

Міністерство освіти і науки України

Національний університет водного господарства та природокористування

Навчально-науковий інститут енергетики, автоматики та водного господарства

Кафедра енергетики

02/02-09М

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до виконання лабораторних робіт з навчальної дисципліни
«Цифрові підстанції та інтелектуальні електромережі»
для здобувачів вищої освіти другого (магістерського) рівня
за освітньо-професійною програмою
«Гідроенергетика» спеціальності G4 «Енерговиробництво»
(за спеціалізацією), спеціалізація G4.03
«Відновлювані джерела енергії та гідроенергетика»
денної та заочної форм навчання

Рекомендовано науково-
методичною радою з якості
ННІ ЕАВГ
Протокол № 1 від 23.09.2025 р.

Рівне – 2025

Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з навчальної дисципліни «Цифрові підстанції та інтелектуальні електромережі» для здобувачів вищої освіти другого (магістерського) рівня за освітньо-професійною програмою «Гідроенергетика» спеціальності G4 «Енерговиробництво» (за спеціалізацією), спеціалізація G4.03 «Відновлювані джерела енергії та гідроенергетика» денної та заочної форм навчання. [Електронне видання] / Василюк С. В., Літковець С. П., Василюк К. С., Ільчук В. В. – Рівне : НУВГП, 2025. – 72 с.

Укладачі:

- Василюк С. В.** в.о. завідувача кафедри енергетики, доктор технічних наук, професор;
- Літковець С. П.** доцент кафедри енергетики, кандидат технічних наук, доцент;
- Василюк К. С.** доцентка кафедри автоматизації, комп'ютерно-інтегрованих технологій та робототехніки, докторка філософії;
- Ільчук В. В.** старший викладач кафедри енергетики.

Відповідальний за випуск:

Василюк С. В., в.о. завідувача кафедри енергетики, доктор технічних наук, професор.

Керівник групи забезпечення спеціальності G4 «Енерговиробництво» (за спеціалізацією), спеціалізація G4.03 «Відновлювані джерела енергії та гідроенергетика»:

Тимошук В. С., доцент кафедри енергетики, доктор технічних наук, професор.

© С. В. Василюк, С. П. Літковець,
К. С. Василюк, В. В. Ільчук, 2025
© НУВГП, 2025

ЗМІСТ

Вступ.....	4
Лабораторна робота 1. Дослідження функціонування мікропроцесорного реєстратора параметрів мережі РПМ-416.....	5
Лабораторна робота 2. Дистанційне оцінювання ефективності функціонування споживачів електроенергії.....	16
Лабораторна робота 3. Дослідження режимів роботи двигунного навантаження у складі системи електропостачання за даними засобів вимірювальної техніки.....	30
Лабораторна робота №4. Дослідження роботи блоку АВР на основі пристрою управління резервним живленням AVR-02-G.....	45
Література.....	70
Додаток А. Принципова електрична схема удосконаленого пункту розподілу електроенергії ПР-11.....	71
Додаток Б. Перелік вимірювальних каналів реєстратора РПМ-416.....	72

ВСТУП

Метою освітньої компоненти є формування у здобувачів вищої освіти здатностей та навичок роботи з цифровими пристроями управління у складі цифрових підстанцій та інтелектуальних електромереж.

Завдання: навчитися виділяти функціональні компоненти у складі Smart Grid; вміти задовольняти загальні вимоги до цифрових підстанцій (сумісність, вільна конфігурація, довгострокова стабільність, гнучкість, комунікаційна підтримка); знати основні технічні засоби організації ко-мунікацій на підстанціях та у Smart Grid; знати та використовувати у практичній діяльності технологічні основи цифрових комунікацій.

В результаті вивчення даної дисципліни здобувач набуває уміння розв'язувати складні інженерні завдання і проблеми гідроенергетики, що потребує оновлення та інтеграції знань, у тому числі в умовах неповної інформації та суперечливих вимог, навички автономного і самостійного навчання у сфері гідроенергетики, електричної інженерії і дотичних галузей знань, аналізувати власні освітні потреби та об'єктивно оцінювати результати навчання, уміння відшуковувати, оцінювати та аналізувати необхідну інформацію в науковій і технічній літературі, базах даних та інших джерелах інформації, навички проєктування та експлуатації інтелектуальних систем електропостачання.

