски високовольтних двигунів спричиняють кидки струму (5–7 Іном), глибокі просідання напруги в мережі 6 кВ та руйнівні гідравлічні удари, що прискорюють деградацію футерування трубопроводів. Усе це генерує значні фінансові збитки та каскадні простої збагачувального виробництва. Вирішення окресленої проблеми вимагає переходу до енергоефективних систем керування, що базуються на високовольтних перетворювачах частоти (ПЧ) з активними випрямлячами та функціями безударного синхронного перемикачання. Саме ці обставини обумовлюють високу науково-практичну актуальність даної кваліфікаційної роботи.

Мета роботи полягає у підвищенні енергоефективності та надійності функціонування пульпонасосної станції ПНС-1 шляхом обґрунтування вибору високовольтного частотно-регульованого електропривода та розробки оптимальних режимів роботи землесосів з його застосуванням, що забезпечить зниження питомих витрат електроенергії на транспортування  $1 \text{ м}^3$  пульпи.

Для досягнення поставленої мети сформульовано та вирішено такі завдання:

- провести аналіз предметної області, технологічного процесу гідротранспортування та виявити недоліки існуючих систем регулювання продуктивності землесосів;
- виконати кількісну оцінку фактичних енергетичних показників роботи землесосів за нерегульованого (дросельного) електроприводу;
- обґрунтувати тип, параметри та закони керування високовольтного перетворювача частоти (на прикладі ATV6000) з урахуванням технологічних обмежень за критичною швидкістю потоку пульпи;
- дослідити режимні параметри роботи насосних агрегатів при частотному регулюванні та визначити потенціал енергозбереження;



– виконати техніко-економічне обґрунтування запропонованих заходів з розрахунком капітальних інвестицій та дисконтованого строку окупності;

– сформулювати систему організаційно-технічних заходів з безпеки праці та електробезпеки при експлуатації модернізованого високовольтного обладнання.

Об'єкт дослідження – процес електропостачання та гідротранспортування високоабразивної пульпи на пульпонасосній станції ПНС-1 ЦТВШГ ПрАТ «ПІВНГЗК».

Предмет дослідження – енергетичні, гідравлічні та режимні параметри роботи землесосів GIW 24\*26 LHD 49 при впровадженні високовольтного частотно-регульованого електропривода.

Методи дослідження. у роботі застосовано методи математичного моделювання гідравлічних мереж (рівняння Дарсі-Вейсбаха, критерій Дюрана), закони подібності відцентрових машин, теорію електропривода та перетворювальної техніки, а також методи динамічного техніко-економічного аналізу інвестиційних проєктів (розрахунок NPV, DPP, PI). Статистична обробка експлуатаційних даних виконана з використанням апроксимації напірних характеристик насосів та мережі.

Елементи наукової та інженерної новизни одержаних результатів: – вперше для умов магістрального гідротранспорту ПІВНГЗК розроблено уточнену математичну модель сумісної роботи насоса та мережі, яка враховує технологічне обмеження за критичною швидкістю пульпи (для запобігання замулюванню трубопроводу діаметром 0,8 м) та фактичний ступінь гідроабразивного зносу проточної частини; – удосконалено схему інтеграції високовольтного ПЧ з 24-пульсним активним випрямлячем в існуючу релейну систему захисту та автоматики ПНС-1 (на базі терміналів ABB REF615/REM615), що забезпечує безударне синхронне перемикання двигунів між ПЧ та мережею 6 кВ через елегазові контактори без гідравлічних ударів; – встановлено закономірності зміни коефіцієнта потужності та реактивного навантаження мережі при переході від дросельного регулювання до частотного керування з активним фронт-ендом (AFE).

Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що розроблений комплекс інженерних рішень щодо модернізації електроприводу ПНС-1 готовий до безпосереднього впровадження в умовах Цеху технічної води та шламового господарства ПрАТ «ПІВНГЗК». Реалізація запропонованих заходів дозволяє повністю ліквідувати втрати на дроселюванні, знизити споживання активної потужності на 1122 кВт (33,9 %) на один агрегат, підвищити вхідний  $\cos\phi$  до 0,98 та отримати річний економічний ефект понад 88 млн грн. Методика розрахунку та вибрані технічні рішення можуть бути масштабовані на інші насосні станції гірничо-металургійного комплексу.

## 1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ

### 1.1 Технологічний процес гідротранспортування пульпи та стан наукових досліджень у галузі

Пульпонасосна станція (ПНС) є критичним елементом гідротранспортної системи гірничо-збагачувального комбінату. Вона забезпечує безперервне транспортування відходів збагачення від збагачувальної фабрики до хвостосховища, об'єднуючи технологічний переділ із системою складування. Зупинка ПНС через відмову насосного обладнання або забиття трубопроводу спричиняє аварійну зупинку всього збагачувального виробництва, тому підвищення надійності та зниження енергоспоживання ПНС є прямим резервом зменшення собівартості кінцевої продукції [1, 2].



Рисунок 1.1 – Пульпонасосна станція (приклад компонування насосних агрегатів)

Об'єктом транспортування є гідросуміш (пульпа) - суміш тонкоподрібнених частинок руди, концентрату або хвостів збагачення з водою. На відміну від насосних систем чистої води, гідротранспорт пульпи характеризується низкою специфічних параметрів, які безпосередньо визначають вибір і режими роботи насосного обладнання. Густина пульпи на хвостових операціях ГЗК Кривбасу може досягати 1,4-1,5 т/м<sup>3</sup>, крупність твердих частинок зазвичай не перевищує 1-3 мм, а наявність фракцій +0,1 мм надає потоку абразивного характеру [3, 4]. Масова частка твердого в пульпі, що транспортується на вітчизняних ГЗК при такій густині, становить, як правило, 35–45% [2]. Водневий показник рідкої фази

(рН від 7 до 12 для лужних схем збагачення) додатково формує корозійну складову зносу робочих органів насоса [3].

Типова технологічна схема дільниці гідротранспортування (рисунок 1.2) включає вузол приготування пульпи, зумпф для акумуляції гідросуміші, відцентрові ґрунтові насоси, оснащені високовольтними електродвигунами, та пульпопроводи. Основним робочим органом є типові моделі відцентрованих ґрунтових насосів (землесоси) типу 20Гр-8Т, 28Гр-8Т або Warman WBC (у закордонній практиці) з потужністю приводного двигуна від 1600 до 3200 кВт [4, 5].

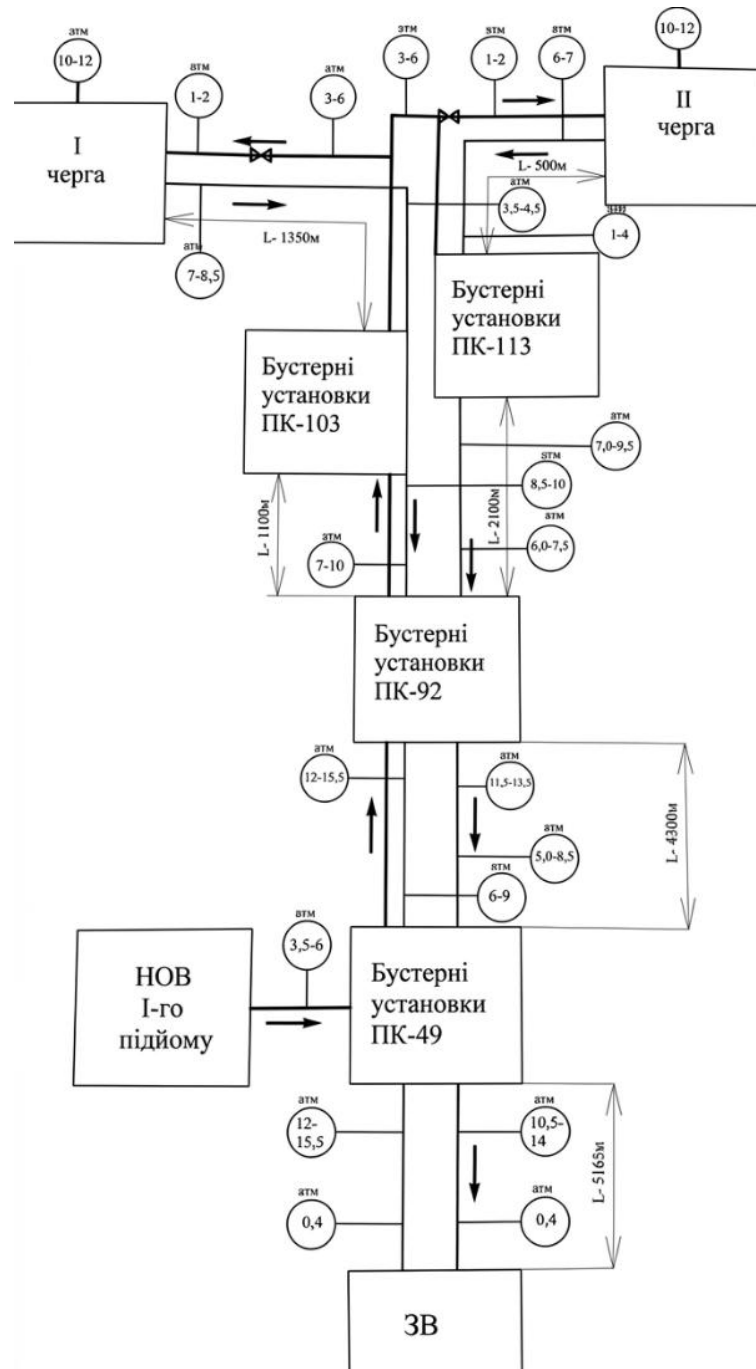



Рисунок 1.2 – Типова технологічна схема дільниці гідротранспортування хвостів



На ПНС-1 ЦТВШГ, згідно з даними практики, використовуються три насосні системи GIW 24\*26 LHD-49 із двигунами 3500 кВт, 6 кВ, 1491 об/хв. Особливістю експлуатації є необхідність транспортування пульпи на віддалені карти лівого берега хвостосховища, де довжина пульпопроводу перевищує 5000 м. Така відстань висуває підвищені вимоги до напірних характеристик насосів та стабільності режиму, особливо в умовах змінного гідравлічного опору мережі.

Ключовим гідравлічним параметром для безаварійної експлуатації системи є критична швидкість потоку - мінімальна швидкість руху гідросуміші, за якої тверді частинки перебувають у завислому стані та транспортуються без утворення осаду на дні трубопроводу [6]. Експлуатація насоса на швидкостях нижче критичної призводить до забиття трубопроводу, зростання його гідравлічного опору та аварійної зупинки ПНС [7]. Методики розрахунку критичної швидкості для пульп різної концентрації та вказують, що для ньютонівських гідросумішей низької концентрації критичну швидкість можна обчислювати за класичною формулою Юфіна-Лопатіна або її модифікаціями::


$$V_{кр} = \sqrt{gD} \sqrt[3]{C_v * \frac{\psi}{\sqrt[3]{gD}}}, \quad (1.1)$$

де  $C_v$  - об'ємна концентрація твердої фази в частках одиниці;  
 $\psi$  - параметр, що враховує гідравлічну крупність частинок;  
 $g$  - прискорення вільного падіння (9,81 м/с<sup>2</sup>);  
 $D$  - діаметр трубопроводу, м.

Дослідженнями в галузі гідротранспорту високоабразивних пульп займалися представники різних наукових шкіл, чиї результати систематизовано в роботі Медведєва О.О. [3]. Для розрахунку параметрів гідротранспорту застосовують методики, які враховують гранулометричний склад, густину твердих частинок, концентрацію пульпи та кут нахилу трубопроводу [3].

У роботі Сокура М.І. та ін. [2] проаналізовано фактичні енерговитрати у хвостових господарствах ГЗК Кривбасу. Встановлено, що транспортування 1 м<sup>3</sup> пульпи споживає від 0,2 до 0,52 кВт\*год електроенергії. Основним споживачем виступають землесоси 28Гр-8Т потужністю 3200 кВт, які часто працюють із недовантаженням через невідповідність характеристик мережі фактичному режиму. За результатами досліджень рекомендовано підбирати діаметри робочих коліс та раціональні діаметри трубопроводів як один із методів регулювання режиму роботи землесосів.

У систематичному огляді Varghese A. та ін. [8] глибоко проаналізовано вплив реологічних властивостей пульпи (гранулометричного складу, густини, в'язкості) на енергетичні характеристики шламових насосів. Показано, що із зростанням в'язкості та концентрації твердого відбувається дератинг (зниження напору та ККД),



який може досягати 10-25%. Окремо наголошується на значному потенціалі економії енергії (до 30-40%) за рахунок впровадження частотно-регульованого приводу та систем моніторингу технічного стану проточної частини. Також запропоновано методологію оцінювання сталості насосного обладнання з використанням цифрових двійників.

Проекти модернізації ПНС на вітчизняних гірничо-збагачувальних комбінатах (ГЗК) дедалі частіше включають встановлення високовольтних частотних перетворювачів, зокрема ATV6000C445A6060DC5, як це виконано для ПНС-1 центрального тракту відходів шламового господарства. Такі рішення спрямовані на забезпечення плавного регулювання частоти обертання насосних агрегатів, що дає змогу уникати роботи в зонах низького ККД, властивих дросельному регулюванню.

Таким чином, на відміну від водяних насосів, регулювання режиму роботи пульпонасосів ускладнене необхідністю підтримання швидкості потоку вище критичної в умовах безперервного гідроабразивного зносу проточної частини. Тому просте зниження обертів двигуна вимагає точного математичного обґрунтування з урахуванням фактичних параметрів пульпи та ступеня зносу насоса. Особливо це актуально для магістральних землесосів, розрахованих на роботу з пульпопроводами змінної довжини (від кількох сотень метрів до >5 км), де неправильно вибраний режим може спричинити або забиття трубопроводу, або надмірне енергоспоживання.

## **1.2 Характеристика основного електротехнічного та електромеханічного обладнання об'єкта**

Пульпонасосна станція №1 (ПНС-1) цеху технічної води та шламового господарства (ЦТВШГ) ПрАТ «ПівнічГЗК» призначена для перекачування відходів збагачення у вигляді високоабразивної пульпи до хвостосховища. До складу основного обладнання станції входять відцентрові ґрунтові насоси, високовольтні приводні двигуни, силове комутаційне обладнання 6 кВ, мікропроцесорні пристрої захисту, а також запірно-регульовальна арматура. Нижче наведено систематизований опис основних елементів.

Типи насосів та їх конструктивні особливості. Згідно з матеріалами, отриманими під час практики, на ПНС-1 у трьох технологічних блоках встановлено шість землесосів (по два в блоці), з яких агрегати №2, №5 та №12 є об'єктом даного дослідження. Усі три насосні системи – типу GIW 24\*26 LHD-49 виробництва GIW Industries (США) – являють собою високонапірні відцентрові ґрунтові насоси, спеціально спроектовані для перекачування високоабразивних пульп на значні відстані.

Кожен насосний агрегат оснащений високовольтним асинхронним двигуном потужністю 3500 кВт напругою 6 кВ. Для агрегатів №2 та №5 застосовано двигуни MGP-560, для агрегату №12 – АМВ-560 (обидва типи мають ідентичні електричні параметри). Номінальна частота обертання

двигунів становить 1491 об/хв, що відповідає чотириполюсній конструкції (синхронна частота 1500 об/хв).

На відміну від тихохідних землесосів типу 28Гр-8Т (595 об/хв), високообертові насоси GIW забезпечують більший напір при менших габаритах робочого колеса, що є критичним для транспортування пульпи на відстань понад 5000 м, як це передбачено технічними параметрами комплексу.


Основні технічні характеристики насосних агрегатів зведено в таблицю 1.1.

Таблиця 1.1 – Основні технічні характеристики землесосів ПНС-1

| <b>Параметр</b>                           | <b>Значення</b>                                      |
|---|--|
| Тип насосної системи                      | GIW 24*26 LHD-49                                     |
| Тип насоса                                | Відцентровий ґрунтовий, консольний, одноступінчастий |
| Приводний двигун                          | MGP-560 / AMB-560                                    |
| Номінальна потужність двигуна, кВт        | 3500   |
| Номінальна напруга, В                     | 6000   |
| Номінальна частота обертання, об/хв       | 1491   |
| Номінальний струм двигуна, А              | 391  |
| Коефіцієнт потужності $\cos\phi$ двигуна  | 0,89   |
| Момент інерції двигуна, кг м <sup>2</sup> | 116  |
| Номінальний момент обертання двигуна, Н м | 22 416   |
| Умови пуску                               | Навантажений (насос під заливом)                     |
| Вид існуючого пуску (після модернізації)  | Від частотного перетворювача                         |

Конструктивно насоси GIW 24\*26 LHD-49 належать до класу шламових насосів з двостінним корпусом: зовнішній корпус виконується з конструкційної сталі або чавуну, внутрішній змінний корпус (броня) та робоче колесо – із високохромистих чавунів із твердістю до 650 НВ, що забезпечує роботу на пульпах із водневим показником рН від 7 до 12 [13,14]. Ущільнення вала – торцеве або сальникове з підведенням замивної води під тиском, що перевищує тиск у корпусі насоса. Робоче колесо – закритого типу, із можливістю регулювання зазору між колесом і бронею без розбирання насоса, що дозволяє підтримувати паспортний ККД у міру гідроабразивного зносу проточної частини [13].

Для розрахункових цілей у даній роботі, з огляду на відсутність у відкритому доступі повних Q-H характеристик насосів GIW, використано



апроксимовану математичну модель. Оскільки відцентрові ґрунтові насоси мають подібну форму напірних характеристик, за аналог було прийнято криві типу 28Гр-8Т, а абсолютні коефіцієнти математичного рівняння були адаптовані (ідентифіковані) виходячи з паспортних робочих точок насоса GIW 24\*26 LHD-49 (номінальна подача, напір та ККД). Такий підхід є виправданим методично, оскільки він дозволяє адекватно описати поведінку насоса в зоні робочих подач. Конкретні чисельні значення подачі та напору, отримані в розділі 2, можуть мати певну похибку відносно фактичних для GIW 24\*26 LHD-49, проте відносний відсоток економії електроенергії при переході до частотного регулювання залишається інваріантним, що є ключовим показником даного дослідження.

Приводні двигуни. Насосні агрегати №2, №5, №12 ПНС-1 оснащені високовольтними асинхронними електродвигунами з короткозамкненим ротором потужністю 3500 кВт, напругою 6 кВ, розрахованими на тривалий режим роботи S1. Номінальна частота обертання становить 1491 об/хв, номінальний струм – 391 А, коефіцієнт потужності  $\cos\phi = 0,89$ . Момент інерції двигуна – 116 кг·м<sup>2</sup>, що є значною величиною і обумовлює тривалий час вибігу після відключення.

Прямий пуск такого двигуна спричиняє кидок пускового струму, що в 5–7 разів перевищує номінальний, і супроводжується значним просіданням напруги в мережі 6 кВ та гідравлічним ударом у напірному пульпопроводі. Для усунення виявлених недоліків пропонується модернізація системи електроприводу землесосів ПНС-1 шляхом встановлення високовольтного перетворювача частоти (ПЧ). Вибір конкретного типу ПЧ та обґрунтування його параметрів буде виконано у спеціальному розділі роботи.

### **1.3 Схема електропостачання пульпонасосної станції ПНС-1**

Живлення електроприймачів пульпонасосної станції ПНС-1 здійснюється від розподільного пристрою напругою 6 кВ. Розподільний пристрій 6 кВ ПНС-1 виконаний за схемою з двома секціями шин, які живляться від цехових трансформаторних підстанцій ПС-28, ПС-38 та ПС-39. Комутація приєднань здійснюється вакуумними вимикачами типу ВБ-4-П-630 з номінальним струмом 630 А. Захист і керування приєднаннями реалізовано на мікропроцесорних терміналах REM615 (для захисту двигунів) і REF615 (для захисту фідерів) виробництва АВВ.

Однолінійна схема електропостачання 6 кВ ПНС-1 наведена на рисунку 1.3.

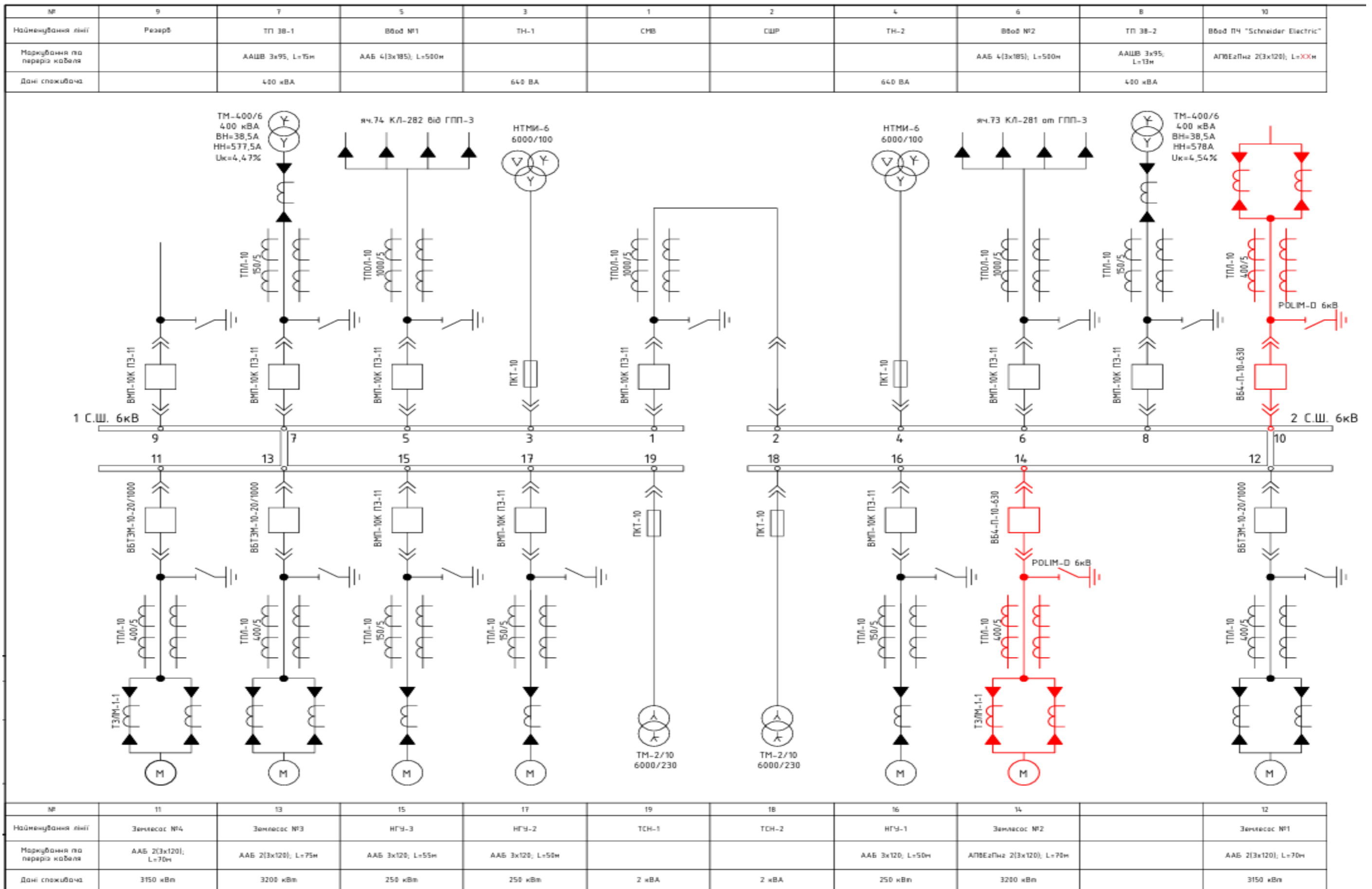



Рисунок 1.3 – Однолінійна схема електропостачання 6 кВ ПНС-1



В існуючій схемі електропостачання пульпонасосної станції ПНС-1 кожен насосний агрегат приєднано безпосередньо до розподільного пристрою напругою 6 кВ, який виконано за схемою з однією секційованою системою шин. Живлення приєднань здійснюється від цехових підстанцій ПС-28, ПС-38 та ПС-39 через індивідуальні комутаційні комірки, укомплектовані високовольтними вакуумними вимикачами типу ВБ-4П на номінальний струм 630 А. Захист та керування фідерами реалізовано за допомогою мікропроцесорних терміналів виробництва АВВ: REM615 (захист електродвигунів від перевантажень, міжфазних та однофазних замикань) та REF615 (захист кабельних ліній 6 кВ). Пуск асинхронних двигунів потужністю 3,5 МВт здійснюється безпосередньо від мережі (прямий пуск), що супроводжується значними кидками пускового струму, просіданнями напруги на шинах та динамічними навантаженнями на мережу підприємства. Регулювання технологічної продуктивності землесосів у даній схемі реалізується виключно гідравлічним методом – дроселюванням потоку за допомогою клинових засувок із електроприводом типу ЗКЛП/УЕПА. Такий спосіб регулювання призводить до штучного підвищення гідравлічного опору, надлишкових втрат напору на арматурі та суттєвого зниження загального енергетичного ККД насосної установки. Резервування живлення та технологічне дублювання агрегатів здійснюється між собою в межах кожного з трьох технологічних блоків ПНС, що не забезпечує повної незалежності при виведенні в ремонт або аварійному відключенні окремого приєднання. Загалом, існуюча архітектура електропостачання та керування є типовою для об'єктів проєктного періоду, проте в сучасних умовах експлуатації виявляє суттєві обмеження щодо гнучкості режимів, енергоефективності, якості електроенергії та надійності технологічного процесу гідротранспортування пульпи.

Живлення власних потреб 0,4 кВ (освітлення, контролери, оперативні ланцюги, пожежна сигналізація) організовано через шафу автоматичного введення резерву (АВР) з двома незалежними вводами та джерелом безперебійного живлення (ДБЖ) потужністю до 2 кВА .

Запірна арматура. У напірних лініях пульпопроводів ПНС-1 встановлено клинові засувки з електроприводом типу ЗКЛП або УЕПА. Ці засувки використовуються для перекриття потоку та, в існуючій схемі, для технологічного регулювання подачі методом дроселювання. Дроселювання є енергетично неефективним, оскільки надлишковий напір насоса втрачається на місцевому опорі, що призводить до зниження загального ККД насосної установки на 10–15% при прикритті засувки на 30% [4, 11].