Тематика лабораторних робіт тісно пов'язана з лекціями. Для підготовки до лабораторних робіт рекомендується ґрунтовно вивчити відповідний теоретичний матеріал. Також необхідно докладно ознайомитися з методичними вказівками. Лабораторні роботи виконуються з використанням експериментального стенда, що розміщений в ауд. 508. Стенд функціонує під напругою 380 В, тому до виконання робіт студенти допускаються лише після інструктажу з техніки безпеки. Дослідна схема збирається на відключеному стенді. Вмикати напругу на стенд можна тільки після дозволу викладача.

Результати виконання кожної лабораторної роботи оформлюються у вигляді звіту, вимоги до оформлення якого наведені у методичних вказівках. Звіт подається викладачів до захисту на наступному занятті. Для підготовки до захисту можна скористатися переліком контрольних питань.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 1

Дослідження функціонування мікропроцесорного реєстратора параметрів мережі РПМ-416

Мета: встановити залежність напруг на трифазному несиметричному навантаженні, що зібране за схемою «зірка», від наявності нульового проводу.

ЛАБОРАТОРНЕ УСТАТКУВАННЯ

Лабораторне обладнання розміщене в ауд. 508. Для виконання лабораторної роботи використовується:

1. Мікропроцесорний реєстратор параметрів мережі РПМ-416, що входить до складу удосконаленого пункту розподілу електроенергії ПР-11, рис. 1.1. Принципова електрична схема удосконаленого ПР-11 наведена на у додатку А.

Документація на мікропроцесорний реєстратор параметрів мережі РПМ-416 доступна на сайті виробника:

<https://novatek-electro.com/product/reestrator-rpm-416.html>

https://novatek-electro.com/docs/ua/doc_rpm-416_ua.pdf

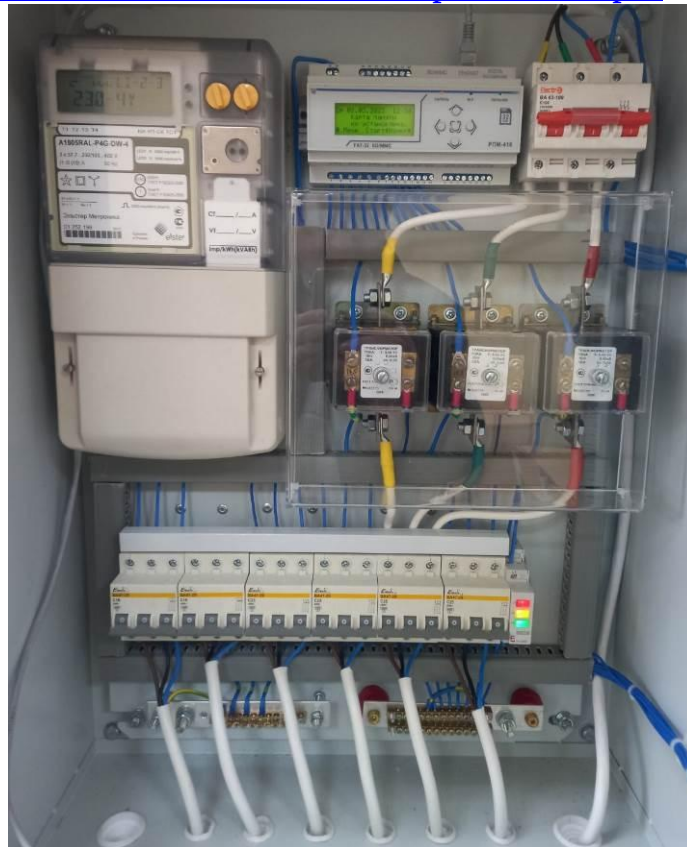


Рисунок 1.1 – Внутрішній вигляд удосконаленого пункту розподілу
електроенергії ПР-11

2. Лампи розжарювання, що створюють активне трифазне навантаження, рис. 1.2.

3. Мультиметр.



Рисунок 1.2 – Панель ламп розжарювання для створення активного навантаження

В лабораторній роботі досліджується вплив стану нейтралі на функціонування трифазного навантаження. Заступну схему досліджуваної системи ілюструє рис. 1.3. Нейтральний вивід U_N вимірювальних кіл за напругою реєстратора підключено до нульової точки навантаження, що забезпечує вимірювання фазних напруг на навантаженні в разі обриву нейтралі.