## 1.4 Аналіз недоліків існуючих систем та сучасні тенденції підвищення енергоефективності ПНС

Пульпонасосні станції є одними з найбільших споживачів електроенергії на збагачувальних фабриках. Згідно з систематичним оглядом Varghese et al., насосне обладнання споживає від 18 до 28% всієї електроенергії технологічного циклу збагачення та складування хвостів. [8]. Нижче наведено критичний аналіз типових недоліків традиційних систем гідротранспорту та окреслено головні світові тенденції їх усунення.

### 1.4.1 Проблематика експлуатації насосних агрегатів

Робота на неоптимальних режимах. Аналіз понад 43 тис. випадків підбору насосів, виконаний у роботі [8], свідчить, що лише 17% агрегатів реально функціонують у рекомендованому діапазоні 80-100% подачі точки найвищого ККД ( $Q_{BER}$ ). Середньостатистичний насос працює при 72%  $Q_{BER}$ , що спричинено як навмисним завищенням типорозміру на стадії проектування, так і невідповідністю фактичних параметрів зовнішньої мережі розрахунковим. У хвостових господарствах ГЗК ця проблема поглиблюється, оскільки землесоси обирають, виходячи з роботи на максимальну висоту та довжину транспортування (кінцевий етап заповнення хвостосховища). На ПНС-1, відповідно до технічного завдання, насосні системи GIW 24\*26 LHD-49 повинні забезпечувати намив карт, віддалених на понад 5000 м. Однак на ранніх стадіях експлуатації пульпопровід значно коротший, і гідравлічний опір мережі суттєво нижчий за проєктний. Через це насоси тривалий час працюють із недовантаженням, що зміщує робочу точку вліво від зони оптимального ККД ( $BER$ ). Це призводить до зниження ККД на 10-15% та падіння коефіцієнта потужності  $\cos \phi$  до 0,8-0,85 [2].

Гідроабразивне зношування. Інтенсивний знос проточної частини - друга фундаментальна причина зниження ефективності. Через абразивну дію пульпи збільшуються зазори між робочим колесом і бронею, втрачається геометрія лопатей, що спричиняє падіння напору та ККД. Як приклад, у роботі наведено насос НМ250 на живленні гідроциклону: за 5 років експлуатації його споживана потужність зросла на 85% при збільшенні витрати лише на 42% та густини пульпи на 17%. Цей приріст зумовлений суттєвим зміщенням робочої точки внаслідок зміни гідравлічних характеристик насоса та мережі під впливом зносу проточної частини. Типовий міжремонтний цикл для робочих коліс із чавуну ИЧХ28Н2 на абразивних пульпах становить 3-6 місяців [11]. Графічне відображення впливу зносу на робочі характеристики насоса наведено на рисунку 1.4.

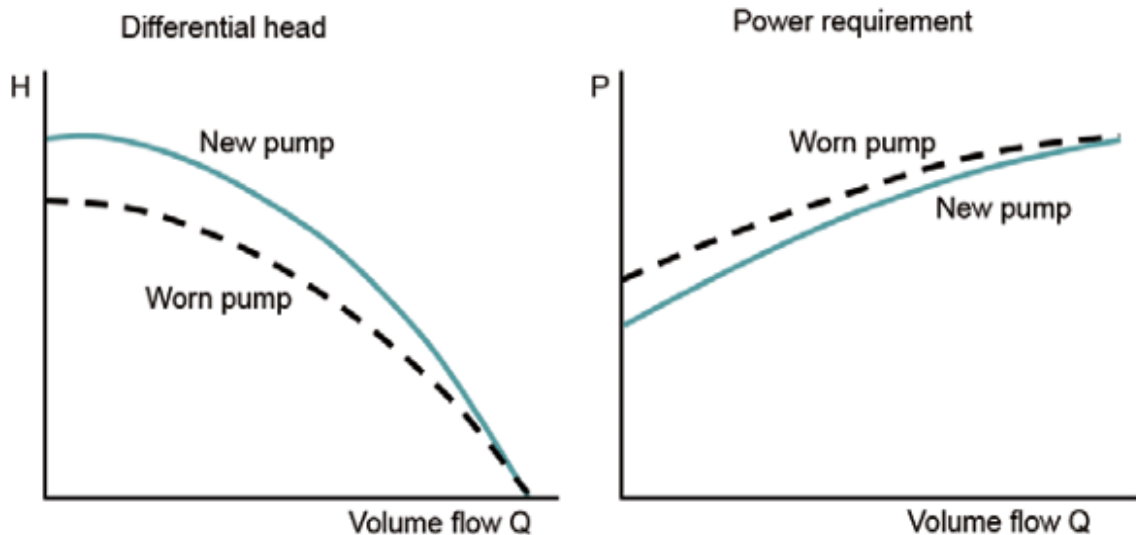



Рисунок 1.4 – Втрата продуктивності внаслідок зносу

Пускові струми та низький  $\cos\phi$ . Прямий пуск двигунів потужністю 3,5 МВт спричиняє кидки струму, що в 5-7 разів перевищують номінальні значення. Це призводить до просідань напруги в мережі 6 кВ, гідравлічних ударів у пульпопроводі та прискореного зносу труб і арматури. До того ж тривала робота недовантажених двигунів спричиняє зниження коефіцієнта потужності, що додатково збільшує витрати на реактивну енергію [2].

#### 1.4.2 Сучасні тенденції підвищення енергоефективності

Впровадження частотно-регульованого електропривода (ЧРП). Застосування перетворювачів частоти дає змогу плавно регулювати швидкість обертання насоса відповідно до технологічної потреби, забезпечуючи роботу в зоні ВЕР і виключаючи втрати на дроселювання. Теоретичним підґрунтям є закони подібності: потужність пропорційна кубу частоти обертання ( $P \sim n^3$ ), тому зниження обертів лише на 10% дає до 27% економії електроенергії. За оцінками [8], використання ЧРП дозволяє досягти загальної економії до 30-40%. Саме такий підхід реалізовано на ПНС-1 ЦТВШГ, де змонтовано високовольтний перетворювач частоти ATV6000C445A6060DC5 виробництва Schneider Electric, що забезпечує плавний частотний пуск і регулювання швидкості землесосів №2, 5, 12. Це вирішує проблему пускових струмів, стабілізує напругу в мережі та дозволяє підтримувати швидкість потоку вище критичної без надлишкового енергоспоживання.

Використання високоефективних двигунів. Подальше зниження втрат можливе шляхом заміни двигунів застарілих серій на моделі класів IE3 (Premium Efficiency) або IE4 (Super Premium Efficiency). Такі двигуни мають ККД на 3-5% вищий за двигуни класу IE1, а також підвищений  $\cos\phi$  (до 0,88-0,92) завдяки оптимізованій конструкції ротора та збільшеному



об'єму міді в статорі [12]. У сукупності з ЧРП це забезпечує суттєве зниження як активного, так і реактивного енергоспоживання.

Підвищення зносостійкості матеріалів. Для зменшення темпів падіння ККД внаслідок зносу застосовують робочі колеса із високохромистих чавунів типу Hyperchrome® A61 (твердість 650 HB), а також футерування корпусів зносостійкими еластомерами — натуральним каучуком або поліуретаном [14]. Вибір матеріалу залежить від розміру та абразивності частинок: для дрібнодисперсних пульп ( $d_{50} < 0,15$  мм) перевагу віддають поліуретану, для більш крупних фракцій - високохромистим сплавам. Такий підхід дозволяє подовжити міжремонтний інтервал та зберегти експлуатаційні характеристики насоса на більш тривалий термін.

Цифровізація та моніторинг стану. Сучасні системи діагностики, такі як Metso Condition Monitoring Service, дають змогу в реальному часі контролювати вібрацію, температуру підшипників, обмоток двигуна, мастила редуктора та стан робочого колеса [13]. На ПНС-1 впроваджено розподілену автоматизовану систему керування на базі контролерів Schneider Electric M241. Пульт диспетчера оснащено контролером TM241CE24T, а в шафі управління встановлено два контролери TM241CE40R; зв'язок між ними – по Ethernet. Датчики вібрації Metrix ST6917, температури обмоток та підшипників електродвигунів (RTD PT100), температури підшипників насосів та мастила редукторів підключаються до модулів віддаленого вводу/виводу OTB1S0M9LP, розташованих безпосередньо біля насосних агрегатів у шафах ЗС№2, 5, 12, і далі через мережу Modbus RTU передаються до контролерів. Згідно з проектом, у складі системи передбачено також багатоканальний реєстратор PMT 59 L; програмне забезпечення операторських панелей налаштовано на ідентифікацію та архівування подій (вихід за попереджувальні/аварійні межі, обриви ліній, стан комутаційної апаратури). Дані зберігаються у форматі CSV із глибиною архіву 20000 записів на кожен аналоговий параметр. Це дозволяє не лише оперативно реагувати на відхилення, а й формувати статистику для прогнозування залишкового ресурсу вузлів. Така інтеграція даних у SCADA-систему.

Блок-схема з'єднань між пристроями автоматизації ПНС-1 зображена на рисунку 1.5.

Фрагмент схеми зовнішніх підключень системи моніторингу вібрації та температури насосних агрегатів ПНС-1 показано на рисунку 1.6.

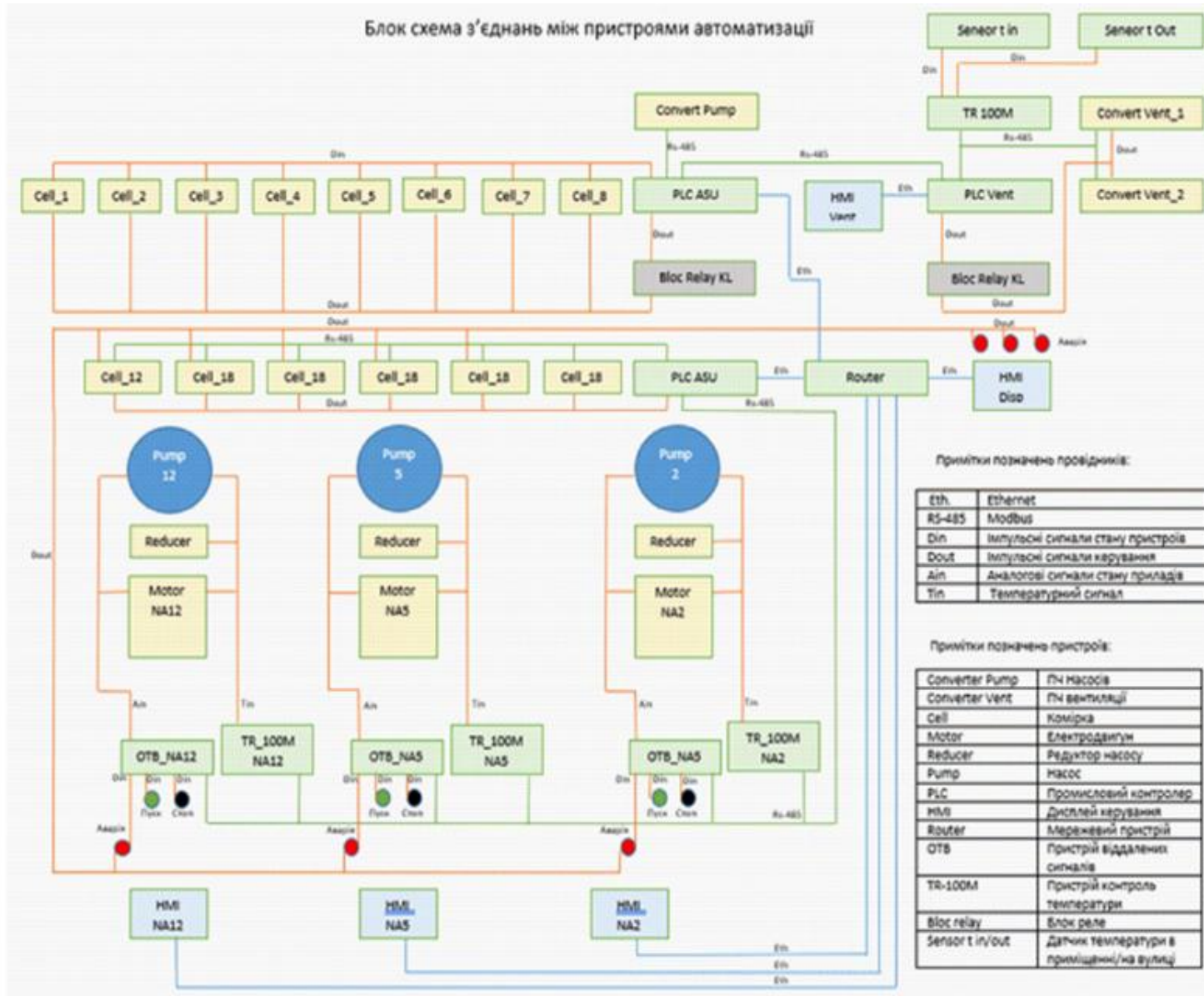



Рисунок 1.5 – Блок-схема з'єднань між пристроями автоматизації ПНС-1





Таким чином, комплексне впровадження частотно-регульованого приводу, енергоефективних двигунів, зносостійких матеріалів і цифрових систем моніторингу дозволяє усунути основні недоліки традиційних ПНС та досягти суттєвого зниження експлуатаційних витрат.

## **1.5 Обґрунтування напрямів модернізації та постановка задач дослідження**

### **1.5.1 Визначення «вузьких місць» ПНС-1**

На основі аналізу технологічного процесу, складу обладнання та існуючих недоліків систем гідротранспорту визначено ключові проблеми, що обмежують енергоефективність ПНС-1 ЦТВШГ.


Проблема 1: невідповідність технологічного режиму електроприводу. Як зазначено в підрозділі 1.1, безаварійна експлуатація пульпопроводу вимагає підтримання швидкості потоку вище критичної, що розраховується за формулою (1.1). Це накладає жорстке обмеження на мінімально допустиму продуктивність насоса. Водночас, існуюча схема електроживлення ПНС-1, що передбачала прямий пуск від мережі 6 кВ та регулювання подачі дроселюванням, не могла гнучко та економічно підтримувати такий режим, особливо з урахуванням перспективної необхідності транспортування пульпи на відстань понад 5000 м. Як наслідок, насосні агрегати значну частину часу працюють поза зоною ВЕР, а прямі пуски супроводжуються гідравлічними ударами, що прискорюють знос проточної частини.

Проблема 2: енергетична неефективність існуючої системи. Як показав аналіз у підрозділі 1.3, ПНС є одними з найбільших споживачів електроенергії на ГЗК, споживаючи 18-28% загальної потужності підприємства [8]. На діючій станції прямі пуски двигунів потужністю 3,5 МВт спричиняють значні кидки струму (5–7-кратні від номіналу, який становить 391 А) та просідання напруги (підрозділ 1.3.1). Великий момент інерції ротора ( $116 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ ) додатково затягує перехідний процес, збільшуючи термічне навантаження на обмотки. Дросельне регулювання призводить до втрат, що можуть сягати 10-15% споживаної потужності, а відсутність частотного регулювання унеможливорює реалізацію потенціалу економії 20-30%, який базується на законах подібності відцентрових машин ( $P \sim n^3$ ) [8, 2].

Висновок: головним «вузьким місцем» ПНС-1 є неоптимальний, енерговитратний режим роботи насосних агрегатів, який не дозволяє адаптуватися до реального гідравлічного опору мережі при безумовному дотриманні технологічних обмежень. Усунення цієї невідповідності можливе шляхом модернізації системи електропривода.

### **1.5.2 Обґрунтування та формулювання мети роботи**

Усунення виявленого «вузького місця» потребує переходу від нерегульованого, енергоємного процесу до гнучкої системи, здатної



підтримувати технологічно необхідні параметри (швидкість потоку вище критичної) з мінімальними витратами електроенергії. Найбільш ефективним шляхом реалізації такого переходу є застосування частотно-регульованого електропривода. Тому актуальним завданням є обґрунтування вибору типу та параметрів високовольтного перетворювача частоти, а також визначення раціональних режимів роботи землесосів з його застосуванням.

Мета роботи: підвищення енергоефективності функціонування пульпонасосної станції ПНС-1 шляхом обґрунтування вибору частотно-регульованого електропривода та розробки енергоефективних режимів роботи землесосів з його застосуванням, що забезпечить зниження питомих витрат електроенергії на транспортування 1 м<sup>3</sup> пульпи.

### **1.5.3 Постановка задач дослідження**

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні інженерно-технічні задачі:

1. Розробити уточнену математичну модель режимів роботи насосних агрегатів ПНС-1, яка враховує реальні Q-H характеристики насосів і мережі, а також технологічне обмеження за критичною швидкістю пульпи, що гарантує безпечне регулювання в усьому діапазоні навантажень.

2. Обґрунтувати раціональні параметри та режими роботи системи регульованого електропривода на базі встановленого високовольтного перетворювача частоти ATV6000 з урахуванням технічних рішень проєкту модернізації ПНС-1, зокрема схеми з трьома незалежними вводами живлення, елегазовими контакторами Rollarc R400D та функцією безударного синхронного перемикання двигунів на мережу.

3. Провести дослідження та порівняльний аналіз енергетичних параметрів роботи землесосів в існуючому (нерегульованому) та запропонованому (частотно-регульованому) режимах, кількісно оцінивши потенціал економії електроенергії.

4. Розрахувати очікуваний економічний ефект від впровадження запропонованих заходів, підтвердивши їх техніко-економічну доцільність.

## 2 СПЕЦІАЛЬНИЙ РОЗДІЛ

### 2.1 Аналіз існуючого режиму електроспоживання землесосів

Метою цього підрозділу є кількісна оцінка фактичних енергетичних показників роботи землесосів ПНС-1 за нерегульованого електроприводу та виявлення основних джерел непродуктивних втрат. Як репрезентативний об'єкт обрано насосний агрегат №2, оснащений високовольтним приводним асинхронним двигуном потужністю 3,5 МВт (6 кВ) з номінальною частотою обертання 1491 об/хв. Аналогічні агрегати №5 і №12 мають ідентичні характеристики, тому отримані результати можна поширити на всю станцію.

Фактичну схему живлення землесоса №2 у нерегульованому (байпасному) режимі наведено на рисунку 2.1, який відповідає принципівій схемі підстанції ПС-38 [10, 15]. Двигун потужністю 3,5 МВт під'єднано до комірки №14 через вакуумний вимикач ВБ-4-П-630. Захист і вимірювання реалізовано мікропроцесорним терміналом REM615, що забезпечує струмову відсічку, захист від перевантаження та захист від однофазних замикань на землю.

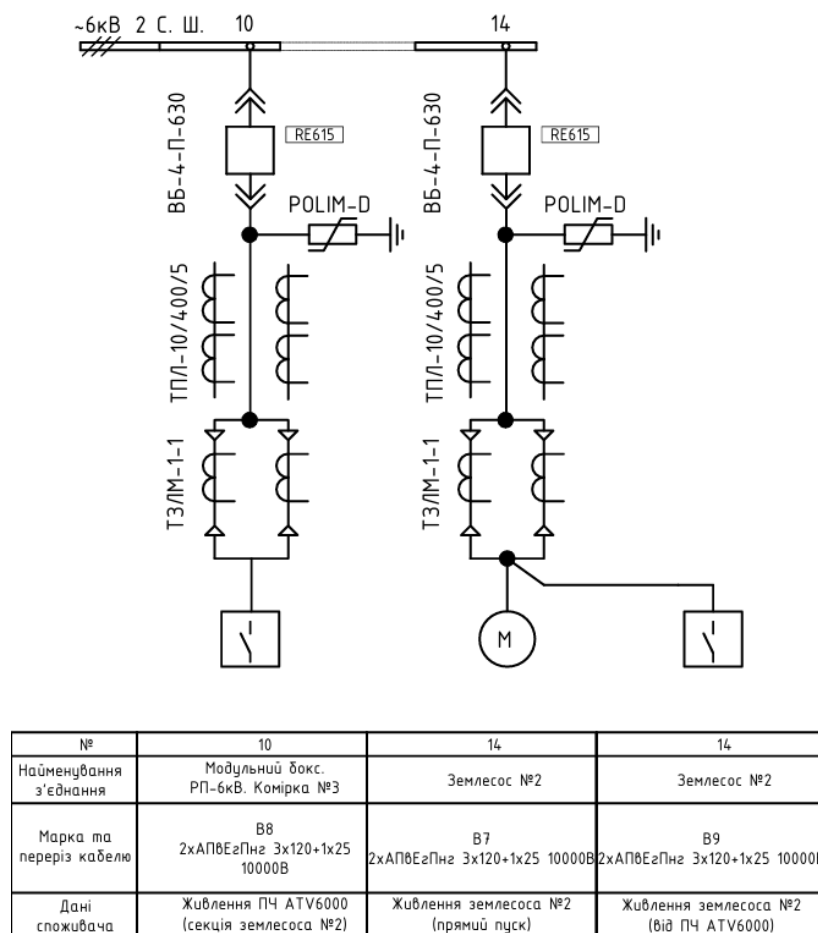



Рисунок 2.1 – Схема електрична принципova живлення землесоса №2 від ПС-38



Просторове розташування насосного агрегату та кабельних трас показано на рисунку 2.2. Загальна довжина кабельної лінії В7 від комірки №14 до двигуна становить 130 м, кабелі марки АПВЕгПнг-10 2\*(3\*120+1\*25) прокладено в кабельному підпіллі та на конструкціях [10, 15].

Як зазначалося в підрозділі 1.2, для розрахункових цілей у даній роботі використано апроксимовану математичну модель, форма кривої якої прийнята за аналогією з відцентровими ґрунтовими насосами типу 28Гр-8Т, а коефіцієнти адаптовані до фактичних паспортних параметрів насоса GIW 24\*26 LHD-49 на частоті обертання приводних двигунів  $n_0 = 1491$  об/хв та напірних характеристик магістрального пульпопроводу довжиною понад 5000 м. Згідно з даними, отриманими під час проходження практики та проектною документацією, масштабована модель насоса має такі розрахункові параметри: подача  $Q_f = 10\ 000$  м<sup>3</sup>/год, напір  $H_0 = 70$  м, максимальний ККД  $\eta_{n.max} = 0,86$ .

$$H_H(Q) = 90 - 2 * 10^{-7} Q^2, \quad (2.1)$$

де  $Q$  у м<sup>3</sup>/год,  $H$  у метрах.

Зовнішня мережа (пульпопровід) відповідно до умов експлуатації ПНС-1 характеризується внутрішнім діаметром  $D = 0,8$  м, довжиною  $L > 5000$  м та геодезичною висотою підйому  $H_r = 15$  м. Втрати напору на тертя розраховано за формулою Дарсі-Вейсбаха з урахуванням підвищеної густини гідросуміші та значної довжини пульпопроводу [3]; місцеві опори прийнято еквівалентними 10 % від лінійних втрат. У результаті характеристика мережі описується виразом:

$$H_M(Q) = 15 + 3 * 10^{-7} Q^2. \quad (2.2)$$

Суміщення характеристик (2.1) і (2.2) дає природну робочу точку (без дроселювання):  $Q_p \approx 12250$  м<sup>3</sup>/год,  $H_p \approx 60$  м. Швидкість пульпи в трубопроводі при цьому становить близько 6,77 м/с, що перевищує критичну швидкість, уточнену за критерієм Дюрана (~3,2 м/с для даної концентрації твердого), отже, технологічне обмеження виконується з достатнім запасом.

Для наочного аналізу взаємодії насоса та зовнішньої мережі розраховано значення напору за характеристиками (2.1) та (2.2) у діапазоні подач від 10 000 до 13 000 м<sup>3</sup>/год з кроком 250 м<sup>3</sup>/год. Результати розрахунків зведено в таблицю 2.1.

Графічне суміщення характеристик наведено на рисунку 2.3. Точка перетину кривих  $H_H(Q)$  та  $H_M(Q)$  відповідає природній робочій точці насосного агрегату за відсутності дроселювання.

Фрагмент плану на відм. -15,000м(вісі 2...8)

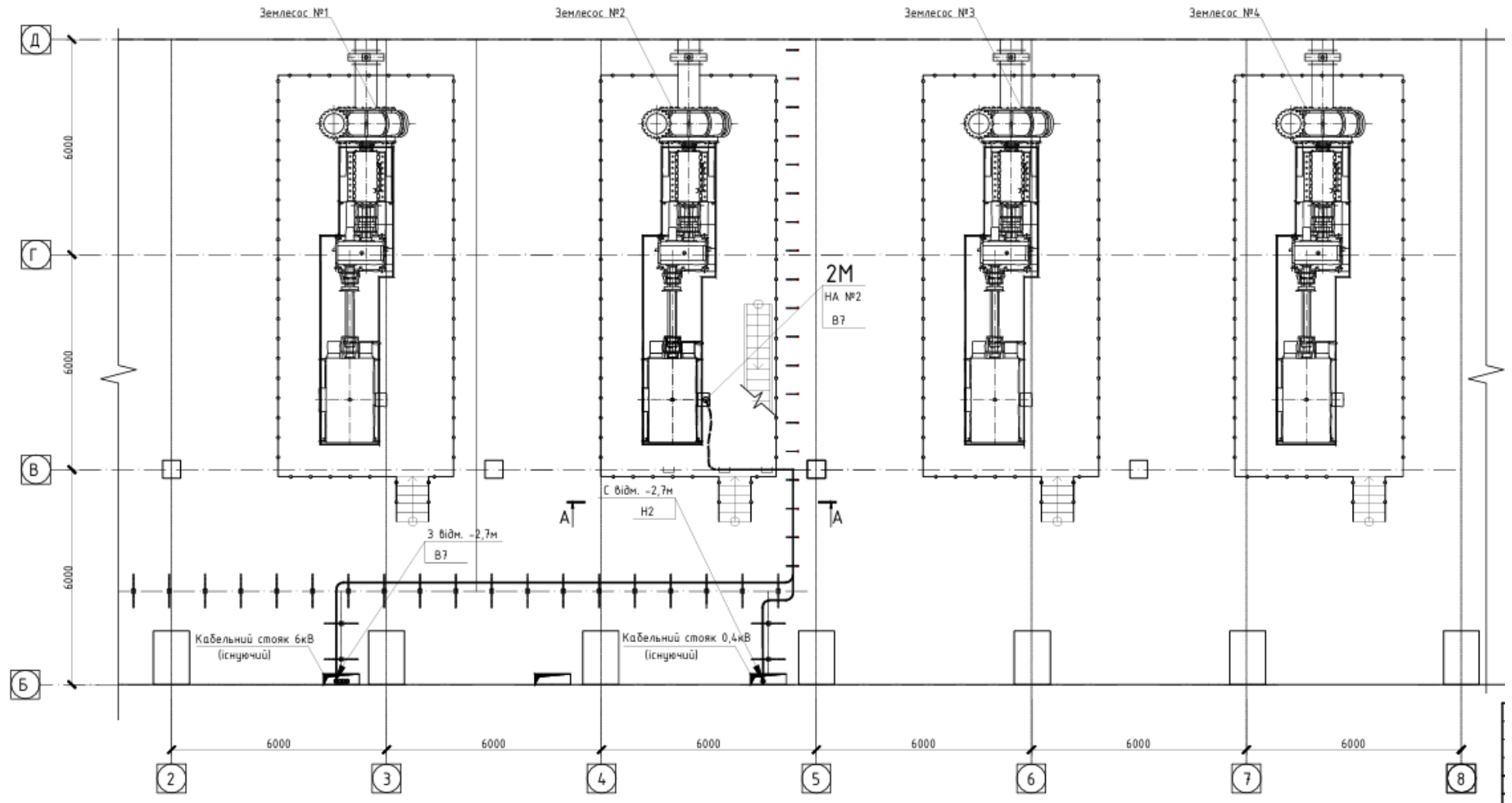


Рисунок 2.2 – Фрагмент плану розташування електроустаткування та кабельних мереж землесоса №2

Таблиця 2.1 – Розрахункові значення напірних характеристик насоса та мережі

| A: Q, м <sup>3</sup> /год | B: H насоса (2.1), м | C: H мережі (2.2), м |
|---------------------------|----------------------|----------------------|
| 10 000                    | 70                   | 45                   |
| 10 250                    | 69                   | 46,5                 |
| 10 500                    | 68                   | 48,1                 |
| 10 750                    | 66,9                 | 49,7                 |
| 11 000                    | 65,8                 | 51,3                 |
| 11 250                    | 64,7                 | 53                   |
| 11 500                    | 63,6                 | 54,7                 |
| 11 750                    | 62,4                 | 56,4                 |
| 12 000                    | 61,2                 | 58,2                 |
| 12 250                    | 60                   | 60                   |
| 12 500                    | 58,8                 | 61,9                 |
| 12 750                    | 57,5                 | 63,8                 |
| 13 000                    | 56,2                 | 65,7                 |

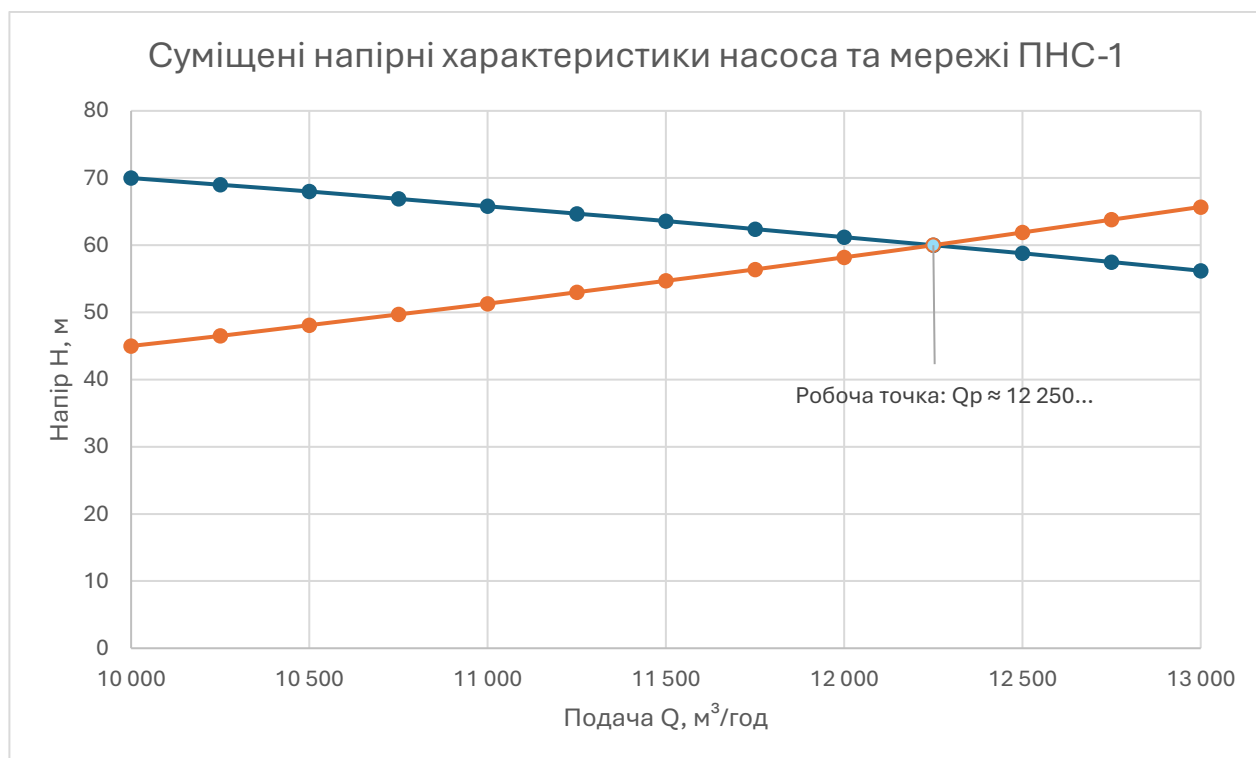


Рисунок 2.3 – Суміщені напірні характеристики насоса та мережі ПНС-1

Суміщення характеристик (2.1) і (2.2) дає природну робочу точку (без дроселювання):  $Q_p \approx 12\,250$  м<sup>3</sup>/год,  $H_p \approx 60$  м. Швидкість пульпи в трубопроводі при цьому становить близько 6,77 м/с, що перевищує критичну швидкість, уточнену за критерієм Дюрана (~3,2 м/с для даної концентрації твердого), отже, технологічне обмеження виконується з достатнім запасом

Фактичний режим експлуатації ПНС-1 передбачає регулювання подачі дроселюванням за допомогою клинових засувок. Для підтримання середньостатистичної продуктивності  $Q_{\phi} = 10000 \text{ м}^3/\text{год}$ , значення базується на основі даних з бази практики, засувка частково прикрита, створюючи додатковий гідравлічний опір. При цьому насос працює в точці з напором  $H_H = 70 \text{ м}$ , тоді як мережа потребує лише  $H_M = 45 \text{ м}$ . Таким чином, надлишковий напір  $\Delta H_{др} = 25 \text{ м}$  безповоротно втрачається на місцевому опорі засувки.

Для кількісної оцінки енергоспоживання визначено потужність на валу насоса:

$$N_B = \frac{\rho g H_H Q_{\phi}}{3600 \cdot \eta_n}, \quad (2.3)$$

де  $\eta_n$  – ККД насоса в робочій точці.

При  $Q_{\phi} = 10000 \text{ м}^3/\text{год}$  у режимі глибокого дроселювання робоча точка зміщується вліво від зони найвищого ККД, тому приймаємо  $\eta_n \approx 0,84$ . Тоді:

$$N_B = \frac{1400 \cdot 9,81 \cdot 10000 \cdot 70}{3600 \cdot 0,84} \approx 3179 \text{ кВт.}$$

Асинхронний двигун потужністю 3,5 МВт працює з навантаженням близько 91 % від номінального; за такого режиму його ККД знижується до  $\eta_{дв} \approx 0,96$ , а коефіцієнт потужності становить  $\cos \varphi \approx 0,88$ . Отже, активна потужність, споживана з мережі 6 кВ,

$$P_1 = \frac{N_B}{\eta_{дв}} = \frac{3179}{0,96} \approx 3311 \text{ кВт.}$$


Повна потужність та реактивна складова:

$$S = \frac{P_1}{\cos \varphi} = \frac{3311}{0,88} \approx 3762 \text{ кВА;}$$

$$Q = \sqrt{S^2 - P_1^2} = \sqrt{3762^2 - 3311^2} \approx 1787 \text{ квар.}$$

Низький  $\cos \varphi$  спричиняє додаткові втрати в кабельних лініях та трансформаторах, а також вимагає застосування засобів компенсації реактивної потужності.

Істотну частку споживаної енергії становлять втрати на дроселювання. Корисна гідравлічна потужність, що витрачається власне на транспортування пульпи,


$$P_{\text{кор}} = \frac{\rho g H_H Q_{\phi}}{3600} = \frac{1400 * 9,81 * 10000 * 45}{3600} \approx 1717 \text{ кВт.}$$

Відношення  $P_{\text{кор}}/P_1 = 1717/3311 \approx 0,52$  показує, що лише 52 % електроенергії виконує корисну роботу; решта втрачається в засувці, насосі та двигуні через неоптимальний режим.

Оскільки насосне обладнання експлуатується цілодобово (24/7), дані отриманні на практичній базі, річний фонд робочого часу становить:

$$T_p = 365 * 24 = 8760 \text{ год.}$$

Річне електроспоживання одного агрегату за середнього завантаження становить

$$W_{\text{рік}} = P_1 * T_p = 3311 * 8760 \approx 29 \text{ млн кВт * год.}$$

Прямі пуски двигуна, що й досі застосовуються в резервній схемі, супроводжуються кидками струму (5–7-кратними відносно номіналу, який становить 391 А) та гідравлічними ударами, що прискорюють знос проточної частини й арматури. Хоча ці явища короткочасні, вони створюють додаткове навантаження на мережу та знижують загальну надійність системи.

Таким чином, існуючий режим роботи землесосів характеризується: значним перевищенням фактичного напору над потребами мережі (на 25 м), що зумовлює марні втрати потужності на дроселюванні; роботою насоса в зоні зниженого ККД (0,84 замість 0,86), що збільшує механічні втрати в проточній частині; низьким коефіцієнтом потужності ( $\cos \phi \approx 0,88$ ), який погіршує показники якості електроенергії та потребує додаткових витрат на компенсацію реактивної потужності.

Отримані кількісні оцінки є вихідною базою для обґрунтування переходу до частотно-регульованого електропривода, який дозволяє усунути втрати на дроселюванні та забезпечити роботу насосів у зоні оптимального ККД.

## **2.2 Обґрунтування типу, параметрів та режиму роботи високовольтного перетворювача частоти**

Виконаний аналіз засвідчив, що основними недоліками існуючої системи електроприводу землесосів ПНС-1 є неможливість регулювання швидкості обертання, втрати на дроселюванні, низький коефіцієнт потужності та значні пускові струми. Усунення цих недоліків досягається впровадженням високовольтного перетворювача частоти (ПЧ) ATV6000C445A6060DC5, встановленого в рамках проекту модернізації. Завданням цього підрозділу є інженерне обґрунтування відповідності

характеристик цього ПЧ вимогам регульованого електроприводу насосних агрегатів та визначення раціонального закону частотного регулювання.

Загальну структуру системи регульованого електроприводу та її інтеграцію в існуючу схему електропостачання демонструє рисунок 2.4. На схемі наочно відображено архітектуру живлення, що базується на трьох незалежних вводах 6 кВ від підстанцій ПС-28 (комірка №18), ПС-39 (комірка №9) та ПС-38 (комірка №10).

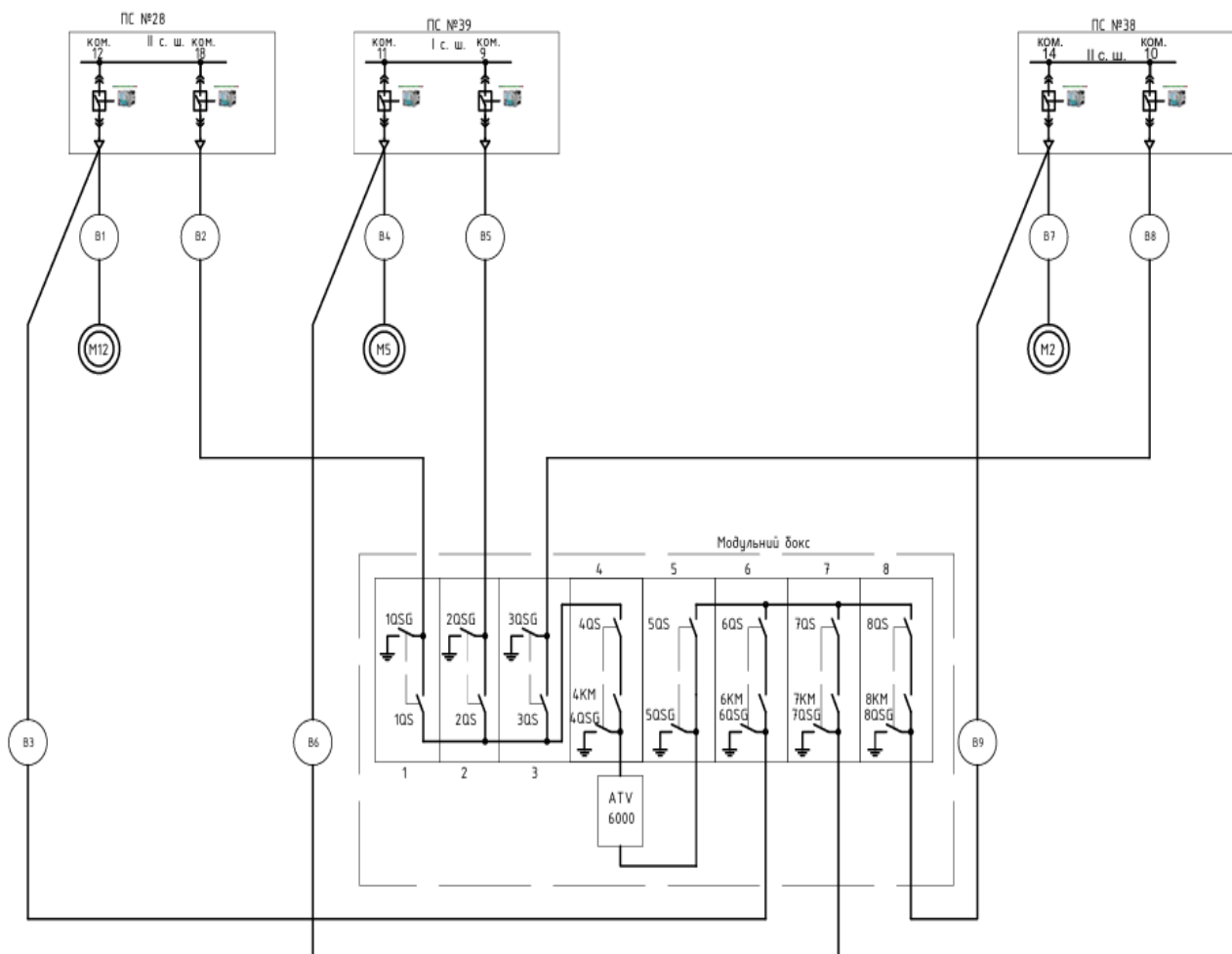



Рисунок 2.4 – Схема електрична принципова підключення ПЧ ATV6000

Принциповою особливістю цієї системи є реалізація дворівневого керування живленням двигунів: основний режим передбачає живлення від ПЧ через вихідні комірочки з елегазовими контакторами Rollarc R400, що забезпечує плавний розгін та частотне регулювання кожного з трьох землесосів (№12, №5 та №2). Одночасно збережено байпасні лінії з вакуумними вимикачами (комірочки №12, №11, №14), які гарантують можливість прямого пуску від мережі у разі виведення ПЧ в ремонт або його відмови. Крім того, саме ця комутаційна структура дозволяє реалізувати функцію безударного синхронного перемикачання двигуна з



частотного режиму на прямий живлення від мережі (і навпаки), що критично важливо для запобігання гідравлічним ударам у пульпопроводі та кидкам струму в мережі 6 кВ під час переходу .

Більш детальне уявлення про розподіл потоків потужності та компонування комутаційної апаратури всередині модульного боксу ПЧ дає однолінійна схема розподільчого пристрою РП-6кВ (рисунок 2.5). Вхідні лінії В2, В5 та В8 підключаються до комірок №1–3, оснащених роз'єднувачами, які живлять силові трансформатори та реактори перетворювача. Саме тут відбувається формування 24-пульсної схеми випрямляча, що мінімізує вплив вищих гармонік на мережу підприємства. З виходу інверторної частини ПЧ напруга подається через вихідні комірочки №6–8 з елегазовими контакторами Rollarc R400 на кабельні лінії В3, В6, В9, що йдуть до статорів землесосів. На схемі також вказано маркування та перерізи живлячих кабелів –  $2 \cdot (3 \cdot 120 + 1 \cdot 25)$  мм<sup>2</sup>. Вибір такого перерізу обумовлений необхідністю тривалого пропускання номінального струму двигунів (до 391 А) як у режимі частотного приводу, так і при резервному прямому пуску від мережі через байпасні комірочки.

Реалізація об'єднаних законів керування, моніторингу параметрів та безпеки технологічного процесу здійснюється розподіленою автоматизованою системою керування, структурна схема якої наведена на рисунку 2.6. Система побудована за ієрархічним принципом та складається з трьох рівнів. Верхній рівень представлений пультом диспетчера ШУ-Д на базі контролера TM241CE24T, який забезпечує інтерфейс оператора, візуалізацію процесу та завдання уставок частоти обертання. Середній рівень - шафа управління з двома контролерами TM241CE40R, які реалізують основну логіку керування ПЧ, комутаційною апаратурою та захистами. Нижчий польовий рівень складається з модулів віддаленого вводу/виводу OTB1S0M9LP, встановлених безпосередньо біля насосних агрегатів у шафах ЗС№2, 5, 12. До цих модулів підключені датчики вібрації Metrix ST6917, температури обмоток та підшипників (RTD PT100), що дозволяє отримувати достовірну інформацію про стан обладнання без протяжних аналогових трас. Обмін даними між рівнями реалізовано за допомогою високошвидкісної мережі Ethernet (між диспетчером та шафою управління) та мережі Modbus RTU (з модулями ОТВ), що забезпечує дистанційне керування частотою ПЧ в реальному часі та архівування всіх технологічних подій.

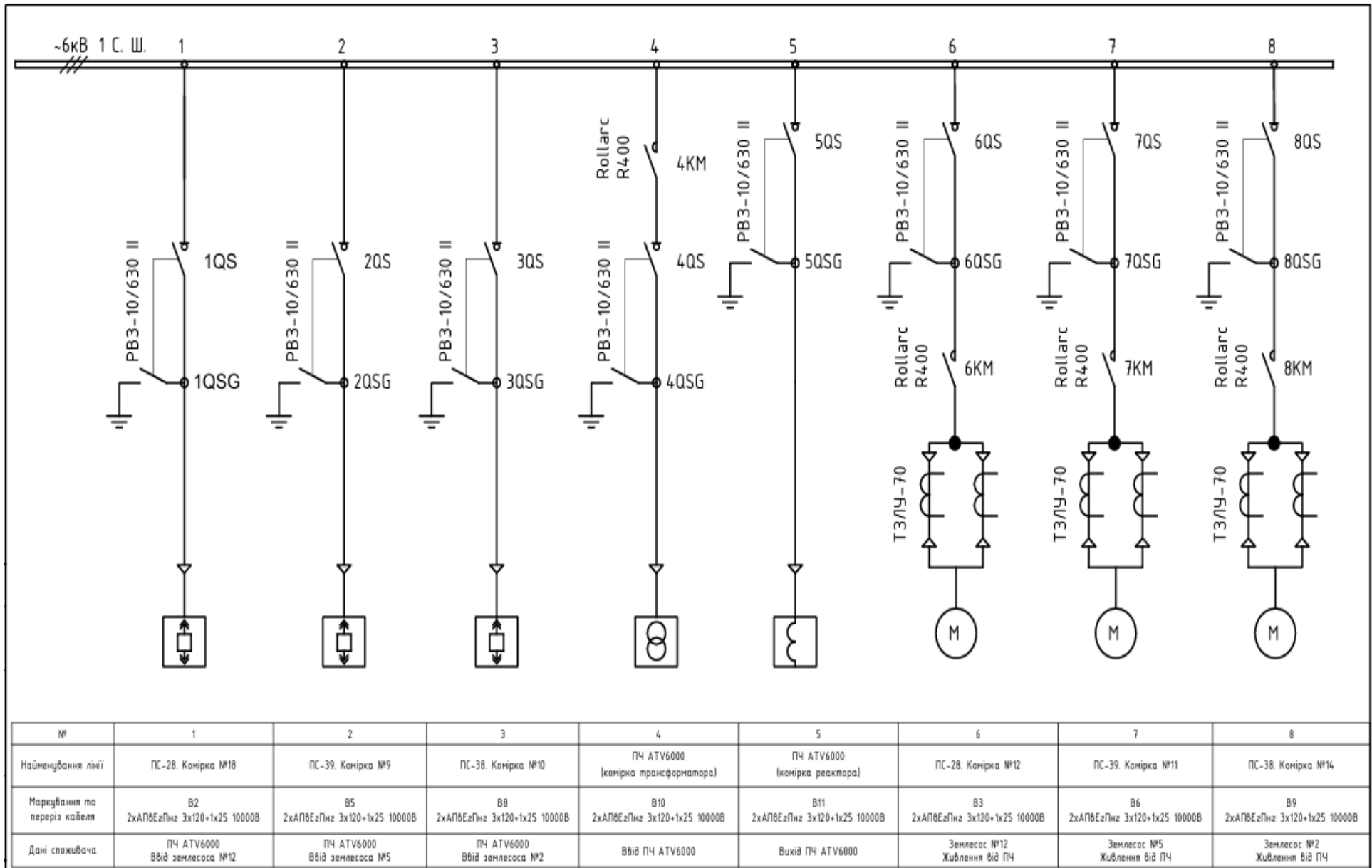


Рисунок 2.5 – Однолінійна схема РП-6 кВ модульного боксу ПЧ ATV6000

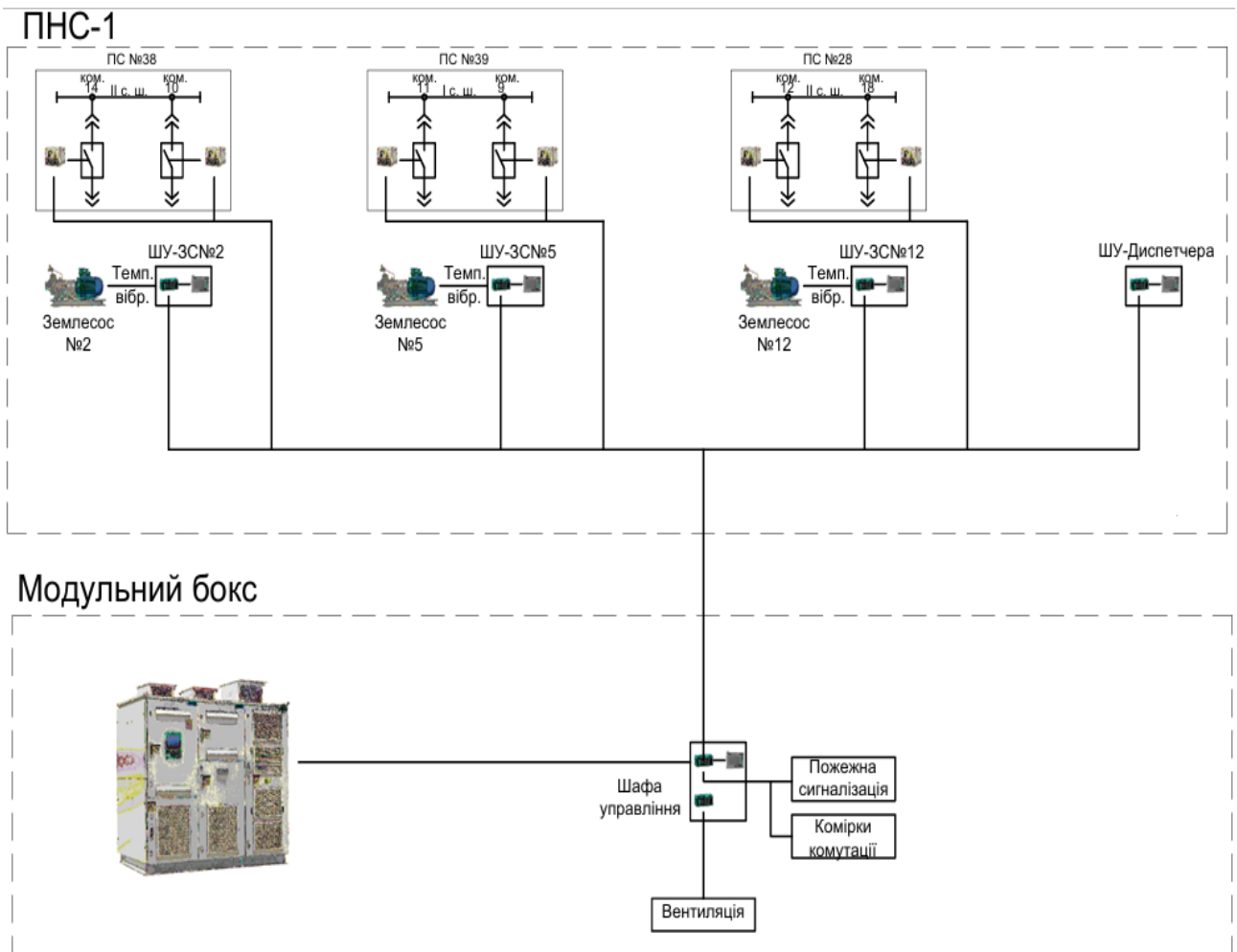


Рисунок 2.6 – Схема структурна АСУ ПСН-1

### 2.2.1 Технічні вимоги до системи регульованого електропривода

На основі аналізу проблем, викладених у розділі 1 та підрозділі 2.1, до системи регульованого електроприводу висуваються такі вимоги:

1) плавний пуск та регулювання швидкості: забезпечення плавного частотного пуску з обмеженням пускового моменту на рівні 60–80% від номінального для усунення гідравлічних ударів та просідань напруги в мережі 6 кв.

2) діапазон регулювання частоти обертання: можливість зміни частоти обертання насосів у діапазоні, що забезпечує продуктивність від мінімально допустимої (за умови підтримання швидкості потоку вище критичної та подолання гідравлічного опору мережі) до номінальної.

3) підвищення коефіцієнта потужності: забезпечення вхідного коефіцієнта потужності, близького до одиниці, для зменшення споживання реактивної енергії з мережі.

4) інтеграція з існуючою АСУ ТП: можливість керування та моніторингу параметрів ПЧ з пульта диспетчера через мережі Ethernet та Modbus RTU.

## 2.2.2 Аналітичне обґрунтування вибору ПЧ ATV6000

Проектом передбачено встановлення ПЧ ATV6000C445A6060DC5 виробництва Schneider Electric, який постачається в комплектному модульному блок-боксі. Його основні технічні характеристики, релевантні для нашого об'єкта, наведено в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Основні параметри ПЧ ATV6000C445A6060DC5

| Параметр                      | Значення               |
|-------------------------------|------------------------|
| Номінальна вихідна потужність | 4450 кВт               |
| Номінальна напруга живлення   | 6 кВ, 3 фази           |
| Діапазон вихідної частоти     | 0...50 Гц              |
| Тип випрямляча                | 24-пульсний, активний  |
| Вхідний коефіцієнт потужності | > 0,96                 |
| ККД перетворювача             | > 0,97                 |
| Спосіб охолодження            | Повітряний, примусовий |
| Конструктивне виконання       | Модульний блок-бокс    |

Потужність ПЧ (4450 кВт) обрано з запасом відносно номінальної потужності приводного двигуна (3,5 МВт), що відповідає стандартним рекомендаціям для високовольтних застосувань. Для перевірки відповідності за струмом розрахуємо номінальний струм двигуна:

$$I_{\text{дв}} = \frac{P_{\text{дв}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}} \cdot \cos\phi} \quad (2.4)$$

$I_{\text{дв}} = \frac{3500}{1,73 \cdot 6 \cdot 0,89 \cdot 0,96} \approx 393 \text{ А}$  (наближено до паспортного значення (391 А)).

Вихідний номінальний струм ПЧ цієї моделі становить 445 А, що перевищує струм двигуна та забезпечує необхідний запас для роботи в допустимих режимах перевантаження.

Застосування 24-пульсного активного випрямляча є ключовою перевагою, що дозволяє не тільки підтримувати вхідний  $\cos \phi$  на рівні, близькому до 1, але й значно знизити рівень гармонійних спотворень у мережі живлення, що підтверджується міжнародними стандартами якості електроенергії [12]. Вбудований синус-фільтр на виході ПЧ обмежує швидкість наростання напруги  $dU/dt$ , захищаючи ізоляцію статорних обмоток двигуна від передчасного старіння.

## 2.2.3 Визначення закону частотного регулювання

Для відцентрових насосів, які працюють на мережу зі значним статичним напором (геодезична висота підйому  $H_r = 15 \text{ м}$ ), застосування квадратичного закону регулювання ( $U/f^2 = \text{const}$ ) є неприпустимим, оскільки це призведе до критичного зниження магнітного потоку та втрати моменту двигуна на низьких частотах обертання. Враховуючи наявність

статичного напору, оптимальним з точки зору збереження перевантажувальної здатності та мінімізації втрат є лінійний закон регулювання напруги відносно частоти ( $U/f = \text{const}$ ) або використання режиму векторного керування. Ці закони забезпечують роботу двигуна з необхідним магнітним потоком для подолання опору мережі у всьому діапазоні регулювання швидкості.

Діапазон регулювання частоти обертання визначається технологічними вимогами до процесу гідротранспорту. Нижня межа обмежена необхідністю підтримання швидкості пульпи в трубопроводі вище критичної для запобігання забиттю  $V_{кр} \approx 3,2$  м/с. З використанням законів подібності ( $Q/Q_0 = n/n_0$ ) та геометрії трубопроводу ( $D = 0,8$  м) визначимо мінімальну продуктивність насоса:

$$Q_{min} = V_{кр} * \frac{\pi D^2}{4} \quad (2.5)$$

$$Q_{min} = 3,2 * \frac{3,14 * 0,8^2}{4} \approx 1,609 \text{ м}^3/\text{с} \approx 5790 \text{ м}^3/\text{год.}$$

Відповідно до законів подібності відцентрових машин, при зміні частоти обертання з  $n_0$  до  $n = k \cdot n_0$  напірна характеристика насоса змінюється. Якщо базова характеристика насоса описується рівнянням  $H_H = 90 - 2 * 10^{-7} Q^2$ , то при коефіцієнті регулювання  $k$  вона набуває вигляду:  $H = 90k^2 - 2 * 10^{-7} Q^2$ .

Мінімально допустима частота обертання відповідає умові, за якої насос ще здатен подолати опір мережі при мінімально допустимій подачі  $Q_{min} = 5790$  м<sup>3</sup>/год (що відповідає критичній швидкості пульпи). Прирівняємо змінену характеристику насоса до характеристики мережі (2.2) при цій подачі:

$$90k^2 - 2 * 10^{-7} * (5790)^2 = 15 + 3 * 10^{-7} * (5790)^2$$

$$90k^2 = 15 + 5 * 10^{-7} * 33524100 = 15 + 16,76 = 31,76$$

Звідси визначаємо мінімальний коефіцієнт регулювання:

$$k_{min} = \sqrt{\frac{H_{min}}{H_x}} \quad (2.6)$$

де  $H_x = 90$  м — напір насоса при нульовій подачі за характеристикою (2.1).

$$k_{min} = \sqrt{\frac{31,76}{90}} = 0,594$$


$$n_{min} = n_0 * k_{min} \quad (2.7)$$

$$n_{min} = 0,594 * 1491 \approx 886 \text{ об/хв.}$$

Відповідна мінімальна частота струму на виході ПЧ:

$$f_{min} = 50 * \frac{n_{min}}{1500} \quad (2.8)$$

$$f_{min} = 50 * \frac{886}{1500} \approx 29,7 \text{ Гц.}$$

Отже, діапазон регулювання частоти ПЧ для забезпечення технологічного процесу на магістральному пульпопроводі довжиною понад 5000 м має становити від 29,7 Гц до 50 Гц. Такий діапазон повністю перекривається можливостями ATV6000, дозволяючи гнучко адаптувати продуктивність насоса до поточного гідравлічного опору мережі за умови безумовного дотримання обмежень.

#### **2.2.4 Інтеграція в існуючу схему електропостачання та керування**

Проектна схема електропостачання передбачає глибоко інтегроване та резервоване рішення. ПЧ отримує живлення від трьох незалежних введів 6 кВ з різних секцій шин підстанцій ПС-28 (комірка №18), ПС-38 (комірка №10) та ПС-39 (комірка №9). Така топологія забезпечує безперебійне живлення перетворювача навіть у разі виведення в ремонт однієї з підстанцій, що повністю відповідає вимогам до об'єктів першої особливої категорії надійності електрозабезпечення.

На виході ПЧ, у модульному боксі (рис. 2.6), змонтовано розподільний пристрій РП-6 кВ на базі камер КСО-393, укомплектований елегазовими контакторами Rollarc R400D та роз'єднувачами РВЗ-10/630 для підключення до двигунів землесосів №12, №5 та №2 відповідно. Принциповою особливістю системи є забезпечення можливості безударного синхронного перемикачання двигуна між живленням від ПЧ та мережі. Для цього кожен привід під'єднано до двох незалежних кабельних ліній 6 кВ: одна лінія живить двигун від ПЧ через зазначені контактори, а друга (через окремі комірки з вакуумними вимикачами ВБ-4П №14, №11, №12) забезпечує резервний прямий пуск від мережі.

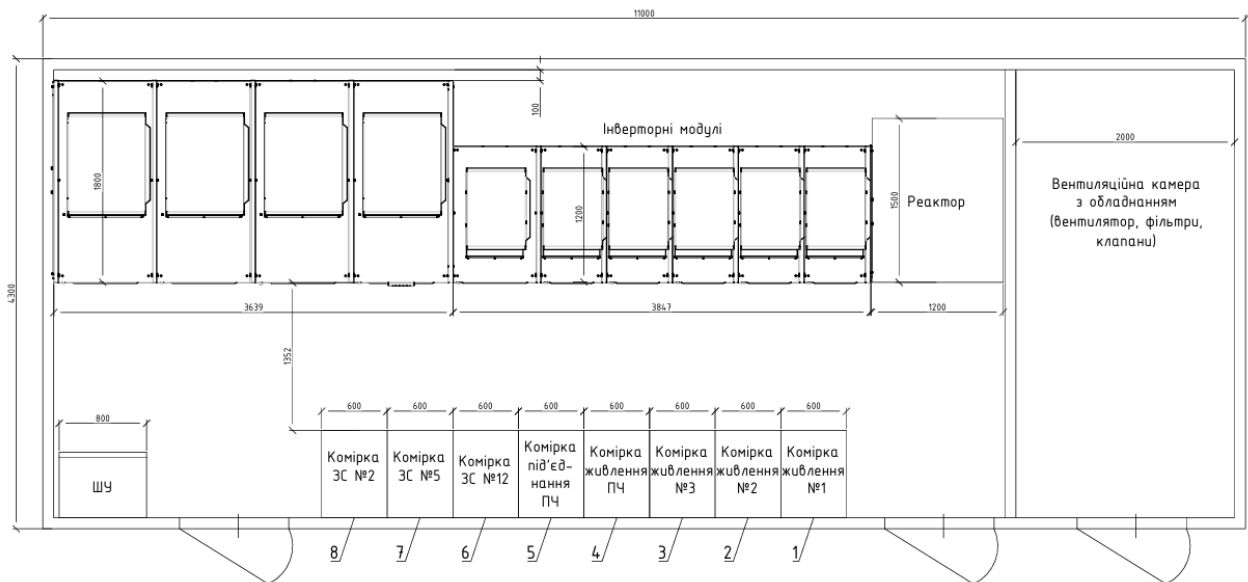


Рисунок 2.7 – Схема розташування обладнання в модульному боксі ПЧ ATV6000

Система керування автоматично виконує синхронізацію напруги та частоти на виході ПЧ із параметрами мережі 6 кВ, після чого відбувається перемикання без перехідних процесів, що виключає кидки струму, електромагнітні моменти та гідравлічні удари в пульпопроводі. Керування вибором режиму живлення («Частотний» або «Прямий») здійснюється дистанційно з пульта диспетчера через шафу АСУ. Така дворівнева схема (основний режим – через ПЧ, резервний – прямий пуск) гарантує безперебійну роботу технологічного ланцюга навіть у разі відмови або виведення в плановий ремонт перетворювача частоти.

### 2.3 Дослідження режимних параметрів роботи землесосів при застосуванні високовольтного перетворювача частоти

Метою цього підрозділу є математичне моделювання роботи насосного агрегату №2 із частотно-регульованим електроприводом, визначення його нових енергетичних показників та кількісна оцінка ефекту енергозбереження порівняно з нерегульованим дросельованим режимом, проаналізованим у підрозділі 2.1. Базова середньостатистична продуктивність  $Q_{\phi} = 10000 \text{ м}^3/\text{год}$ , що підтримувалася раніше за допомогою дроселювання.

#### 2.3.1 Визначення робочої точки насоса при частотному регулюванні

Застосування ПЧ дозволяє плавно змінювати частоту обертання насоса, забезпечуючи роботу без дроселювання – напір, створюваний насосом, точно дорівнює напору, потрібному мережі для даної витрати.

Відповідно до законів подібності відцентрових машин, при зміні частоти обертання з  $n_0$  до  $n = k \cdot n_0$  напірна характеристика набирає вигляду:

$$H_H(Q, k) = k^2 * H_H\left(\frac{Q}{k}\right) = 90k^2 - 2 * 10^{-7} Q^2 \quad (2.9)$$

Прирівнявши цей вираз до опору мережі (2.2), отримуємо рівняння для визначення  $k$ :

$$90k^2 - 2 * 10^{-7} Q^2 = 15 + 3 * 10^{-6} Q^2,$$

$$90k^2 = 15 + 5 * 10^{-6} Q^2,$$

$$k^2 = \frac{15 + 5 * 10^{-6} Q^2}{90}.$$

Для  $Q_{\phi} = 10000 \text{ м}^3/\text{год}$ :

$$5 * 10^{-7} * (10000)^2 \approx 50 \text{ м},$$

$$90k^2 = 15 + 50 = 65,$$

$$k^2 = \frac{65}{90} \approx 0,722,$$

$$k \approx \sqrt{0,722} \approx 0,85.$$

Отже, для забезпечення витрати  $10000 \text{ м}^3/\text{год}$  без дроселювання частота обертання насоса має бути знижена до:

$$n = k * n_0 = 0,85 * 1491 \approx 1267 \text{ об/хв},$$

що відповідає вихідній частоті ПЧ  $f = k * 50 = 0,85 * 50 = 42,5 \text{ Гц}$ . Це значення знаходиться значно вище за мінімально допустиму частоту  $29,7 \text{ Гц}$ , тобто обмеження за критичною швидкістю пульпи безумовно виконується.

Напір, створюваний насосом при цьому, точно дорівнює потрібному мережі:

$$H_{M(10000)} = 15 + 3 * 10^{-7} * 10000^2 \approx 45 \text{ м}.$$

Розрахункові значення для побудови Q-H характеристик наведено в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Розрахункові значення напору для побудови Q-H характеристик

| Q, м³/год | H мережі, м | H насоса (1491 об/хв), м | H насоса (1267 об/хв), м |
|-----------|-------------|--------------------------|--------------------------|
| 0         | 15          | 90                       | 65                       |
| 500       | 15,1        | 90                       | 65                       |
| 1000      | 15,3        | 89,8                     | 64,8                     |
| 1500      | 15,7        | 89,6                     | 64,6                     |
| 2000      | 16,2        | 89,2                     | 64,2                     |
| 2500      | 16,9        | 88,8                     | 63,8                     |
| 3000      | 17,7        | 88,2                     | 63,2                     |
| 3500      | 18,7        | 87,6                     | 62,6                     |
| 4000      | 19,8        | 86,8                     | 61,8                     |
| 4500      | 21,1        | 86                       | 61                       |
| 5000      | 22,5        | 85                       | 60                       |
| 5500      | 24,1        | 84                       | 59                       |
| 6000      | 25,8        | 82,8                     | 57,8                     |
| 6500      | 27,7        | 81,6                     | 56,6                     |
| 7000      | 29,7        | 80,2                     | 55,2                     |
| 7500      | 31,9        | 78,8                     | 53,8                     |
| 8000      | 34,2        | 77,2                     | 52,2                     |
| 8500      | 36,7        | 75,6                     | 50,6                     |
| 9000      | 39,3        | 73,8                     | 48,8                     |
| 9500      | 42,1        | 72                       | 47                       |
| 10000     | 45          | 70                       | 45                       |
| 10500     | 48,1        | 68                       | 43                       |
| 11000     | 51,3        | 65,8                     | 40,8                     |
| 11500     | 54,7        | 63,6                     | 38,6                     |
| 12000     | 58,2        | 61,2                     | 36,2                     |
| 12250     | 60          | 60                       | 35                       |
| 12500     | 61,9        | 58,8                     | 33,8                     |
| 13000     | 65,7        | 56,2                     | 31,4                     |

Наочне порівняння робочих точок насоса до та після модернізації представлено на рисунку 2.8. Крива 1 відображає характеристику мережі згідно з (2.2). Крива 2 є напірною характеристикою насоса за номінальної частоти обертання 1491 об/хв. Крива 3 відповідає характеристиці насоса при зниженій (за допомогою ПЧ) частоті обертання 1267 об/хв (42,5 Гц).

Перетин кривих 1 та 2 визначає природну робочу точку насосного агрегату за відсутності будь-якого регулювання:  $Q_p \approx 12250 \text{ м}^3/\text{год}$ ,  $H_p \approx 60 \text{ м}$ . Однак технологічно необхідна фактична продуктивність становить  $Q_\phi = 10000 \text{ м}^3/\text{год}$ , тому в існуючій схемі засувка частково прикривається. При цьому робоча точка штучно зміщується по кривій 2 до Точки А, де напір насоса становить 70 м. У той самий час для забезпечення витрати  $10000 \text{ м}^3/\text{год}$  мережі необхідний напір лише 45 м (крива 1).

Точка В (перетин кривих 1 та 3) відповідає проектуваному енергоефективному режиму роботи з ПЧ, де напір насоса точно відповідає опору мережі (45 м) без втрат на дроселюванні. Вертикальна відстань між точками А (70 м) та В (45 м) якісно характеризує надлишковий напір ( $\Delta H = 25$  м), який у існуючому режимі безповоротно втрачається на засувці, і якого вдається уникнути завдяки частотному регулюванню.

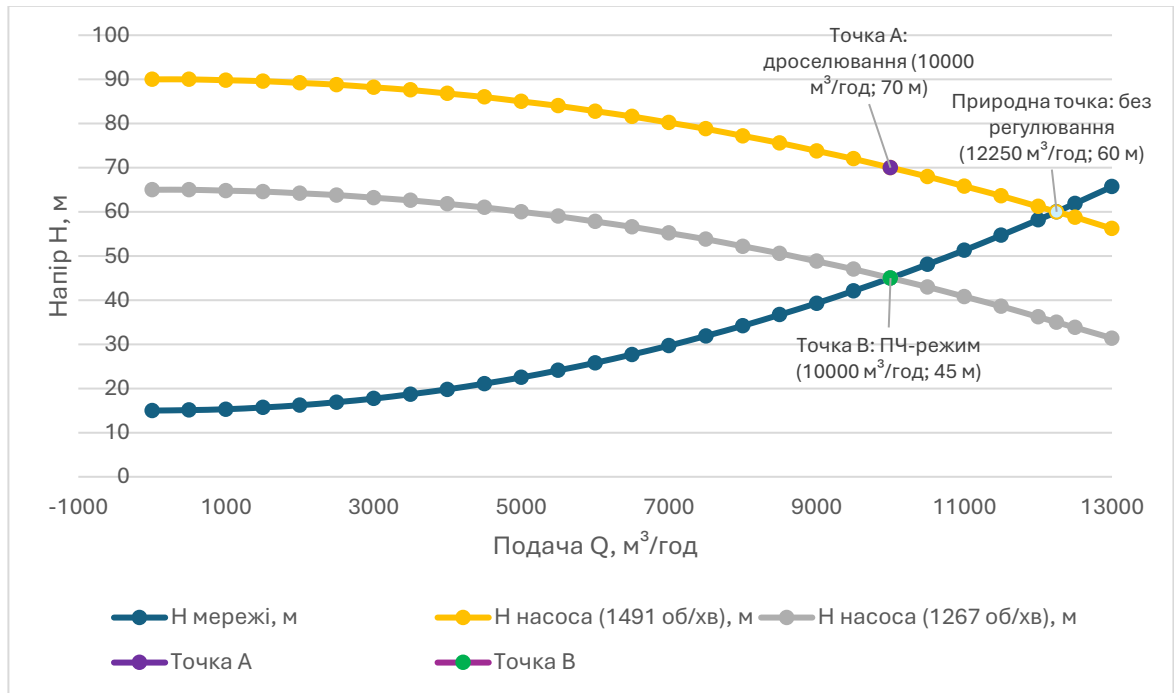


Рисунок 2.8 – Суміщені Q-H характеристики насоса та мережі за різних режимів регулювання

Таким чином, графік наочно демонструє три принципові режими:

- 1) природний режим (12250 м³/год; 60 м) – теоретична точка роботи без регулювання;
- 2) дросельний режим (Точка А: 10000 м³/год; 70 м) – фактична робота існуючої системи з втратами;
- 3) частотний режим (Точка В: 10000 м³/год; 45 м) – запропонований енергоефективний режим без втрат.

### 2.3.2 Розрахунок споживаної потужності в регульованому режимі

Потужність на валу насоса визначається через корисну гідравлічну потужність і ККД насоса в новій робочій точці. Корисна потужність залишається незмінною, оскільки витрата й необхідний напір ті самі:

$$P_{\text{кор}} = \frac{\rho g H_H Q_{\text{ф}}}{3600} = \frac{1400 * 9,81 * 10000 * 45}{3600} \approx 1717 \text{ кВт.}$$

Важливою перевагою частотного регулювання є те, що при зниженні частоти обертання до 1267 об/хв робоча точка зміщується по характеристиці мережі в зону максимального ККД насоса. Оскільки нова подача 10000 м<sup>3</sup>/год відповідає розрахунковій точці максимуму ККД для зменшеної кривої ( $Q/Q_{\text{БЕП}} \approx 1,0$ ), приймаємо  $\eta_n = 0,86$  (замість 0,84 при дроселюванні). Тоді валова потужність:

$$N_{\text{врег}} = \frac{P_{\text{кор}}}{\eta_n} = \frac{1717}{0,86} \approx 1997 \text{ кВт.}$$

Порівняно з дросельним режимом (3179 кВт) валова потужність зменшилася на 1182 кВт, або на 37 %.

Для визначення споживання з мережі необхідно врахувати ККД двигуна та перетворювача. Асинхронний двигун потужністю 3,5 МВт при навантаженні 1997 кВт (близько 57 % від номіналу) працює з дещо зниженим ККД. Практичні дані для машин такого класу [12] дають змогу прийняти  $\eta_{\text{дв}} \approx 0,94$ . ККД перетворювача частоти, згідно з технічною документацією, становить  $\eta_{\text{пч}} = 0,97$ .

Активна потужність, споживана з мережі 6 кВ, становить:

$$P_{1\text{рег}} = \frac{N_{\text{врег}}}{\eta_{\text{дв}} * \eta_{\text{пч}}} \quad (2.9)$$

$$P_{1\text{рег}} = \frac{1997}{0,94 * 0,97} \approx 2189 \text{ кВт.}$$

Отже, економія активної потужності дорівнює:

$$\Delta P = P_{1\text{існ}} - P_{1\text{рег}} = 3311 - 2189 = 1122 \text{ кВт,}$$


що становить 33,9 % від вихідного споживання.

### 2.3.3 Підвищення коефіцієнта потужності та зниження реактивного навантаження

На відміну від нерегульованого режиму, де  $\cos\phi \approx 0,88$ , активний випрямляч ПЧ ATV6000 підтримує вхідний коефіцієнт потужності на рівні, близькому до 1 ( $\cos\phi_{\text{пч}} \approx 0,98$ ). Тому повна потужність, споживана з мережі, практично дорівнює активній:

$$S_{\text{рег}} \approx \frac{P_{1\text{рег}}}{\cos\phi_{\text{пч}}} = \frac{2189}{0,98} \approx 2234 \text{ кВА,}$$

а реактивна потужність зменшується до символічних значень:


$$Q_{\text{пер}} = \sqrt{S_{\text{пер}}^2 - P_{1\text{пер}}^2} = \sqrt{2234^2 - 2189^2} \approx 446 \text{ квар.}$$

Таким чином, споживання реактивної потужності знижується на 1341 квар (з 1787 квар до 446 квар), що виключає потребу в додаткових компенсувальних пристроях для цих приєднань та сприяє загальному поліпшенню якості електроенергії в мережі 6 кВ.

### **2.3.4 Річна економія електроенергії**

Оскільки насосний агрегат працює цілодобово (24/7), річний фонд робочого часу становить  $T_p = 8760$  годин. Економія електроенергії одним агрегатом становить:

$$\Delta W_{\text{рік}} = \Delta P * T_p = 1122 * 8760 \approx 9,83 \text{ млн кВт * год.}$$

За тарифами, актуальними для промислових підприємств, така економія дає значний фінансовий ефект, який деталізується в економічному розділі роботи.

### **2.3.5 Аналіз результатів та висновки**

Проведене дослідження засвідчило, що перехід від дросельного регулювання до частотного дозволяє кардинально підвищити енергетичну ефективність насосного агрегату. Аналіз отриманих результатів показує, що загальна економія активної потужності (1122 кВт або 33,9%) формується за рахунок синергетичного впливу кількох факторів.

По-перше, найбільший внесок у зниження енергоспоживання дає повне усунення втрат на дроселюванні. В існуючому режимі надлишковий напір у 25 метри (при напорі насоса 70 м мережі вимагалось лише 45 м) безповоротно гасився на клиновій засувці, перетворюючись на тепло та вібрацію. Завдяки застосуванню ПЧ зниження частоти обертання до 1267 об/хв (42,5 Гц) дозволило привести напірну характеристику насоса у точну відповідність з гідравлічним опором магістрального пульпопроводу довжиною понад 5000 м. Насос тепер створює рівно стільки напору, скільки вимагає мережа (45 м), виключаючи марні витрати енергії на подолання штучно створеного опору.

По-друге, зміщення робочої точки по кривій мережі замість кривої насоса дозволило повернути агрегат у зону найвищого ККД (ВЕР). Слід зазначити, що основна частка економії потужності на валу (близько 1135 кВт) забезпечена саме зниженням напору з 70 м до 45 м завдяки зменшенню частоти обертання. Водночас перехід у зону оптимальної подачі при частотному регулюванні супроводжується зростанням ККД насоса з 0,84 до 0,86, що дає додаткову економію близько 47 кВт (якби ККД залишився на рівні 0,84, потужність на валу складала б 2044 кВт замість 1997 кВт). В сукупності ці два фактори забезпечили загальне

зниження потужності на валу на 1182 кВт (з 3179 кВт до 1997 кВт) при тій самій корисній подачі.

По-третє, окрім суттєвої економії активної енергії, застосування перетворювача частоти ATV6000 з активним 24-пульсним випрямлячем розв'язало проблему низького коефіцієнта потужності. Зниження споживання реактивної потужності на 1341 квар (з 1787 квар до 446 квар) суттєво розвантажує живлячі трансформатори та кабельні лінії 6 кВ, зменшуючи втрати в мережі підприємства та виключаючи необхідність встановлення додаткових компенсувальних пристроїв на даному приєднанні.

Крім прямих енергетичних переваг, впровадження ЧРП забезпечує ряд критично важливих технологічних ефектів: виключаються гідравлічні удари під час пуску та синхронного перемикання, зменшується інтенсивність гідроабразивного зносу проточної частини та запірної арматури, що в цілому підвищує надійність та подовжує міжремонтний цикл експлуатації ПНС-1.

Основні кількісні результати дослідження зведено в таблицю 2.4.

Таблиця 2.4 – Порівняння енергетичних показників землесоса №2

| Показник  | Нерегульований режим (дросьель) | Регульований режим (пч) | Зміна   |
|---|---------------------------------|-------------------------|---------|
| Продуктивність Q, м <sup>3</sup> /год             | 10000                           | 10000                   | –       |
| Напір насоса H, м                                 | 70                              | 45                      | –25     |
| ККД насоса $\eta_n$                               | 0,84                            | 0,86                    | +2,4 %  |
| Потужність на валу N <sub>в</sub> , кВт           | 3179                            | 1997                    | –1182   |
| Коефіцієнт потужності cos $\phi$                  | 0,88                            | 0,98                    | +11,4 % |
| Споживана активна потужність P <sub>1</sub> , кВт | 3311                            | 2189                    | –1122   |
| Річне електроспоживання, млн кВт·год              | 29                              | 19,17                   | –9,83   |

Окрім прямої економії електроенергії, досягається низка супутніх позитивних ефектів: усуваються гідравлічні удари під час пуску, зменшується знос проточної частини й арматури, підвищується загальна надійність технологічного процесу.

Діаграма порівняння енергетичних показників землесоса №2 представлена на рисунку 2.9.

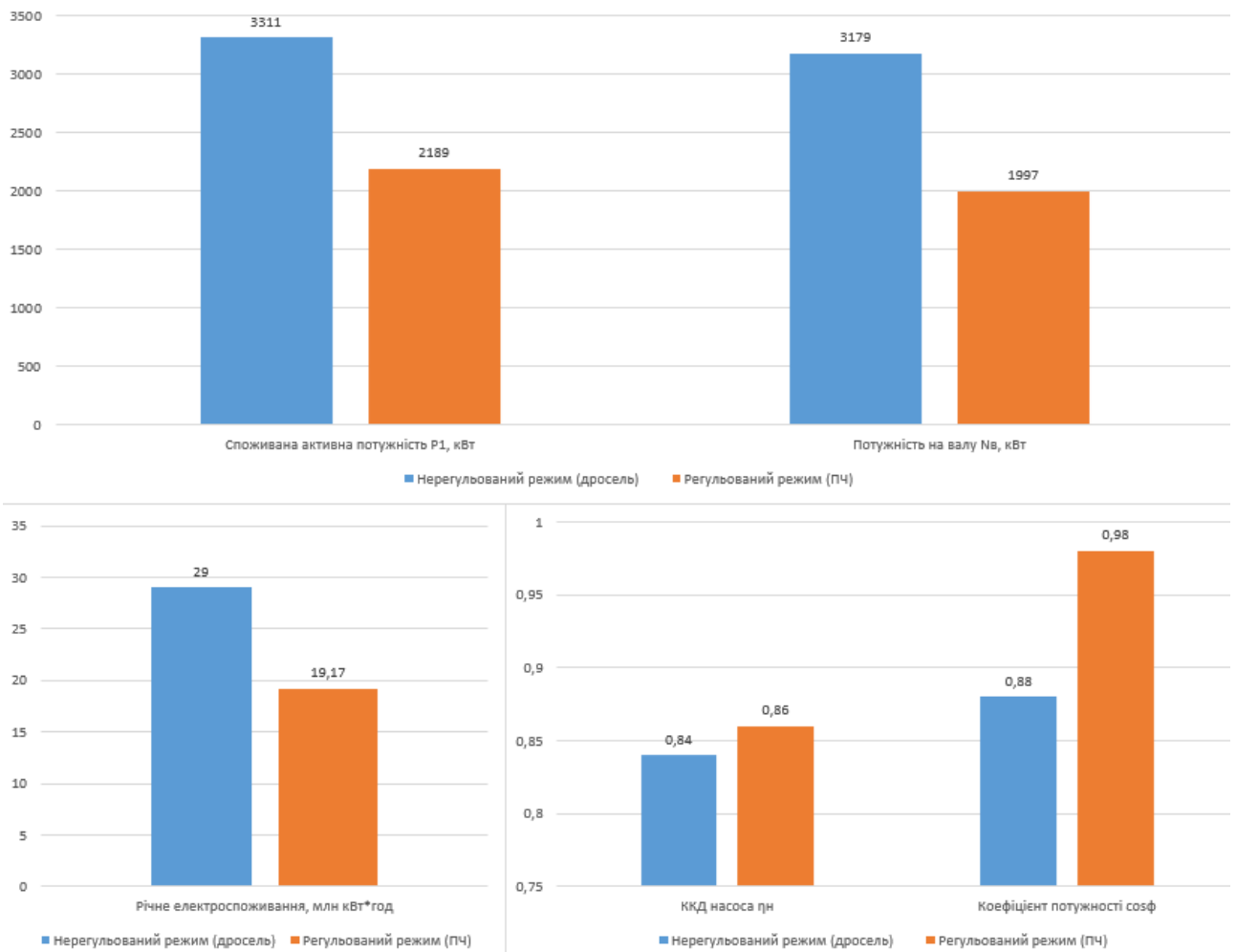


Рисунок 2.9 – Діаграма порівняння енергетичних показників землесоса №2

Таким чином, застосування високовольтного перетворювача частоти ATV6000 для плавного регулювання швидкості обертання землесосів є технічно обґрунтованим і має високий потенціал енергозбереження, що становить 33,9 % від поточного рівня електроспоживання, або 1122 кВт активної потужності на один агрегат.

### 3. ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ЗАПРОПОНОВАНИХ ЗАХОДІВ

Метою цього розділу є підтвердження техніко-економічної доцільності впровадження високовольтного перетворювача частоти (ПЧ) для електроприводу землесосів ПНС-1. Економічний ефект формується переважно за рахунок ліквідації втрат електроенергії на дроселювання, підвищення коефіцієнта потужності та зменшення витрат на обслуговування проточної частини насосів. Оскільки проектом передбачено встановлення одного ПЧ з можливістю почергового підключення до будь-якого з трьох агрегатів робочої групи, базовий розрахунок річної економії ведеться для одного землесоса, що працює у цілодобовому режимі.

#### 3.1 Визначення капітальних витрат на модернізацію

Капітальні інвестиції (*K*) охоплюють витрати на придбання основного технологічного обладнання, допоміжних комутаційних апаратів, кабельно-провідникової продукції, а також оплату будівельно-монтажних і пусконаладжувальних робіт.

Відповідно до даних, наданих енергетичною службою підприємства, вартість одного комплектного високовольтного перетворювача частоти ATV6000 (разом із силовим багатопульсним трансформатором, вихідним синус-фільтром та шафою керування) становить 11000 тис. грн. Окрім самого ПЧ, для забезпечення безударного перемикавання агрегатів та інтеграції в існуючу схему електропостачання необхідна закупівля додаткового коміркового обладнання 6 кВ, оновлення системи автоматизації (датчики вібрації, температури, модулі віддаленого вводу-виводу) та прокладання спеціалізованих екранованих кабелів.

Орієнтовний кошторис капітальних витрат наведено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Структура капітальних інвестицій на модернізацію електроприводу

| № з/п            | Найменування витрат  | Од. вим. | К-сть | Вартість од., тис. грн |
|------------------|--|----------|-------|------------------------|
| 1                | Високовольтний ПЧ ATV6000 (з трансформатором та фільтрами)       | шт.      | 1     | 11000                  |
| 2                | Додаткові комірочки РП-6 кВ (елегазові контактори, роз'єднувачі) | компл.   | 1     | 2400                   |
| 3                | Система автоматизації та КВПіА (контролери, датчики, шафи)       | компл.   | 1     | 1350                   |
| 4                | Кабельна продукція 6 кВ та монтажні матеріали                    | компл.   | 1     | 950                    |
| 5                | Будівельно-монтажні роботи                                       | -        | -     | 1400                   |
| 6                | Пусконаладжувальні роботи та програмування АСУ ТП                | -        | -     | 800                    |
| <b>Разом (K)</b> |  |          |       | 17900                  |

Загальна сума капітальних інвестицій становить  $K=17900$  тис. грн.

Обладнання перетворювальної техніки належить до відповідної групи основних засобів, для якої податковим законодавством передбачено прямолінійний метод нарахування амортизації зі строком корисного використання 5 років (річна норма 20%). Річна сума амортизаційних відрахувань ( $A$ ), що формує податковий щит підприємства, становить:

$$A = 17900 * 0,20 = 3580 \text{ тис. грн.}$$

Структура капітальних інвестицій на модернізацію електроприводу зображена на рисунку 3.1.



Рисунок 3.1 – Структура капітальних інвестицій на модернізацію електроприводу

### 3.2 Розрахунок річної економії експлуатаційних витрат

Економічний ефект від впровадження високовольтного перетворювача частоти (ПЧ) формується з трьох основних складових: зниження витрат на активну електроенергію за рахунок ліквідації дроселювання та оптимізації робочої точки; зменшення плати за реактивну потужність завдяки активному випрямлячу ПЧ; а також скорочення експлуатаційних витрат на відновлення проточної частини землесосів внаслідок зниження гідроабразивного зносу. Розрахунки виконуються для одного насосного агрегату, оскільки проектом передбачено один ПЧ на три землесоси з почерговим підключенням.

### 3.2.1 Економія активної електричної енергії

Базовим показником для фінансового аналізу є зниження споживання активної потужності. Згідно з результатами математичного моделювання (підрозділ 2.3), перехід від дросельного регулювання до частотного керування забезпечує економію активної потужності на рівні  $\Delta P = 1122$  кВт на один землесос.

Для визначення річного фонду робочого часу ( $T_p$ ) враховується специфіка роботи хвостового господарства. Хоча календарний фонд часу становить 8760 годин, фактичний час роботи одного агрегату зменшується через планово-попереджувальні ремонти (ППР), технологічні перемикання на резервні карти хвостосховища та простої. Приймаємо коефіцієнт використання у часі  $k_v = 0,91$ , що дає фактичний річний фонд роботи:

$$T_p = 8760 * 0,91 \approx 8000 \text{ год.}$$

Річна економія електроенергії ( $\Delta W_a$ ) становить:

$$\Delta W_a = \Delta P * T_p, \quad (3.1)$$

$$\Delta W_a = 1122 * 8000 = 8976000 \text{ кВт} \cdot \text{год} \approx 8,98 \text{ млн кВт} \cdot \text{год.}$$

Станом на 2026 рік для промислових споживачів, підключених до мереж 6 кВ (другий клас напруги), усереднений тариф на електричну енергію з урахуванням плати за передачу, розподіл та податку на додану вартість (ПДВ) становить  $C_a = 7,80$  грн (кВт·год). Фінансова економія на активній електроенергії ( $E_a$ ) за рік:

$$E_a = \Delta W_a * C_a, \quad (3.2)$$

$$E_a = 8,98 * 7,80 = 70,04 \text{ млн грн.}$$

### 3.2.2 Економія на оплату реактивної електроенергії

Відповідно до чинної методики розрахунків за реактивну енергію, підприємства сплачують за її перетоки, якщо фактичний коефіцієнт потужності ( $\cos\phi$ ) відрізняється від нормативного значення, або застосовуються відповідні коефіцієнти до тарифу. В існуючому режимі (нерегульований асинхронний двигун під навантаженням) споживання реактивної потужності становило  $Q_{існ} = 1787$  квар. Впровадження ПЧ з активним фронт-ендом (AFE) та багатопульсним випрямлячем забезпечує підтримання вхідного  $\cos\phi \approx 0,98$ , що знижує споживання реактивної потужності з мережі до  $Q_{per} = 446$  квар (підрозділ 2.3.3).

Різниця реактивної потужності, що компенсується:

$$\Delta Q = Q_{icн} - Q_{рег}, \quad (3.3)$$

$$\Delta Q = 1787 - 446 = 1341 \text{ квар.}$$

Річна економія реактивної енергії ( $\Delta W_r$ ):

$$\Delta W_r = \Delta Q * T_p, \quad (3.4)$$

$$\Delta W_r = 1341 * 8000 = 10728000 \text{ квар} \cdot \text{год} \approx 10,73 \text{ млн квар} \cdot \text{год.}$$

Еквівалентна вартість реактивної енергії (або уникнені штрафні санкції за низький  $\cos\phi$ ) для підприємств ГЗК приймається на рівні  $C_r = 1,45$  грн/(квар·год).

Річна економія ( $E_r$ ):

$$E_r = \Delta W_r \cdot C_r = 10,73 * 1,45 = 15,56 \text{ млн грн.} =$$

### 3.2.3 Економія на поточному ремонті та експлуатації (ЗІП)

Гідротранспорт високоабразивних пульп спричиняє інтенсивний гідроабразивний знос проточної частини землесосів (робочого колеса, переднього та заднього захисних дисків, корпусу). Швидкість зносу пропорційна кубу швидкості потоку. В існуючому режимі насос постійно працює на номінальній частоті обертання (1491 об/хв), а надлишковий напір гаситься на засувці, що створює локальні зони кавітації та підвищеної турбулентності, прискорюючи руйнування бронедеталей. Середній міжремонтний інтервал за таких умов становить близько 4–5 місяців, тобто 2–2,5 заміни комплекту ЗІП на рік.

Застосування ПЧ дозволяє знизити робочу частоту обертання до 1267 об/хв (підрозділ 2.3.1) та усунути кавітаційні явища на засувці, оскільки регулювання відбувається виключно зміною характеристики насоса. Це подовжує міжремонтний інтервал до 8–9 місяців (1,3 заміни на рік).

Вартість одного комплекту ЗІП (лиття з високохромистого чавуну типу ИЧХ28Н2 або аналогів GIW Huperchrome) для землесоса класу 3500 кВт становить приблизно  $C_{зіп} = 1,8$  млн грн. Вартість робіт з розбирання, заміни та балансування, а також непрямі збитки від простою технологічної лінії оцінюються в  $C_{рем} = 0,4$  млн грн за один ремонт. Загальна вартість одного ремонтного циклу:  $C_{цикл} = 2,2$  млн грн.

Витрати на ремонти до модернізації (2,5 цикли на рік):

$$B_{рем1} = 2,5 * 2,2 = 5,50 \text{ млн грн.}$$

Витрати на ремонти після модернізації (1,3 цикли на рік):

$$B_{\text{рем}2} = 1,3 * 2,2 = 2,86 \text{ млн грн.}$$

Річна економія на ремонтах та ЗІП ( $E_{\text{рем}}$ ):

$$E_{\text{рем}} = B_{\text{рем}1} - B_{\text{рем}2}, \quad (3.5)$$

$$E_{\text{рем}} = 5,50 - 2,86 = 2,64 \text{ млн грн.}$$

### 3.2.4 Сумарна річна економія

Загальна річна економія експлуатаційних витрат ( $\Delta E$ ) від впровадження одного ПЧ з почерговим підключенням землесосів становить суму трьох складових:

$$\Delta E = E_a + E_r + E_{\text{рем}}, \quad (3.6)$$

$$\Delta E = 70,04 + 15,56 + 2,64 = 88,24 \text{ млн грн.}$$

Отримане значення  $\Delta E = 88,24$  млн грн є базовим фінансовим показником для подальшого розрахунку дисконтованих термінів окупності капітальних інвестицій.

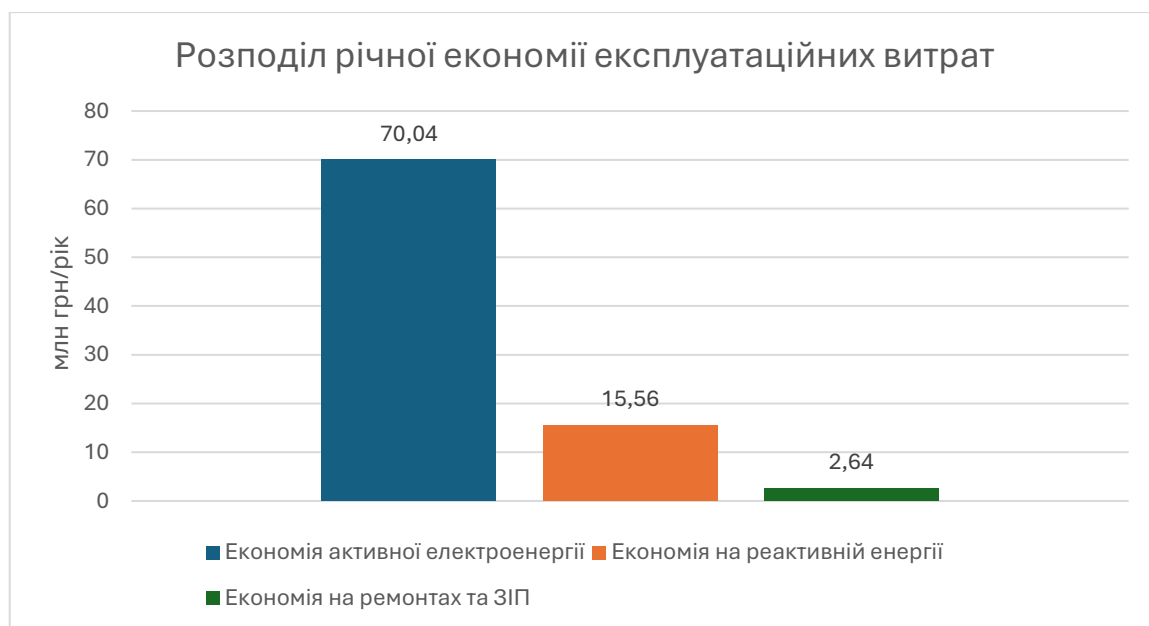



Рисунок 3.2 – Розподіл річної економії експлуатаційних витрат за джерелами формування

### 3.3 Визначення показників економічної ефективності проєкту

Для об'єктивної оцінки доцільності інвестицій у модернізацію електроприводу ПНС-1 застосовуються динамічні (дисконтовані) методи, які враховують фактор часу, інфляційні очікування та альтернативну



вартість капіталу. Розрахунок базується на таких вихідних даних, сформованих у попередніх підрозділах:

- капітальні інвестиції (K): 17,90 млн грн.;
- загальна річна економія експлуатаційних витрат ( $\Delta E$ ): 88,24 млн грн.;
- норма дисконту (E): 15% (0,15). Ця ставка відображає середньозважену вартість капіталу підприємства з урахуванням премії за ризик реалізації інвестиційних проектів у гірничо-металургійній галузі;
- горизонт розрахунку (T): 5 років (базовий період оцінки для високотехнологічного електротехнічного обладнання до його планової капітальної модернізації);
- ставка податку на прибуток підприємств: 18%;
- річна сума амортизаційних відрахувань (A): 3,58 млн грн (прямолінійний метод, строк корисного використання 5 років).

### 3.3.1 Розрахунок чистого грошового потоку (Cash Flow)

Згідно з податковим законодавством України, економія на експлуатаційних витратах збільшує оподатковуваний прибуток підприємства. Водночас нарахування амортизації формує «податковий щит», який зменшує базу оподаткування.

Оподатковуваний приріст прибутку від впровадження заходів ( $\Delta P$ ):

$$\Delta P = \Delta E - A, \quad (3.7)$$

$$\Delta P = 88,24 - 3,58 = 84,66 \text{ млн грн.}$$

Податок на прибуток ( $P_{\text{под}}$ ):  $P_{\text{под}} = \Delta P * 0,18 = 84,66 * 0,18 = 15,24$  млн грн.

Чистий приріст прибутку після оподаткування ( $\Delta P_{\text{чист}}$ ):

$$\Delta P_{\text{чист}} = 84,66 - 15,24 = 69,42 \text{ млн грн.}$$

Оскільки амортизація є безготівковою статтею витрат, яка фактично залишається в обігу підприємства, реальний чистий грошовий потік (CF) за рік розраховується як сума чистого прибутку та амортизаційних відрахувань:

$$CF = \Delta P_{\text{чист}} + A, \quad (3.8)$$

$$CF = 69,42 + 3,58 = 73,00 \text{ млн грн.}$$

Отже, щорічний чистий грошовий потік, що генерується проектом, становить 73,00 млн грн.

### 3.3.2 Розрахунок строків окупності (PP та DPP)

Простий строк окупності (PP) визначається як відношення початкових інвестицій до річного грошового потоку без урахування фактора часу:

$$PP = K/CF, \quad (3.9)$$

$$PP = 17,90/73 \approx 0,245 \text{ року } (\approx 2,9 \text{ місяця}).$$

Для отримання об'єктивної картини необхідно привести майбутні грошові потоки до їхньої поточної вартості. Коефіцієнт дисконтування для  $t$ -го року розраховується за формулою:

$$\alpha_t = \frac{1}{(1+E)^t}, \quad (3.10)$$

де  $E$  - норма дисконту (0,15);

$t$  - номер року розрахунку.

Результати покрокового дисконтування та формування накопиченого грошового потоку зведено в таблицю 3.2.

Таблиця 3.2 – Розрахунок дисконтованих показників ефективності проекту

| Показник                                 | Рік 0  | Рік 1  | Рік 2   | Рік 3   | Рік 4   | Рік 5   |
|--|--------|--------|---------|---------|---------|---------|
| Капітальні інвестиції (K), млн грн       | -17,90 | -      | -       | -       | -       | -       |
| Чистий грошовий потік (CF), млн грн      | -      | 73     | 73      | 73      | 73      | 73      |
| Коефіцієнт дисконтування ( $\alpha_t$ )  | 1      | 0,8696 | 0,7561  | 0,6575  | 0,5718  | 0,4972  |
| Дисконтований потік (DCF), млн грн       | -17,9  | 63,48  | 55,2    | 48      | 41,74   | 36,30   |
| Накопичений дисконтований потік, млн грн | -17,9  | +45,58 | +100,78 | +148,78 | +190,52 | +226,82 |

Дисконтований строк окупності (DPP) визначається за моментом переходу накопиченого потоку з від'ємного значення в додатне. Як видно з таблиці 3.2, це відбувається вже протягом першого року експлуатації. Точний розрахунок:

$$DPP = 17,9/63,48 \approx 0,28 \text{ року } (\approx 3,4 \text{ місяця.})$$

Надшвидка окупність (менше 4 місяців) обумовлена значним розривом між помірною вартістю одного ПЧ з інфраструктурою (17,9 млн грн) та масштабним фінансовим ефектом від економії електроенергії на агрегаті потужністю 3,5 МВт.

Результати розрахунку основних показників економічної ефективності інвестиційного проекту свідчать про його високу окупність та фінансову спроможність. Для наочного відображення повернення вкладених коштів та оцінки фінансових ризиків було побудовано графік фінансового профілю проекту. Динаміка накопиченого дисконтованого грошового потоку (NPV) за роками розрахункового періоду, а також визначений графічним методом термін окупності інвестицій представлені на рисунку 3.3.



Рисунок 3.3 – Динаміка накопиченого дисконтованого грошового потоку та термін окупності інвестицій

### 3.3.3 Розрахунок чистого дисконтованого доходу (NPV)


Чистий дисконтований дохід (NPV) є головним критерієм абсолютної ефективності інвестицій. Він розраховується як сума всіх дисконтованих грошових потоків за мінусом початкових інвестицій (що відповідає фінальному значенню накопиченого потоку в таблиці 3.2):

$$NPV = \sum_{t=1}^5 DCF_t - K, \quad (3.11)$$

$$NPV = 244,72 - 17,9 = 226,82 \text{ млн грн.}$$

Оскільки  $NPV \gg 0$ , проект є економічно вигідним. За п'ять років експлуатації один встановлений перетворювач частоти згенерує для підприємства понад 226 млн грн чистої доданої вартості (з урахуванням інфляції та вартості капіталу).

Проведений техніко-економічний аналіз підтвердив високу доцільність впровадження високовольтного ПЧ ATV6000 для



електроприводу землесосів ПНС-1. Капітальні інвестиції в розмірі 17,9 млн грн забезпечують сукупну річну економію експлуатаційних витрат на рівні 88,24 млн грн (за рахунок економії активної та реактивної електроенергії, а також подовження міжремонтного інтервалу проточної частини насосів). З урахуванням податкового навантаження та амортизації, чистий щорічний грошовий потік становить 73 млн грн. Проект характеризується надвисокою інвестиційною привабливістю: дисконтований строк окупності складає лише 3,4 місяця, чистий дисконтований дохід (NPV) за 5 років сягає 226,82 млн грн. Отримані результати доводять, що запропонована модернізація є не лише технічно обґрунтованою, але й критично необхідною для підвищення конкурентоспроможності підприємства.

## 4 БЕЗПЕКА ПРАЦІ У ПРЕДМЕТНІЙ ОБЛАСТІ

Пульпонасосна станція ПНС-1 цеху технічної води та шламового господарства ПрАТ «ПІВНГЗК» належить до об'єктів підвищеної небезпеки, де одночасно діють фактори електричного, механічного, гідравлічного, абразивного та хімічного впливу. Експлуатація високонапірних землесосів типу GIW 24×26 LHD-49 із приводними асинхронними двигунами потужністю 3500 кВт, номінальною напругою 6 кВ, у поєднанні з транспортуванням високоабразивної пульпи (густина 1,4–1,5 т/м<sup>3</sup>, масова частка твердого 35–45 %, крупність частинок до 3 мм) формує комплекс виробничих ризиків, що вимагають системного підходу до забезпечення безпеки праці. Організація робочих місць, вибір засобів захисту та порядок виконання операцій регламентуються вимогами чинного законодавства України: НПАОП 01.41-1.11-10 «Правила безпечної експлуатації насосних станцій водогосподарських систем» [30], Правил безпечної експлуатації електроустановок споживачів (ПБЕЕС), ДБН В.2.4-5:2012 [6], а також локальними інструкціями підприємства.


### 4.1 Аналіз небезпечних і шкідливих виробничих факторів

Основні групи небезпечних факторів на ПНС-1 класифіковано за джерелами їх виникнення та характером впливу на персонал.

Електричні фактори. Висока напруга живлення (6 кВ) та значні номінальні струми двигунів (391 А) створюють ризик ураження електричним струмом при обслуговуванні комірних вимикачів, кабельних трас, двигунів та перетворювача частоти. У нерегульованому режимі прямі пуски двигунів супроводжуються кидками пускового струму, що в 5–7 разів перевищують номінальне значення, та просіданням напруги на шинах розподільного пристрою. Це не лише погіршує якість електроенергії, а й підвищує ймовірність помилкових спрацьовувань захистів, що може призвести до непередбачених зупинок обладнання. Додатковим ризиком є можливість появи напруги на корпусах обладнання при пошкодженні ізоляції або порушенні контуру заземлення.

Механічні та гідравлічні фактори. Обертання робочих коліс землесосів із частотою 1491 об/хв, тиск у напірних пульпопроводах (до 0,6–0,8 МПа на магістральних ділянках), ризик гідравлічних ударів при раптовому пуску, зупинці або перемиканні режимів живлення формують механічну складову ризику. Абразивний знос проточної частини насосів та внутрішньої поверхні труб призводить до зміни геометрії каналів, утворення задирок, підвищення вібрації та ймовірності розгерметизації з'єднань. Вібрація, що передається на фундаменти та будівельні конструкції, може спричинити поступове руйнування опорних елементів та пошкодження приєднаних комунікацій.

Хімічні, ергономічні та мікрокліматичні фактори. Пульпа, що транспортується, має лужне середовище (рН 7–12), що зумовлює корозійну дію на металеві поверхні та вимагає застосування стійких



матеріалів і засобів індивідуального захисту при обслуговуванні. Запиленість повітря в приміщенні ПНС при витоках пульпи або під час ремонтних робіт створює додаткове навантаження на органи дихання. Рівень шуму від працюючих насосних агрегатів може досягати 85–95 дБА, що перевищує допустимі значення для тривалого перебування персоналу без засобів захисту слуху. Температурний режим у приміщенні залежить від сезону та системи вентиляції, однак локальне нагрівання електродвигунів та перетворювача частоти може створювати зони підвищеної температури.

Термічні та пожежні фактори. Нагрівання обмоток статора двигуна, силових елементів перетворювача частоти, контактних з'єднань при тривалій роботі або перевантаженні створює ризик теплового пошкодження ізоляції та можливого загоряння. Наявність кабельних трас великої протяжності, мастильних матеріалів у редукторах та підшипникових вузлах підвищує пожежне навантаження об'єкта.

Гідроабразивний знос прискорює вихід з ладу торцевих ущільнень, сальникових набивок та запірної арматури, що збільшує ймовірність аварійних витоків пульпи. Робота на неоптимальних режимах (глибоке дроселювання засувками) посилює вібрацію, шум та локальний перегрів, що негативно впливає як на технічний стан обладнання, так і на умови праці операторів.

#### **4.2 Заходи безпеки в існуючій системі та їх недоліки**


До проведення модернізації система забезпечення безпеки праці на ПНС-1 формувалася відповідно до вимог нормативних документів та включала технічні, організаційні та індивідуальні заходи.

Технічні заходи передбачали: заземлення корпусів електрообладнання та металевих конструкцій з опором не більше 4 Ом; встановлення мікропроцесорних терміналів захисту REM615 (для двигунів) та REF615 (для фідерів), що реалізують струмову відсічку, захист від перевантаження, захист від однофазних замикань на землю; блокування пуску насоса при низькому рівні пульпи в зумпфі; встановлення запірної арматури з електроприводом для дистанційного перекриття потоку.

Організаційні заходи включали: проведення цільових інструктажів перед початком робіт; оформлення нарядів-допусків на роботи в електроустановках напругою вище 1000 В; періодичні випробування засобів захисту (діелектричні килимки, рукавиці, інструмент); графік планово-попереджувальних ремонтів обладнання.

Засоби індивідуального захисту для персоналу ПНС-1 включали: діелектричні рукавиці та калоші, захисні окуляри, каски, спецодяг із водовідштовхувальною просочкою, респіратори при роботах із пилоутворенням.

Однак існуюча система мала низку суттєвих недоліків. Прямі пуски потужних двигунів створювали значні динамічні навантаження на



механічну частину насосів та пульпопровід, що прискорювало знос ущільнень та з'єднань. Гідравлічні удари при пуску та зупинці підвищували ризик розгерметизації трубопроводу. Дросельне регулювання продуктивності вимагало частих операцій із засувками, розташованими в зонах високого тиску, що збільшувало ймовірність травматизму при обслуговуванні. Низький коефіцієнт потужності ( $\cos \varphi \approx 0,88$ ) зумовлював підвищене споживання реактивної енергії та додаткове навантаження на кабельні лінії, що косвенно впливало на надійність електропостачання систем безпеки.

#### **4.3 Підвищення рівня безпеки праці завдяки впровадженню частотно-регульованого електроприводу**

Модернізація системи електроприводу з встановленням високовольтного ПЧ ATV6000C445A6060DC5 суттєво знижує ризики. Плавний частотний пуск і регулювання обертів (діапазон 29,7–50 Гц) усувають кидки струму, гідравлічні удари та механічні перевантаження, що прямо впливає на зниження аварійності.

Безударне синхронне перемикання між ПЧ та мережею 6 кВ (через елегазові контактори Rollarc R400D та байпасні комірки) забезпечує безперебійність без ризикованих операцій. Активний 24-пульсний випрямляч покращує якість електроенергії, зменшує гармоніки та нагрівання обладнання.

Автоматизована система керування на базі контролерів Schneider Electric M241 з інтеграцією датчиків вібрації (Metrix ST6917), температури обмоток і підшипників (RTD PT100) дозволяє здійснювати моніторинг у реальному часі, прогнозувати відмови та попереджувати персонал про вихід параметрів за межі. Це відповідає сучасним підходам до predictive maintenance та знижує необхідність входу в небезпечні зони під час роботи обладнання.

Зниження робочої частоти обертання (наприклад, до 42,5 Гц при типовому режимі) зменшує рівень шуму та вібрації, інтенсивність абразивного зносу (пропорційно кубу швидкості), що подовжує міжремонтний період і зменшує кількість небезпечних ремонтних робіт.

#### **4.4 Організаційно-технічні заходи безпеки**

Для забезпечення безпеки на модернізованій ПНС-1 передбачено:

- навчання та атестацію персоналу з питань охорони праці та пожежної безпеки відповідно до НПАОП;
- застосування засобів колективного захисту (огородження, блокування, сигналізація);
- використання СИЗ (діелектричні засоби, спецодяг, респіратори при обслуговуванні пульпопроводів);
- періодичні випробування електроустаткування, перевірку заземлення та опору ізоляції;

- організацію робочих місць з урахуванням ергономіки та природного/штучного освітлення;
- план локалізації та ліквідації аварійних ситуацій (витоки пульпи, відмова ПЧ).

Реалізація запропонованих заходів у рамках модернізації дозволяє суттєво знизити рівень професійного ризику, зменшити ймовірність травматизму та професійних захворювань, підвищити загальну культуру безпеки на об'єкті.

Впровадження частотно-регульованого електроприводу не лише підвищує енергоефективність, але й є ключовим інженерним рішенням з охорони праці, що відповідає принципам превентивної безпеки та сучасним європейським і національним стандартам.


#### **4.5 Особливості забезпечення електробезпеки при експлуатації високовольтного обладнання**

Експлуатація електроустановок напругою 6 кВ на ПНС-1 вимагає дотримання вимог Правил безпечної експлуатації електроустановок споживачів (ПБЕЕС) та НПАОП 40.1-1.21-98 [33]. Висока номінальна напруга, значні робочі струми (до 391 А) та наявність перетворювача частоти формують специфічні ризики, що потребують додаткових технічних та організаційних заходів.

Захист від прямого дотику до струмопровідних частин. Усі струмопровідні елементи розподільного пристрою 6 кВ, вихідні шини ПЧ, кабельні наконечники мають надійну ізоляцію та огороження. Камери КСО-393 у модульному боксі оснащені механічними блокуваннями, що унеможливають відкривання дверей при наявності напруги. Елегазові контактори Rollarc R400D мають ізоляційні кожухи, а доступ до силових клем передбачає зняття напруги та встановлення переносних заземлень.

Захист від появи напруги на корпусах. Заземлення виконано за схемою з глухозаземленою нейтраллю. Опір загального заземлювального контуру ПНС-1 не перевищує 4 Ом, що підтверджено протоколами вимірювань. Корпуси двигунів, ПЧ, шаф керування з'єднані магістраллю заземлення перетином не менше 50 мм<sup>2</sup> (мідь). Для захисту від напруги кроку та дотику в зонах можливого замикання на землю передбачено вирівнювання потенціалів через металеві сітки в підлозі приміщення.

Специфіка роботи з перетворювачем частоти. Вихідна напруга ПЧ ATV6000 має високочастотну складову (ШІМ-модуляція), що створює додаткові вимоги до ізоляції кабелів. Застосовано екрановані кабелі марки АПвЕгПнг з перетином 2×(3×120+1×25) мм<sup>2</sup>, де екран заземлено з обох боків для зменшення електромагнітних перешкод. При обслуговуванні ПЧ персонал повинен використовувати діелектричні засоби захисту (калоші, килимки, рукавиці), оскільки навіть після відключення входу на конденсаторах проміжної ланки може зберігатися небезпечний заряд протягом 5–10 хвилин. На шафі ПЧ встановлено попереджувальне табло «Не відкривати! Небезпечна напруга» та індикатор наявності заряду.



Організаційні заходи. Роботи в електроустановках 6 кВ виконуються за нарядами-допусками бригадою не менше двох осіб, з яких один має групу з електробезпеки не нижче III, а керівник робіт — не нижче IV. Перед початком операцій з комутації обов'язково перевіряється відсутність напруги вказівником високої напруги, встановлюються переносні заземлення, вивішуються плакати безпеки. Персонал, що обслуговує ПЧ, проходить спеціальне навчання з урахуванням особливостей високовольтних частотних перетворювачів.

#### **4.6 Заходи пожежної безпеки в приміщенні ПНС та модульному боксі ПЧ**

Приміщення пульпонасосної станції та модульний бокс перетворювача частоти належать до категорії В4 за пожежною небезпекою (наявність горючих матеріалів: ізоляція кабелів, мастильні матеріали, елементи електроніки). Проектом передбачено комплекс заходів відповідно до ДБН В.1.2-2:2006 та НПАОП 01.41-1.32-01 [31,32].

Профілактика займання електрообладнання. Основним джерелом пожежної небезпеки є перегрів силових елементів. ПЧ ATV6000 оснащений системою примусового повітряного охолодження з фільтрами та датчиками температури радіаторів. При перевищенні порогу +85 °С автоматика формує попереджувальний сигнал, а при +90 °С — аварійне відключення. Кабельні траси прокладено в негорючих лотках, відстань між силовими та контрольними кабелями — не менше 300 мм для виключення теплового впливу.

Система автоматичного пожежогасіння. У модульному боксі ПЧ встановлено модульну установку газового пожежогасіння на основі фреону-125 або азоту, що не пошкоджує електронні компоненти. Датчики диму та температури підключено до загальної системи пожежної сигналізації ПНС-1. У приміщенні насосного залу передбачено порошкові вогнегасники типу ВП-6 та ВП-10, розміщені на відстані не більше 20 м один від одного.

Евакуація та оповіщення. План евакуації затверджено наказом по підприємству. Виходи з приміщення ПНС обладнано світловими табло «Вихід» з автономним живленням. Система оповіщення про пожежу інтегрована з диспетчерським пультом цеху та передає сигнал на пост охорони. Персонал проходить щорічне тренування з дій у разі пожежі.

Особливості гасіння пожеж на електроустановках під напругою. Заборонено застосовувати воду або пінні вогнегасники для гасіння обладнання 6 кВ без попереднього знеструмлення. Першочерговою дією при виявленні ознак займання є відключення пошкодженого приєднання дистанційно з пульта або місцевим вимикачем. Лише після підтвердження відсутності напруги дозволяється приступати до гасіння.

#### **4.7 Безпека при обслуговуванні пульпопроводів та запірної арматури під тиском**

Робота з магістральними пульпопроводами довжиною понад 5000 м, що транспортують абразивну гідросуміш під тиском до 0,8 МПа, вимагає спеціальних заходів безпеки згідно з НПАОП 01.41-1.11-10 [30].

Запобігання розгерметизації. Основний ризик — раптовий прорив трубопроводу внаслідок гідроабразивного зносу або гідравлічного удару. Для контролю стану труб передбачено періодичний ультразвуковий замір товщини стінок у контрольних точках (кожні 100 м). При зменшенні товщини нижче розрахункового мінімуму ділянку підлягає заміні. Фланцеві з'єднання обладнано захисними екранами для відведення струменя пульпи у разі розриву прокладки.

Безпечне виконання ремонтних робіт. Перед розбиранням будь-якого елемента пульпопроводу обов'язково виконується повне скидання тиску через дренажні клапани та промивка ділянки водою для видалення залишків абразивної пульпи. Персонал використовує захисні щитки, водонепроникний спецодяг, рукавиці з покриттям, стійким до лужного середовища. Роботи на висоті (обслуговування засувкок на естакадах) виконуються з індивідуальних страхувальних поясів із кріпленням до стаціонарних точок.

Захист від шуму та вібрації. Рівень звукового тиску в приміщенні ПНС при роботі трьох агрегатів може досягати 92 дБА, що перевищує допустиме значення 80 дБА для тривалого перебування. Персонал забезпечено протиакустичними навушниками типу 3М PELTOR. Для зменшення вібрації, що передається на будівельні конструкції, насосні агрегати встановлено на віброізолюючих опорах, а гнучкі вставки з гумотканини передбачено на всмоктувальних та напірних патрубках.

## ВИСНОВКИ


У результаті виконання кваліфікаційної роботи на тему «Розробка заходів щодо підвищення ефективності функціонування пульпонасосної станції» було комплексно вирішено актуальне інженерне завдання щодо модернізації системи електропривода магістральних землесосів ПрАТ «ПІВНГЗК». На основі проведених теоретичних досліджень, математичного моделювання гідродинамічних процесів та техніко-економічних розрахунків сформульовано такі основні наукові та практичні результати:

Досліджено специфіку роботи пульпонасосної станції (ПНС-1), обладнаної агрегатами GIW 24\*26 LHD 49 з високовольтними асинхронними двигунами 3500 кВт (6 кВ). Встановлено, що транспортування високоабразивної гідросуміші (густиною до 1,5 т/м<sup>3</sup>) на відстань понад 5000 м в умовах змінного гідравлічного опору мережі за допомогою дросельного регулювання є критично неефективним. Надлишковий напір (близько 25 м) дисипує на клинових засувках, що призводить до марних втрат активної потужності, зниження ККД насоса до 0,84 та інтенсивного гідроабразивного зносу проточної частини і запірної арматури. Прямі пуски двигунів спричиняють кидки струму (5–7 Іном) та гідравлічні удари, що руйнують футерування трубопроводів та знижують надійність системи електропостачання.

Запропоновано перехід до лінійного ( $U/f = \text{const}$ ) або векторного закону керування з використанням високовольтного перетворювача частоти (ПЧ) серії ATV6000 з 24-пульсним активним випрямлячем. Визначено технологічно допустимий діапазон регулювання частоти обертання (29,7–50 Гц), який гарантує підтримання швидкості потоку пульпи вище критичної (за критерієм Дюрана, >3,2 м/с), унеможливаючи випадіння твердої фази в осад та забивання магістрального пульпопроводу.

Згідно з результатами моделювання робочих точок, для забезпечення середньостатистичної подачі  $Q = 10000 \text{ м}^3/\text{год}$  частота обертання знижується до 1267 об/хв (42,5 Гц). Це дозволяє повністю ліквідувати втрати на дроселюванні та повернути насос у зону оптимального ККД (0,86). Сумарне зниження споживаної з мережі активної потужності становить 1122 кВт (економія 33,9 % на один агрегат). Завдяки активному фронт-енду (AFE) ПЧ вхідний коефіцієнт потужності зростає з 0,88 до 0,98, що зменшує споживання реактивної потужності з 1787 квар до 446 квар, усуваючи потребу в додаткових компенсуючих пристроях та розвантажуючи цехові трансформаторні підстанції.

Розроблено схему безударного синхронного перемикання двигунів між ПЧ та мережею 6 кВ через елегазові контактори Rollarc R400D. Таке рішення забезпечує безперервність технологічного процесу гідротранспортування та повну селективність захистів, виключаючи



аварійні зупинки збагачувального виробництва у разі виведення ПЧ в плановий ремонт.


Розраховано, що сукупна річна економія експлуатаційних витрат (за рахунок енергозбереження, зниження плати за перетоки реактивної енергії та подовження міжремонтного інтервалу ЗІП) становить 88,24 млн грн. при капітальних інвестиціях 17,9 млн грн. Дисконтований строк окупності (DPP) проєкту складає лише 3,4 місяця, а чистий дисконтований дохід (NPV) за 5 років перевищує 226 млн грн, що підтверджує високу інвестиційну привабливість та доцільність впровадження розроблених заходів.

Впровадження системи предиктивної діагностики на базі контролерів Schneider M241 (вібраційний моніторинг, контроль температур) та плавного частотного пуску дозволило мінімізувати вплив небезпечних виробничих факторів. Усунення гідроударів та кавітації суттєво знижує ризик раптової розгерметизації пульпопроводів під тиском 0,8 МПа, що мінімізує ймовірність травматизму персоналу під час експлуатації об'єктів підвищеної небезпеки.

Розроблені у роботі інженерні рішення є технічно обґрунтованими, економічно високодохідними та такими, що відповідають сучасним вимогам енергетичного менеджменту (ДСТУ ISO 50001) та надійності електропостачання гірничо-металургійних підприємств. Запропонована модернізація дозволяє кардинально вирішити проблему енергоємності та зносу обладнання ПНС-1.

## ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Реконструкція хвостового господарства та оборотного водопостачання в районі с. Войково... : Висновок з оцінки впливу на довкілля / Департамент екології та природних ресурсів Дніпропетровської ОДА. Дніпро, 2021. 27 с.
2. Сокур М. І., Губін Г. В., Білецький В. С., Бабець Є. К. Аналіз енерговитрат у хвостових господарствах гірничо-збагачувальних комбінатів. Збагачення корисних копалин. 2018. Вип. 71(112). С. 85–93.
3. Медведєва О. О. Розвиток наукових основ ресурсозберігаючих технологій гідромеханізованої розробки техногенних родовищ : дис. ... д-ра техн. наук : 05.15.09. Дніпро, 2021. 396 с.
4. Кривошеєва Ю. М. Обґрунтування будівництва насосної станції для перекачування пульпи в нове хвостосховище на Вільногірському гірничометалургійному комбінаті : кваліф. робота магістра : 192. Дніпро, 2023. 94 с.
5. Младецький І. К., Пилов П. І., Тюрін Ю. І. Теоретичні основи збагачення корисних копалин : підручник. Дніпро : НГУ, 2015. 300 с.
6. ДБН В.2.4-5:2012. Хвостосховища і шламонакопичувачі. Частина І. Проектування. Частина ІІ. Будівництво. Київ : Мінрегіон України, 2012. 80 с.
7. Bertolo C., Giner C., Laciari G. Challenges of tailings transport pumping systems in negative static head applications. 11th International Conference on Tailings Management. 2025.
8. Varghese A., Martins S., Lessing E., Hassan G. M., Karrech A. A systematic review on the sustainability of slurry pumps in the mining industry. Minerals Engineering. 2025. Vol. 234. P. 109731.
9. Кириченко В. Ю., Смирнов О. В. Підвищення надійності та ефективності експлуатації потужних відцентрових ґрунтових насосів гірничо-збагачувальних комбінатів. Вісник Криворізького національного університету. 2022. Вип. 54. С. 45–51.
10. Попов С. О., Хоржевський Д. М. Моделювання процесів гідротранспорту висококонцентрованих залізородних пульп. Гірничий вісник. 2023. № 111. С. 89–94.
11. Константінов Ю. М., Гіжа О. О. Інженерна гідравліка : підручник. Київ : Видавничий Дім «Слово», 2011. 424 с.
12. Slurry Pumping Manual. Warman International Ltd., 2002. 68 p.
13. Warman® Slurry Pumping Handbook. 6th ed. Weir Minerals, 2021. 148 p.
14. Slurry pump handbook. Guidelines in slurry pumping. 10th ed. Metso, 2025. 187 p.
15. Вовк О. О., Луценко І. М. Енергоефективні режими роботи пульпонасосних станцій систем хвостового господарства ГЗК. Технічна електродинаміка. 2024. № 2. С. 73–79.



16. Кондратьев А. В. Зносостійкість елементів проточних частин шламових насосів при перекачуванні абразивних гідросумішей. Фізико-хімічна механіка матеріалів. 2021. Т. 57, № 4. С. 112–118.

17. Степанов М. В., Громов О. Б. Автоматизація технологічних комплексів магістрального гідротранспорту гірничих підприємств. Кривий Ріг : КНУ, 2022. 184 с.

18. Грунтові та шламові насоси в гірничій промисловості: проектування, експлуатація та енергозбереження : монографія / Л. М. Шевченко, В. П. Романов, К. Д. Баранов та ін. Дніпро : Журфонд, 2023. 240с.

19. Малащенко В. О., Чернов П. О. Дослідження динамічних навантажень у приводних механізмах потужних насосних агрегатів ПНС. Машинознавство. 2021. № 3. С. 34–40.

20. Гірничі машини та комплекси підземної і відкритої розробки родовищ : підручник / В. О. Федоров, С. І. Глушко, М. А. Ткачук та ін. Харків : НТУ «ХПІ», 2022. 412 с.

21. Ткаченко В. І. Оптимізація параметрів гідроприводу та систем регулювання продуктивності пульпових насосів. Промислова гідравліка і пневматика. 2023. Вип. 2(80). С. 15–22.

22. Жуков С. О., Пащенко О. В. Екологічна безпека хвостосховищ залізородних ГЗК та заходи щодо зниження пилоутворення. Екологічна безпека та природокористування. 2024. Вип. 45. С. 102–111.

23. Олійник А. П., Кравченко В. М. Надійність гідротехнічних споруд та насосних комплексів систем оборотного водопостачання ГЗК. Науковий вісник НТУУ «КПІ». 2022. № 5. С. 61–68.


24. Бондаренко В. І., Дмитрієв Р. О. Енергетичний менеджмент та аудит насосних станцій великої потужності на гірничо-металургійних підприємствах. Енергетика: економіка, технології, екологія. 2023. № 4. С. 48–56.

25. Tarodiya R., Gandhi J. Performance parameters and abrasive wear in slurry pumps: A comprehensive review. International Journal of Mining Science and Technology. 2023. Vol. 33, Issue 5. P. 589–604.

26. Wu B., Chang X., Li Y. Numerical simulation of solid-liquid two-phase flow and wear analysis in a centrifugal slurry pump. Journal of Fluids Engineering. 2024. Vol. 146, No. 3. P. 031201.

27. Kumar S., Safi M., Al-Ghamdi A. Energy efficiency optimization of industrial tailings pumping systems using variable speed drives. Energy Reports. 2025. Vol. 12. P. 1442–1453.

28. Методичні рекомендації до виконання та захисту кваліфікаційної роботи для здобувачів вищої освіти за першим (бакалаврським) рівнем спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка (ГЗ Електрична інженерія) освітньо-професійної програми «Інжиніринг електропостачання та електромеханічних систем у металургії та гірництві». Запоріжжя : ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», 2025. 40 с.



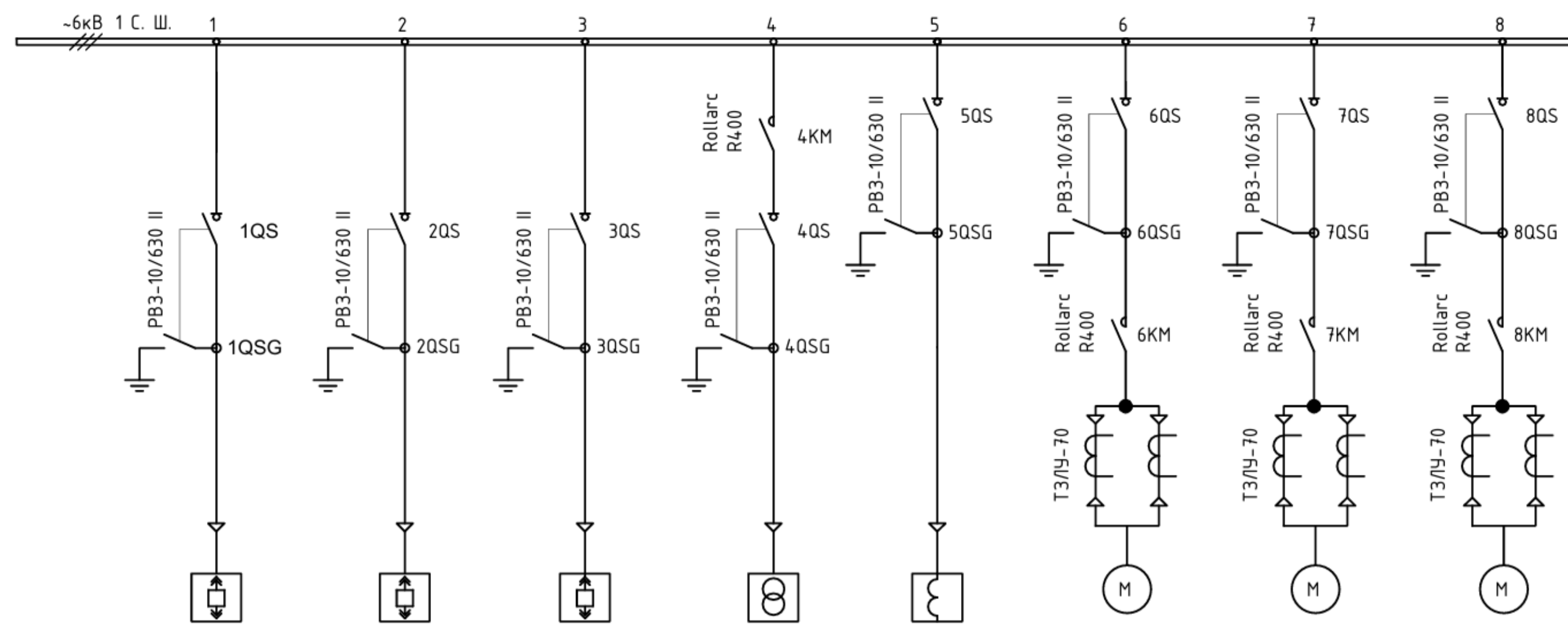
29. Додатки до методичних рекомендацій до виконання та захисту кваліфікаційної роботи для здобувачів вищої освіти за першим (бакалаврським) рівнем спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка. Запоріжжя : ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», 2025.

30. НПАОП 01.41-1.11-10. Правила охорони праці під час збирання, обробки і зберігання продукції рослинництва : затв. наказом Держгірпромнагляду України від 06.12.2010 № 245. Київ : Основа, 2010. 54с.

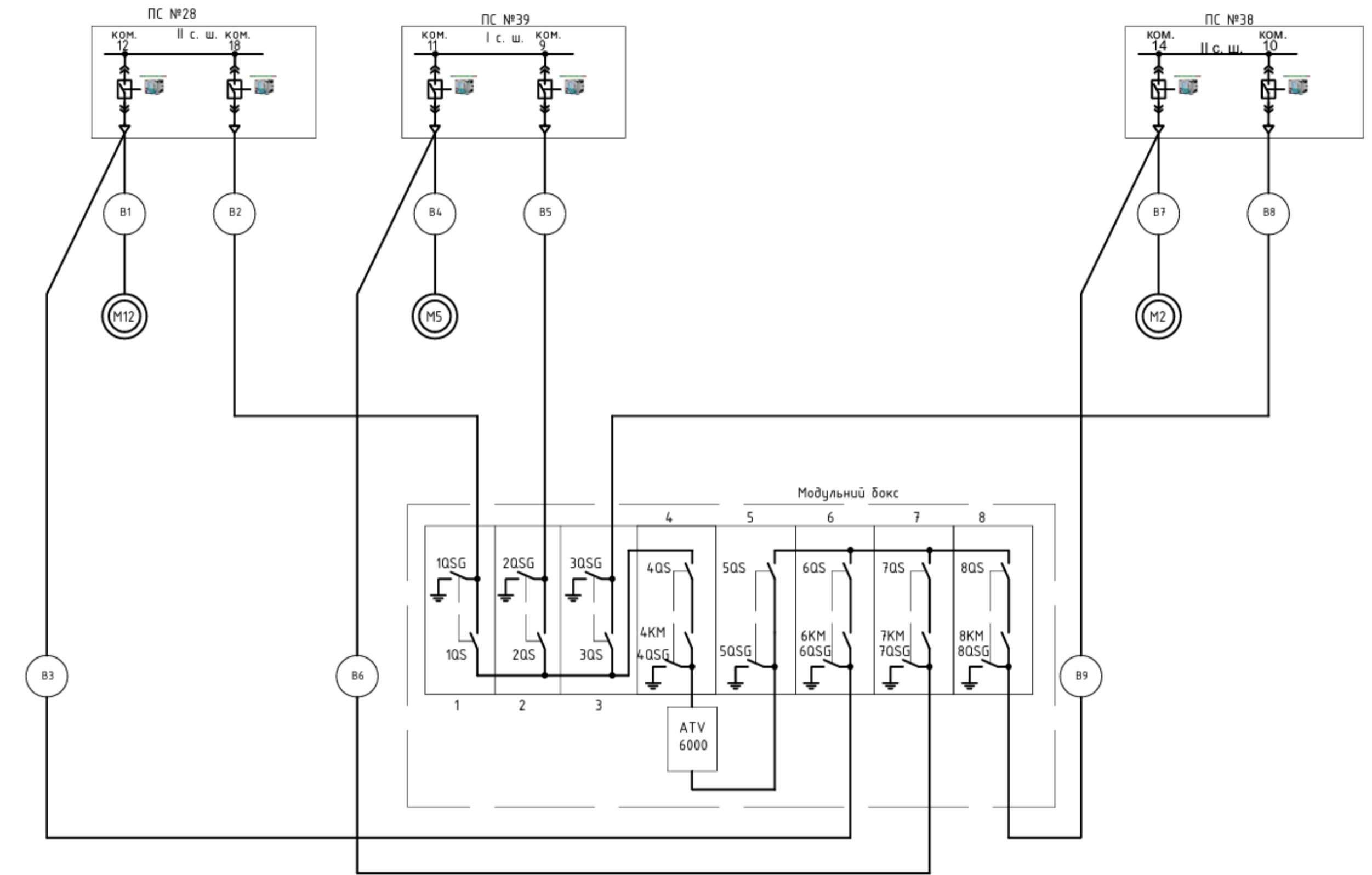
31. ДБН В.1.2-2:2006. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Навантаження і впливи. Норми проектування. Київ : ДП «Укрархбудінформ», 2006. 60 с.

32. НПАОП 01.41-1.32-01. Правила охорони праці під час виробництва солоду, пива та безалкогольних напоїв : затв. наказом Міністерства праці та соціальної політики України від 19.11.2001 № 470. Харків : Форт, 2001. 72 с.

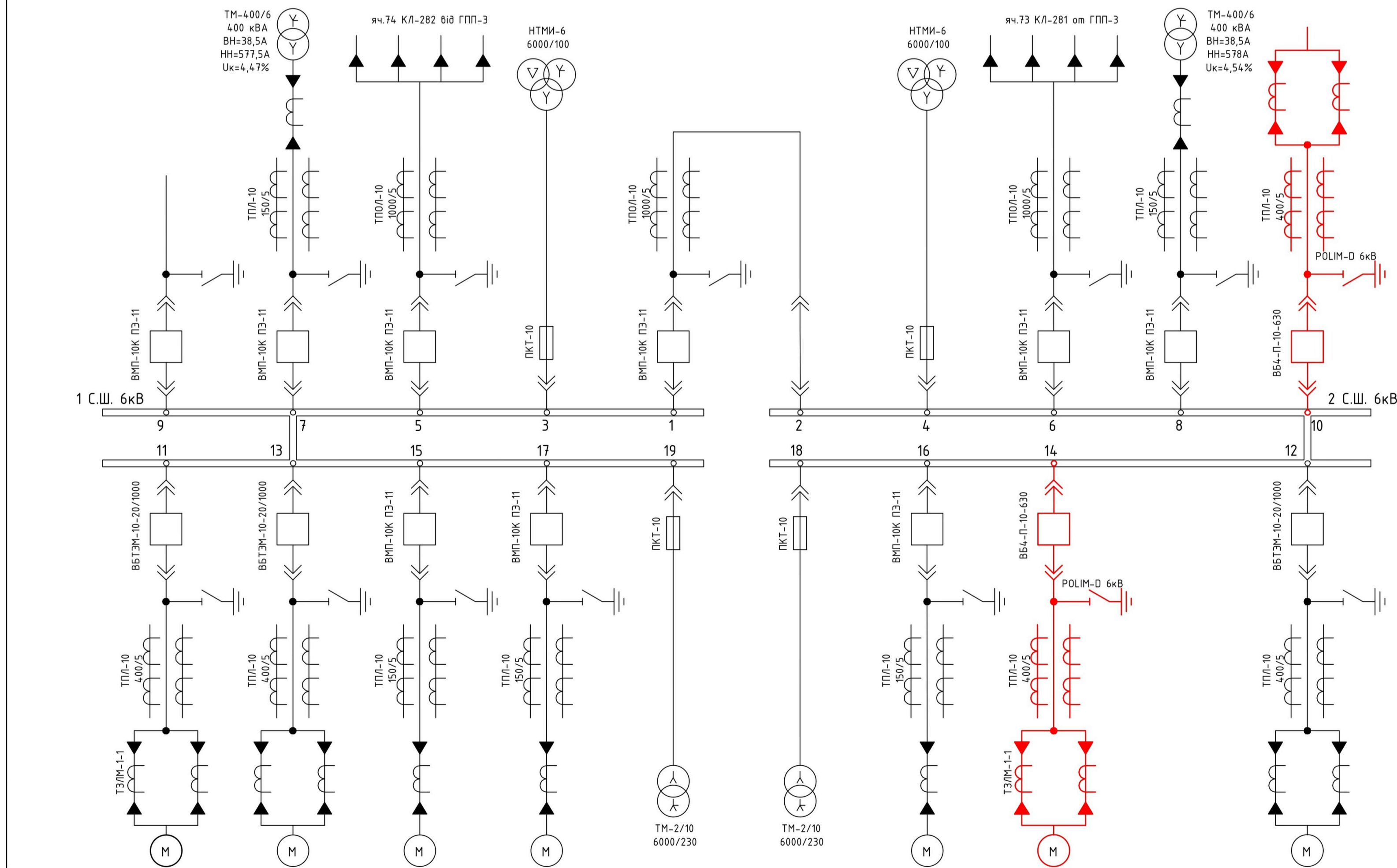
33. НПАОП 40.1-1.21-98. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів : затв. наказом Держнаглядохоронпраці від 09.01.1998 № 4. Київ : Основа, 1998. 384 с.



| №                             | 1                                | 2                                | 3                                | 4                                   | 5                                 | 6                                | 7                                | 8                                |
|-------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| Найменування лінії            | ПС-28. Комірка №18               | ПС-39. Комірка №9                | ПС-38. Комірка №10               | ПЧ АТВ6000 (комірка трансформатора) | ПЧ АТВ6000 (комірка реактора)     | ПС-28. Комірка №12               | ПС-39. Комірка №11               | ПС-38. Комірка №14               |
| Маркування та переріз кабелів | В2 2хАПВБелГне 3х120+1х25 10000В | В5 2хАПВБелГне 3х120+1х25 10000В | В8 2хАПВБелГне 3х120+1х25 10000В | В10 2хАПВБелГне 3х120+1х25 10000В   | В11 2хАПВБелГне 3х120+1х25 10000В | В3 2хАПВБелГне 3х120+1х25 10000В | В6 2хАПВБелГне 3х120+1х25 10000В | В9 2хАПВБелГне 3х120+1х25 10000В |
| Дані споживача                | ПЧ АТВ6000<br>ВВВЗ землесоса №12 | ПЧ АТВ6000<br>ВВВЗ землесоса №5  | ПЧ АТВ6000<br>ВВВЗ землесоса №2  | ВВВЗ ПЧ АТВ6000                     | Вихід ПЧ АТВ6000                  | Землесос №12<br>Живлення ВВ ПЧ   | Землесос №5<br>Живлення ВВ ПЧ    | Землесос №2<br>Живлення ВВ ПЧ    |



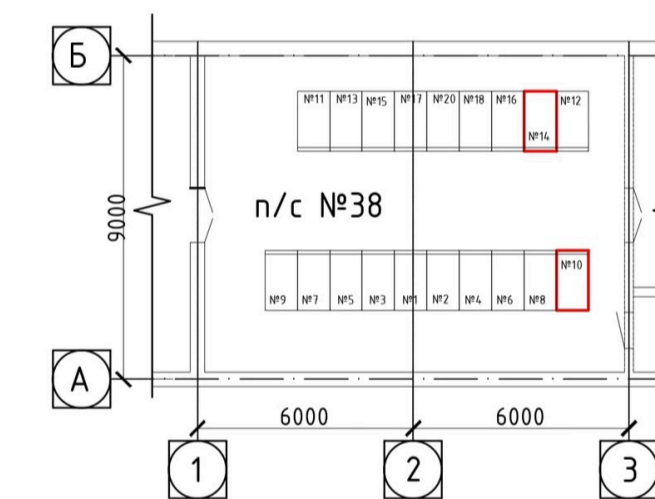
| Найменування лінії            | Резерв | ТП 38-1          | Ввод №1              | ТН-1   | СМВ | СШР | ТН-2   | Ввод №2              | ТП 38-2          | Ввод ПЧ "Schneider Electric" |
|-------------------------------|--------|------------------|----------------------|--------|-----|-----|--------|----------------------|------------------|------------------------------|
| Маркування та переріз кабелів |        | ААШВ 3х95; L=15м | ААБ 4(3х185); L=500м |        |     |     |        | ААБ 4(3х185); L=500м | ААШВ 3х95; L=15м | АПВБелГне 2(3х120); L=XXм    |
| Дані споживача                |        | 400 кВА          |                      | 640 ВА |     |     | 640 ВА |                      | 400 кВА          |                              |



| №                             | 11                  | 13                  | 15               | 17               | 19    | 18    | 16               | 14                        | 12                  |
|-------------------------------|---------------------|---------------------|------------------|------------------|-------|-------|------------------|---------------------------|---------------------|
| Найменування лінії            | Землесос №4         | Землесос №3         | НГУ-3            | НГУ-2            | ТСН-1 | ТСН-2 | НГУ-1            | Землесос №2               | Землесос №1         |
| Маркування та переріз кабелів | ААБ 2(3х120); L=70м | ААБ 2(3х120); L=75м | ААБ 3х120; L=55м | ААБ 3х120; L=50м |       |       | ААБ 3х120; L=50м | АПВБелГне 2(3х120); L=70м | ААБ 2(3х120); L=70м |
| Дані споживача                | 3150 кВт            | 3200 кВт            | 250 кВт          | 250 кВт          | 2 кВА | 2 кВА | 250 кВт          | 3200 кВт                  | 3150 кВт            |

| Позиція     | Найменування                  | Кіл. | Примітка |
|-------------|-------------------------------|------|----------|
| M12, M5, M2 | Двигун землесоса 6кВ 3,5 МВт  | 3    |          |
| АТВ6000     | Перетворювач частоти АТВ6000  | 1    |          |
| 1..8        | Комірка високовольтна КСО-393 | 8    |          |

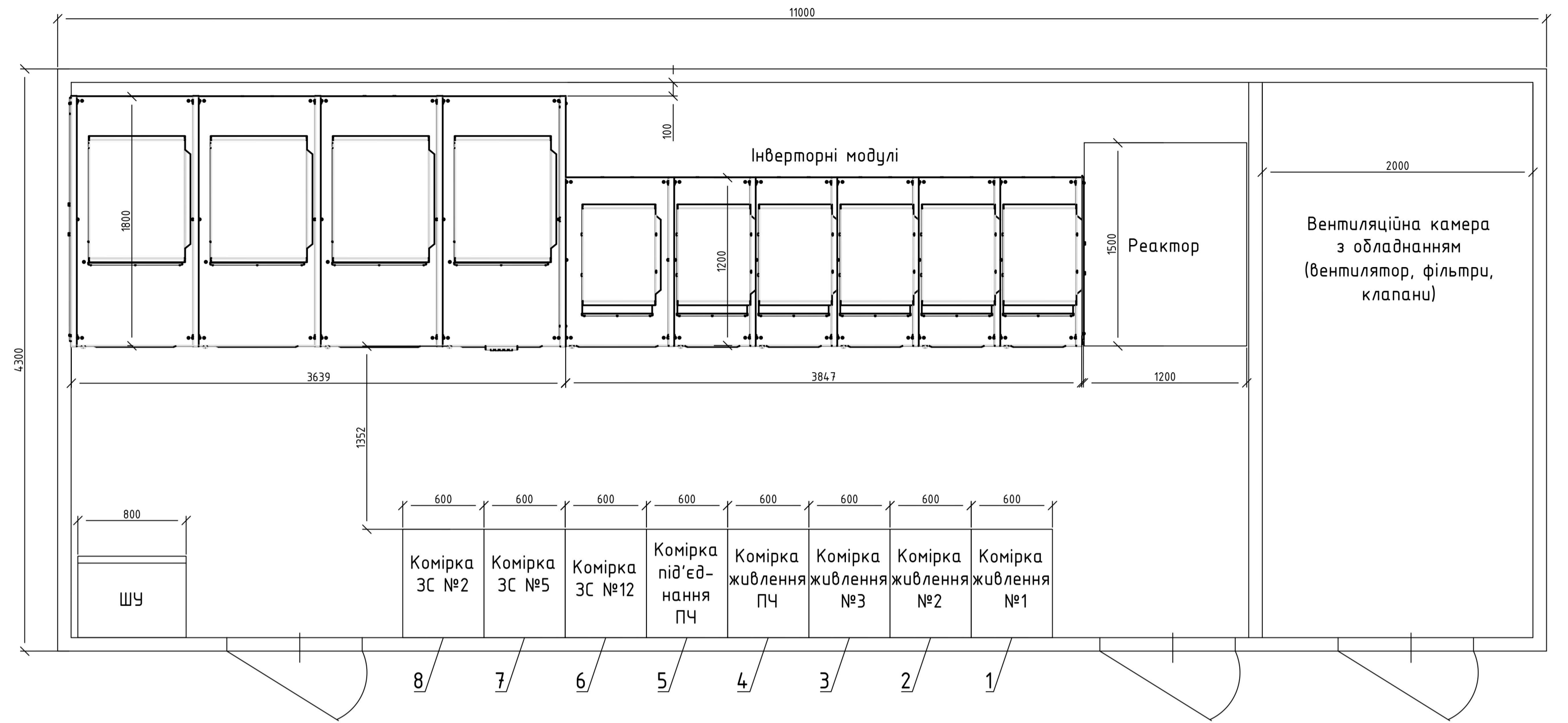
План розташування комрок у ПС-38



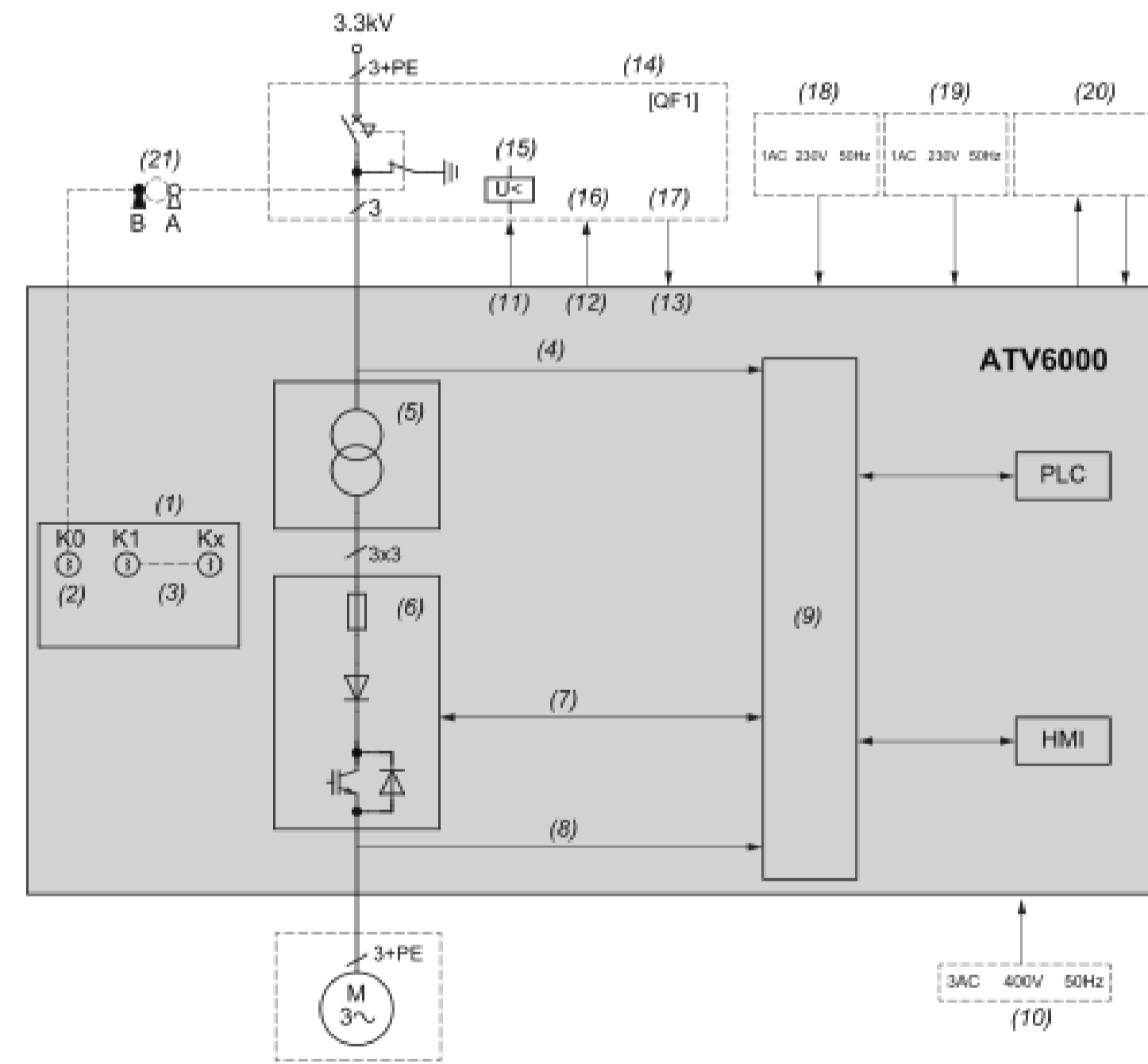
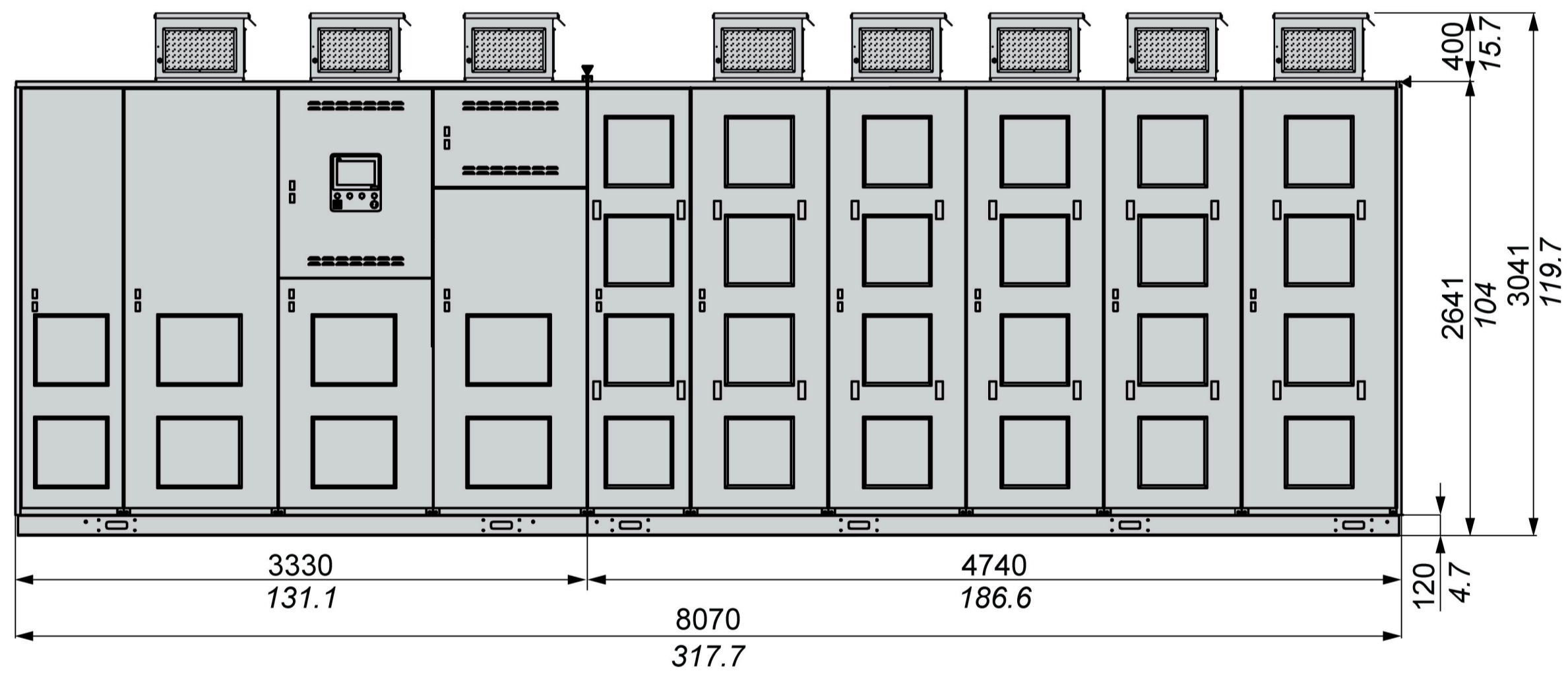
Примітки:

- Схема виконана на підставі наведеної ПрАТ "Північ" оновленої схеми РП-6 кВ підстанції ПС-38.
- Обладнання, що встановлюється згідно проекту показані потовщеною червоною суцільною лінією, існуючі - тонкою.

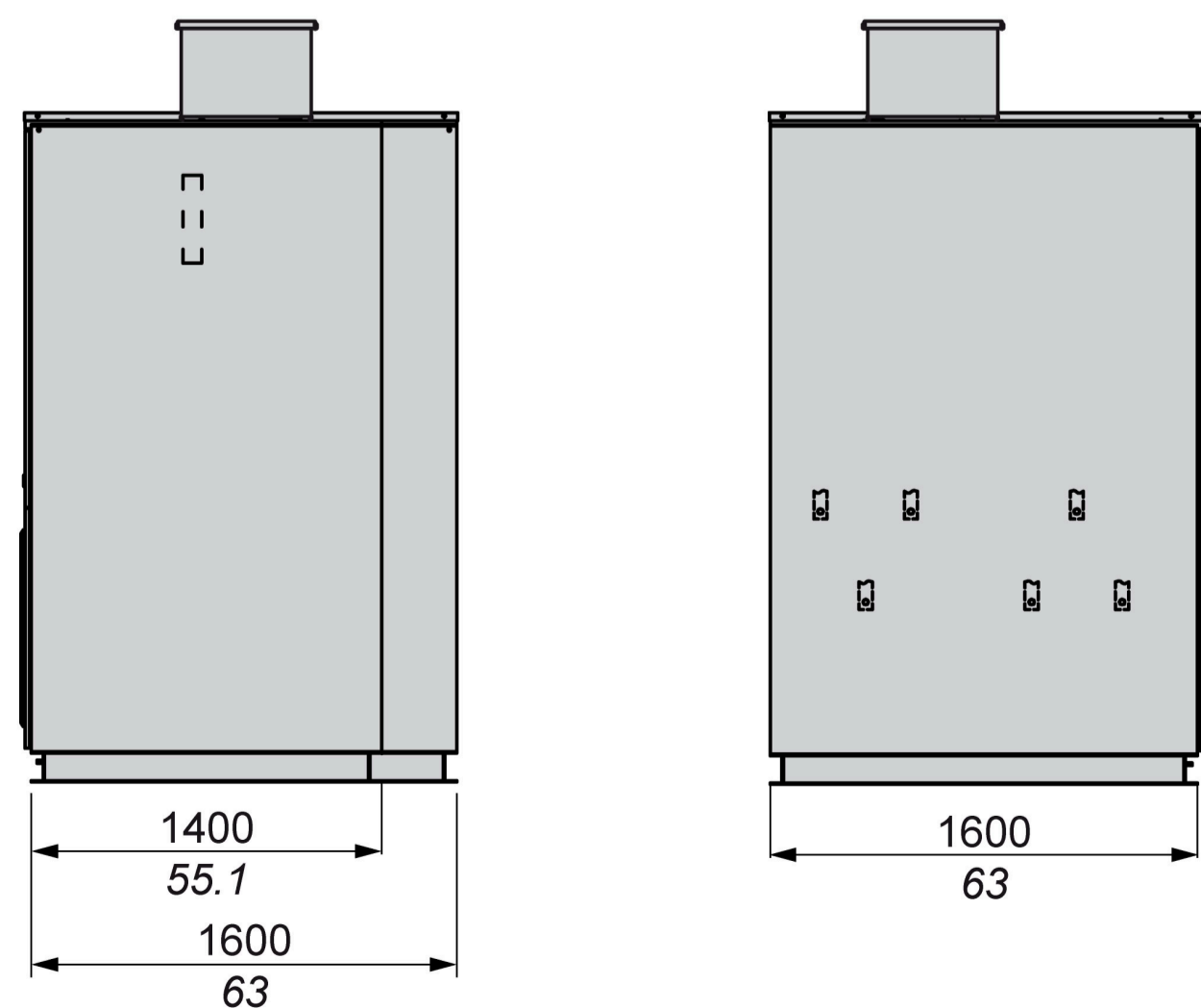
| АВЕРС.КРБ12372694.ЕТР-4Д  |             |      |   |       |       |
|---|-------------|------|---|-------|-------|
| Розробка заходів щодо підвищення ефективності функціонування пульсонасної станції |             |      |   |       |       |
| Зм.   | Кіл.        | Арк. | № Док.  | Піп.  | Дата  |
| Розробив  | А.В. Рухлов |      |   |       |       |
| Перевірив   | В.О. Лукаш  |      |   |       |       |
| Т.контур  |             |      |   |       |       |
| Н.контур  |             |      |   |       |       |
| Затвердив   |             |      |   |       |       |
| Пульсонасна станція ПНС-1   |             |      | Студія  | Архив | Архив |
|   |             |      | у   | 1     | 3     |
| Схеми електропостачання 6 кВ ПНС-1  |             |      | ТУ "Метінвест Політехніка" каф. АВЕРС, гр. ЕІ-23-1п |       |       |



mm  
in.



| №   | Опис  |
|-----|---|
| -1  | Скринька для ключів (блок блокування)                   |
| -2  | Вільний ключ  |
| -3  | Зв'язані ключі  |
| -4  | Вимірювання напруги та струму                           |
| -5  | Трансформатор   |
| -6  | Інвертор (3 модулі на фазу)                             |
| -7  | Оптоволокну   |
| -8  | Вимірювання напруги та струму                           |
| -9  | Головний контролер                                      |
| -10 | Джерело живлення вентиляторів 12 кВА                    |
| -11 | ВВ: команда на відключення                              |
| -12 | ВВ: дозвіл на вмикання                                  |
| -13 | ВВ: зворотний зв'язок про стан                          |
| -14 | Вимикач   |
| -15 | Котушка мінімальної напруги                             |
| -16 | Дозвіл на вмикання                                      |
| -17 | Зворотний зв'язок від ВВ (Розімкнено / Замкнено)        |
| -18 | Допоміжне джерело живлення 4 кВА                        |
| -19 | Гарантоване джерело живлення 1 кВА                      |
| -20 | Сигнали керування                                       |
| -21 | Вільний ключ та ключ вимикача мають бути з'єднані разом |



Лист № 01

Лист № 02

Лист № 03

Лист № 04

Лист № 05

Лист № 06

Лист № 07

Лист № 08

Лист № 09

Лист № 10

Лист № 11

Лист № 12

Лист № 13

Лист № 14

Лист № 15

Лист № 16

Лист № 17

Лист № 18

Лист № 19

Лист № 20

Лист № 21

Лист № 22

Лист № 23

Лист № 24

Лист № 25

Лист № 26

Лист № 27

Лист № 28

Лист № 29

Лист № 30

Лист № 31

Лист № 32

Лист № 33

Лист № 34

Лист № 35

Лист № 36

Лист № 37

Лист № 38

Лист № 39

Лист № 40

Лист № 41

Лист № 42

Лист № 43

Лист № 44

Лист № 45

Лист № 46

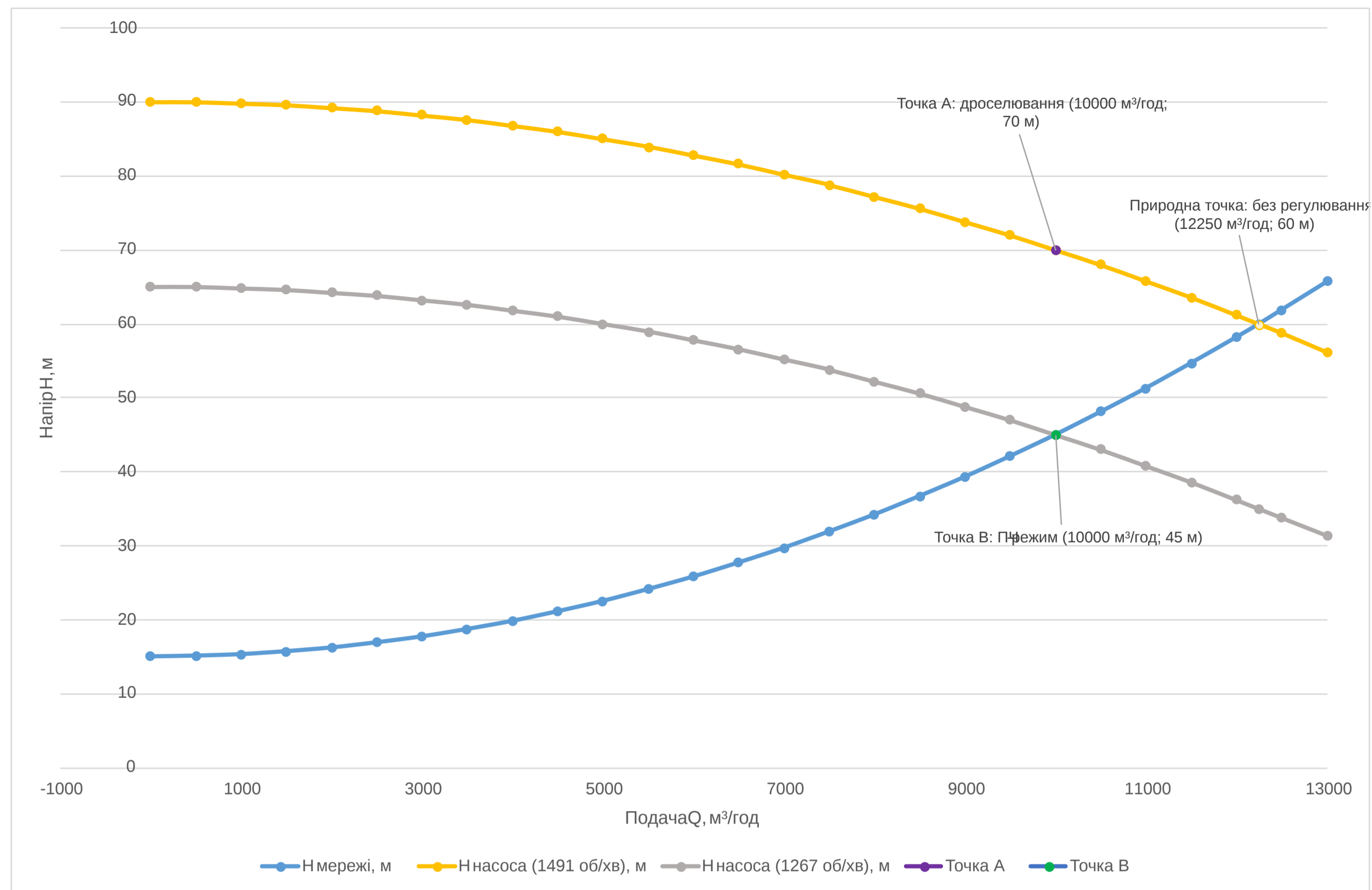
Лист № 47

Лист № 48

Лист № 49

Лист № 50

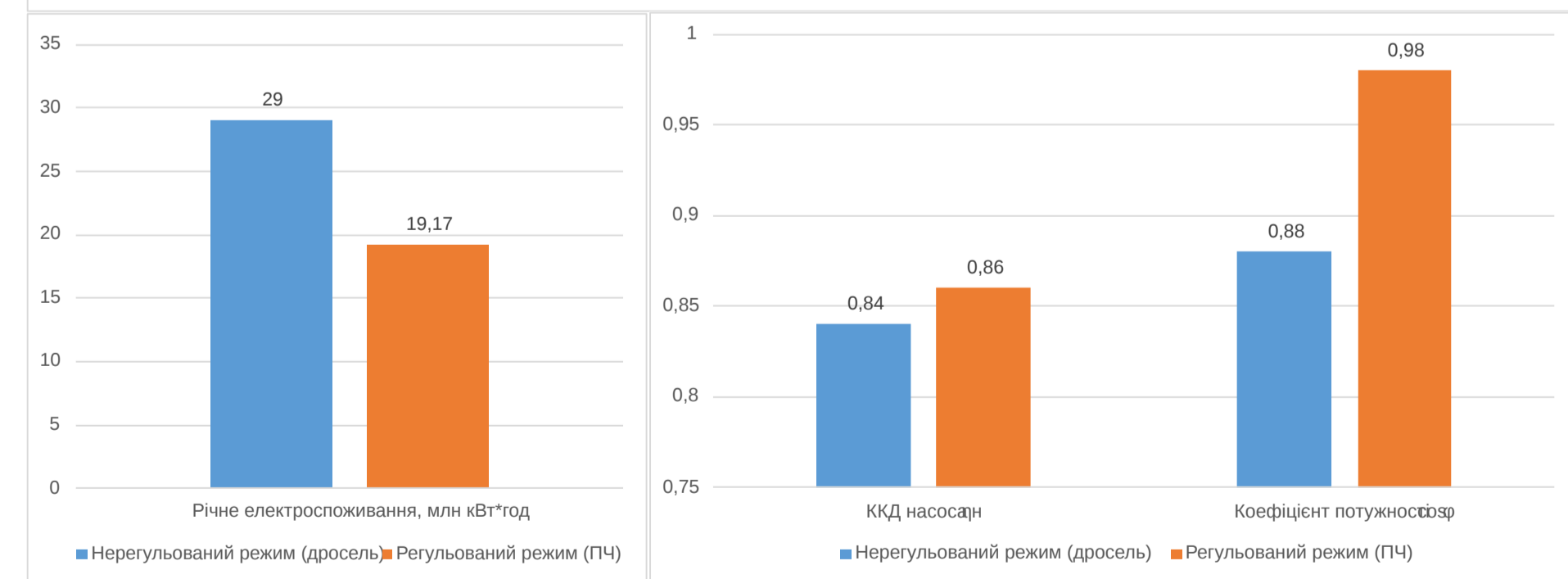
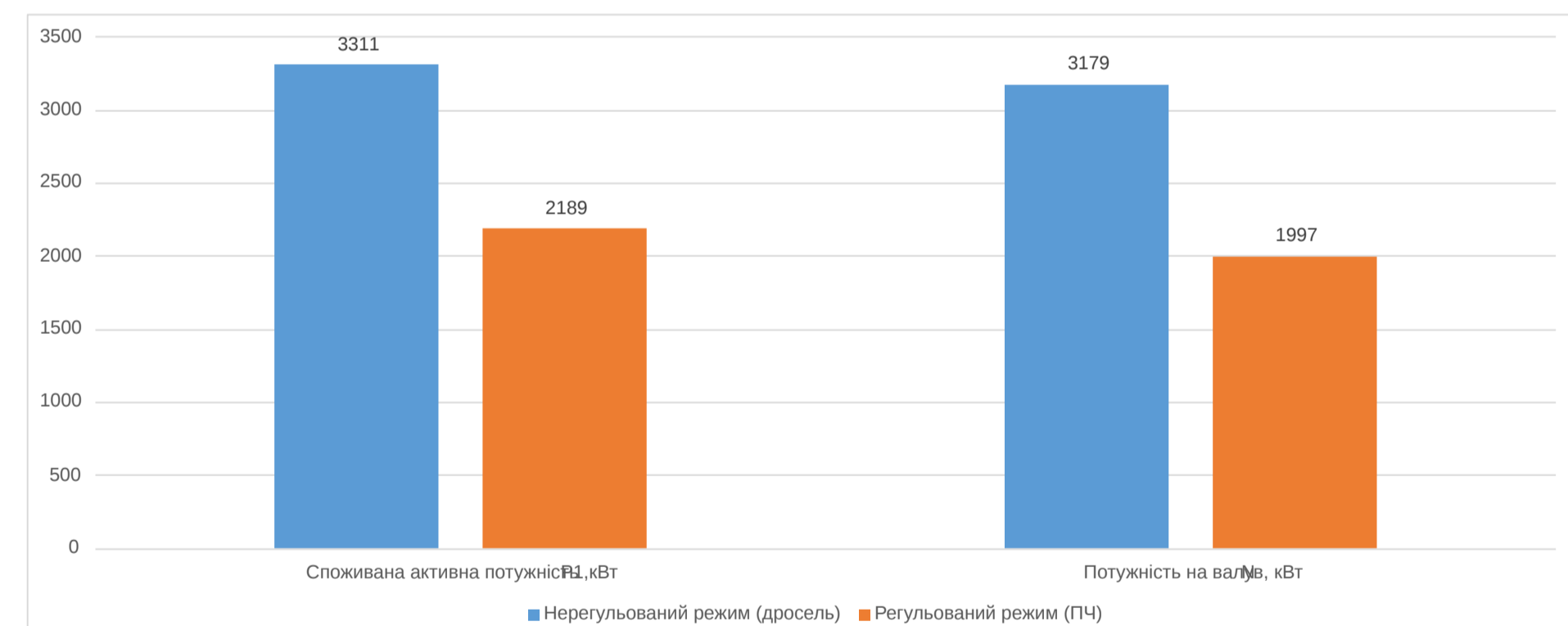
| АВЕРС.КРБ12372694.ЕТР-4Д   |             |      |        |   |       |
|--|-------------|------|--------|---|-------|
| Розробка заходів щодо підвищення ефективності функціонування пульнонаосної станції |             |      |        |   |       |
| Зм.  | Кіл.        | Арк. | № Док. | Підп.   | Дата  |
| Розробив   | А.В. Рухлов |      |        |   |       |
| Перевірив  | В.О. Лукаш  |      |        |   |       |
| Т.контур   |             |      |        |   |       |
| Н.контур   |             |      |        |   |       |
| Затвердив  |             |      |        |   |       |
| Пульнонаосна станція ПНС-1   |             |      |        | Стандія   | Архив |
|  |             |      |        | у   | 2 3   |
| ПЧ ATV6000   |             |      |        | ТУ "Метінвест Політехніка" каф. АВЕРС, гр. ЕІ-23-1п |       |



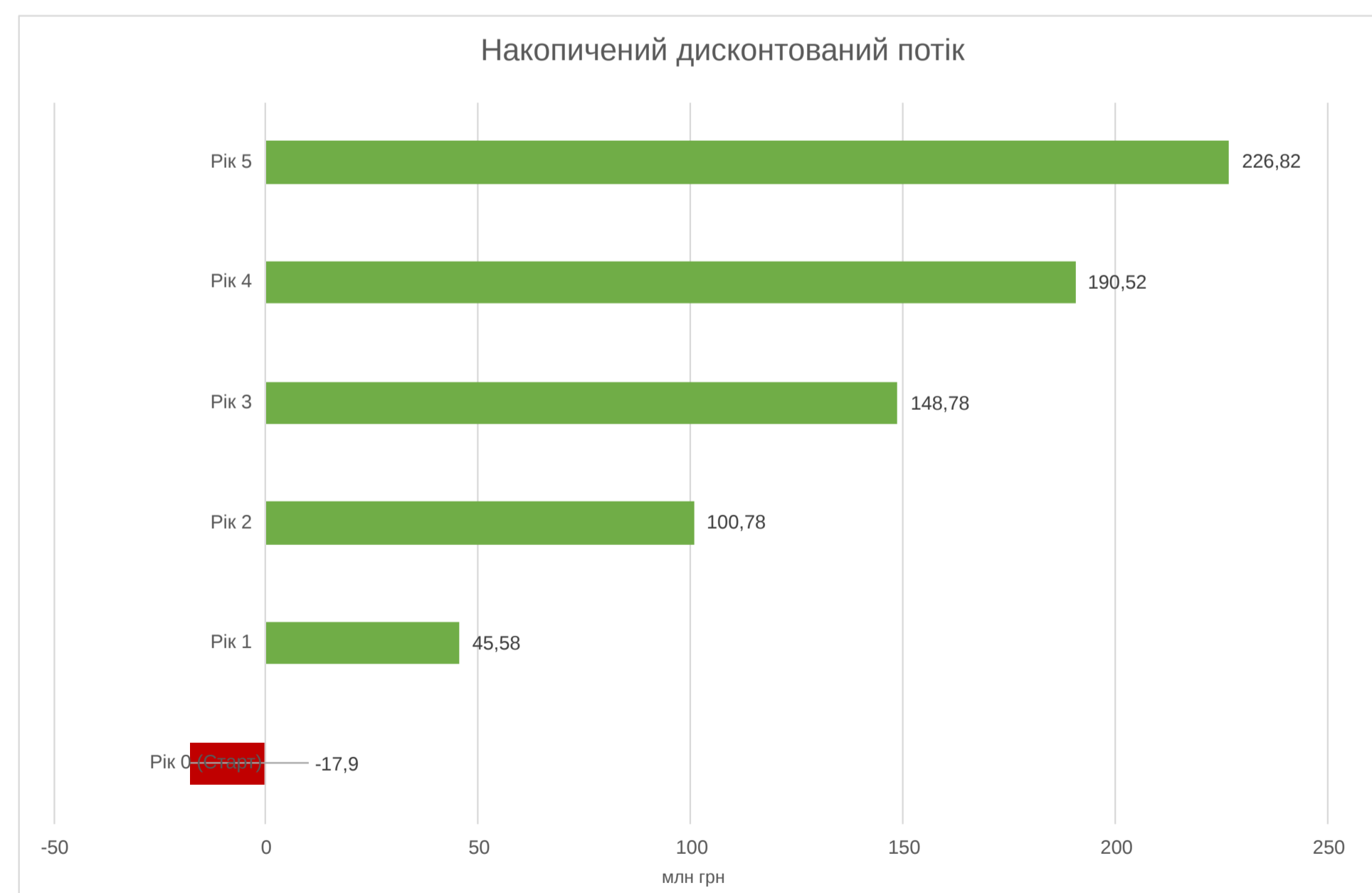
Суміщені Q-H характеристики насоса та мережі за різних режимів регулювання

Розрахункові значення напору для побудови Q-H характеристик

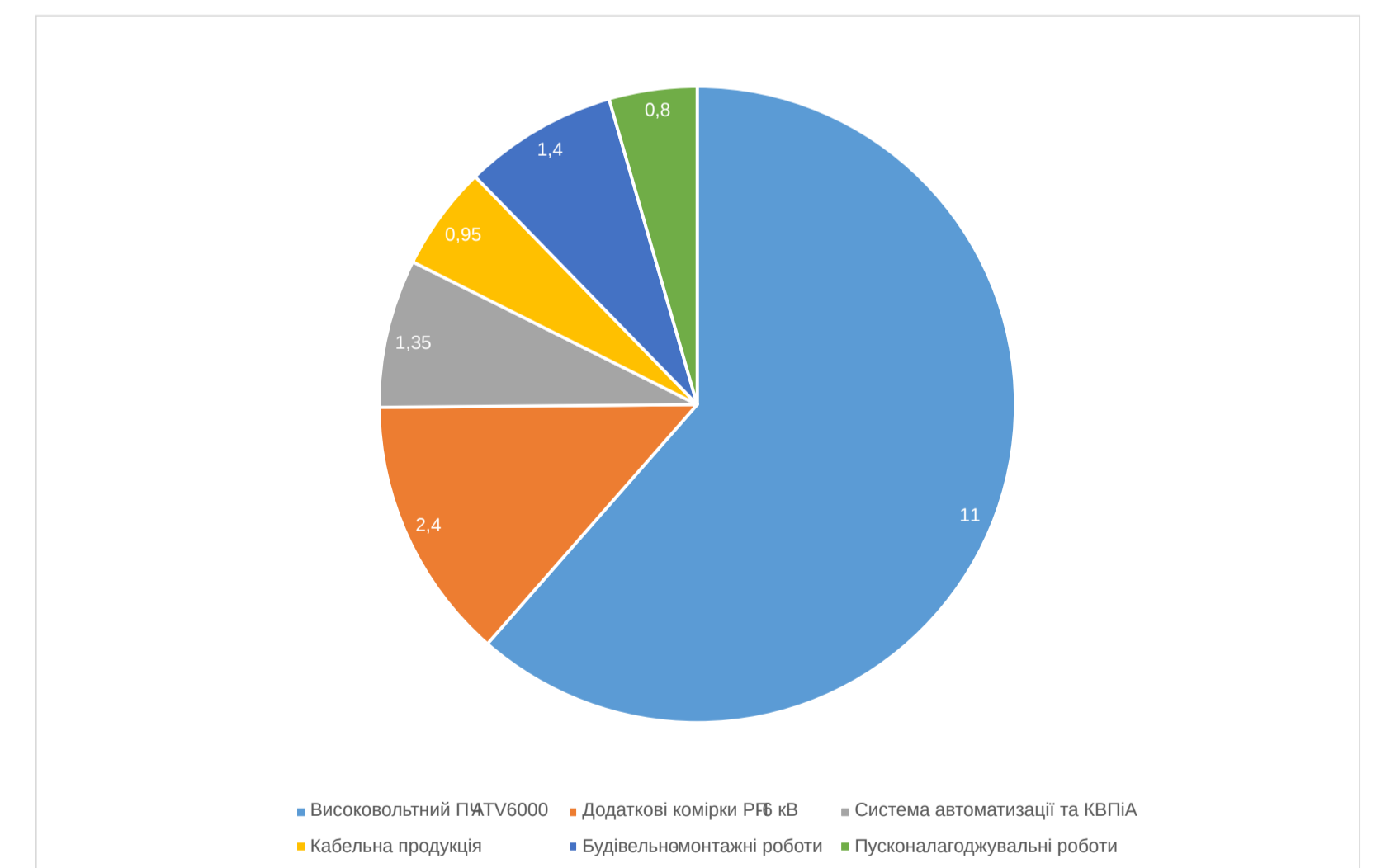
| Q, м³/год | Н мережі, м | Н насоса (1491 об/хв), м | Н насоса (1267 об/хв), м |
|-----------|-------------|--------------------------|--------------------------|
| 0         | 15          | 90                       | 65                       |
| 500       | 15,1        | 90                       | 65                       |
| 1000      | 15,3        | 89,8                     | 64,8                     |
| 1500      | 15,7        | 89,6                     | 64,6                     |
| 2000      | 16,2        | 89,2                     | 64,2                     |
| 2500      | 16,9        | 88,8                     | 63,8                     |
| 3000      | 17,7        | 88,2                     | 63,2                     |
| 3500      | 18,7        | 87,6                     | 62,6                     |
| 4000      | 19,8        | 86,8                     | 61,8                     |
| 4500      | 21,1        | 86                       | 61                       |
| 5000      | 22,5        | 85                       | 60                       |
| 5500      | 24,1        | 84                       | 59                       |
| 6000      | 25,8        | 82,8                     | 57,8                     |
| 6500      | 27,7        | 81,6                     | 56,6                     |
| 7000      | 29,7        | 80,2                     | 55,2                     |
| 7500      | 31,9        | 78,8                     | 53,8                     |
| 8000      | 34,2        | 77,2                     | 52,2                     |
| 8500      | 36,7        | 75,6                     | 50,6                     |
| 9000      | 39,3        | 73,8                     | 48,8                     |
| 9500      | 42,1        | 72                       | 47                       |
| 10000     | 45          | 70                       | 45                       |
| 10500     | 48,1        | 68                       | 43                       |
| 11000     | 51,3        | 65,8                     | 40,8                     |
| 11500     | 54,7        | 63,6                     | 38,6                     |
| 12000     | 58,2        | 61,2                     | 36,2                     |
| 12250     | 60          | 60                       | 35                       |
| 12500     | 61,9        | 58,8                     | 33,8                     |
| 13000     | 65,7        | 56,2                     | 31,4                     |



Діаграми порівняння енергетичних показників землесоса №2



Динаміка накопиченого дисконтованого грошового потоку та термін окупності інвестицій



Структура капітальних інвестицій на модернізацію електроприводу

| АВЕРС.КРБ12372694.ЕТР-4Д   |             |       |        |       |      |
|--|-------------|-------|--------|-------|------|
| Розробка заходів щодо підвищення ефективності функціонування пульпонасосної станції              |             |       |        |       |      |
| Зм.  | Кіл.        | Арк.  | № док. | Підп. | Дата |
| Розробив   | А.В. Рухлов |       |        |       |      |
| Перевірив  | В.О. Лукаш  |       |        |       |      |
| Т.контур   |             |       |        |       |      |
| Пульпонасосна станція ПНС-1  |             |       |        |       |      |
| Стадія   | Архив       | Архив | Архив  |       |      |
| у  | з           | з     |        |       |      |
| Результати дослідження енергоефективності та техніко-економічне обґрунтування модернізації ПНС-1 |             |       |        |       |      |
| Н.контур   |             |       |        |       |      |
| Затвердив  |             |       |        |       |      |

Площа приміщення  
Зам. № 01  
Підпис та дата  
Лист № 01