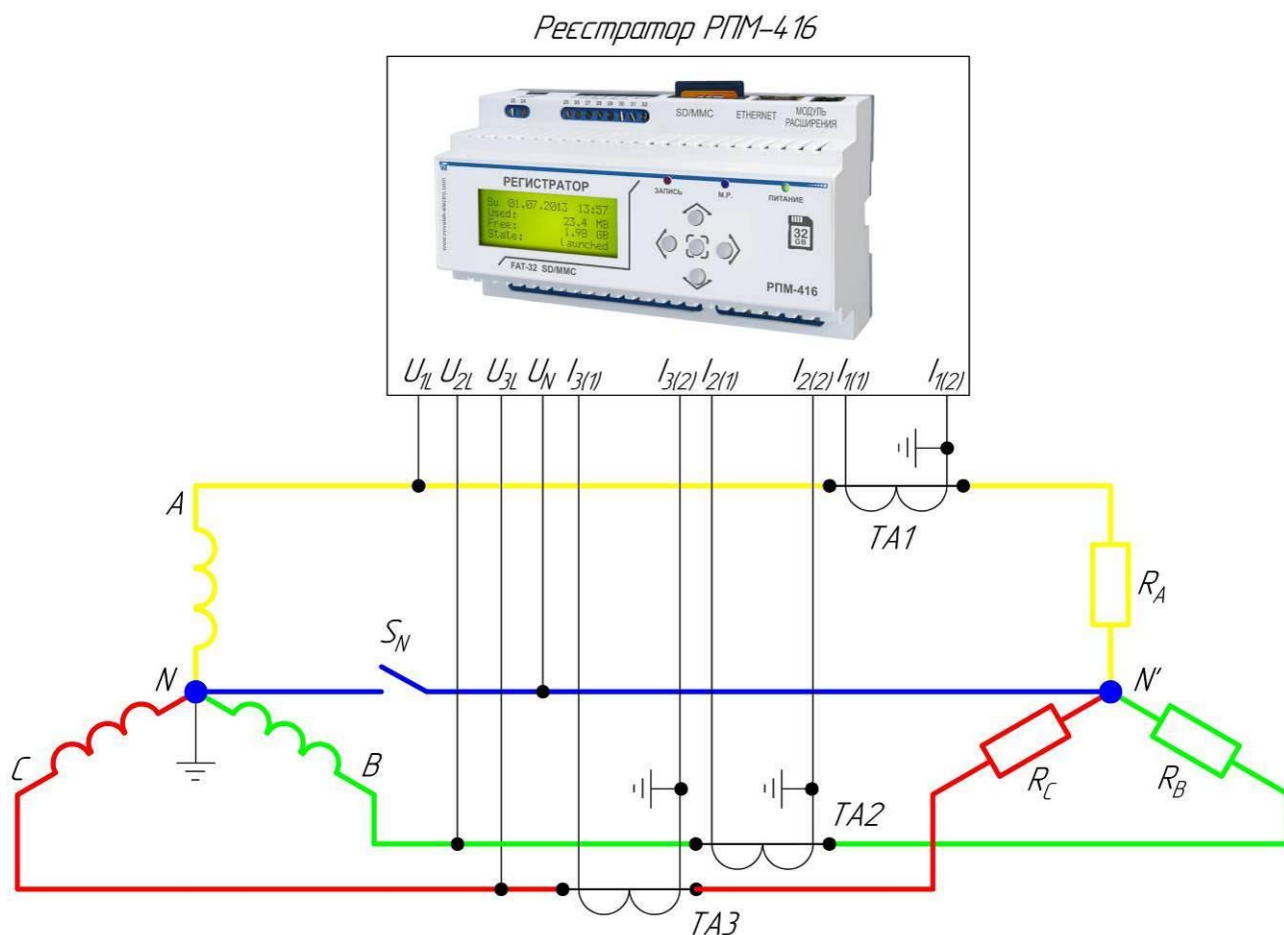


Рисунок 1.3 – Заступна схема лабораторної установки

Умови проведення дослідів наведено у табл. 1.1.

Умови проведення дослідів

Дослід	Стан нейтралі	Характер навантаження
1	норма	симетричне
2	норма	несиметричне
3	обрив	симетричне
4	обрив	несиметричне

ЗАВДАННЯ

Забезпечити вимірювання параметрів трифазного навантаження за допомогою мікропроцесорного реєстратора параметрів мережі РПМ-416. Виконати порівняльний аналіз функціонування трифазного симетричного та несиметричного навантаження, що зібране за схемою «зірка», за наявності та відсутності нульового проводу. Результати відобразити за допомогою векторної діаграми.

ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

Дослід 1. Дослідження функціонування симетричного трифазного навантаження за наявності нульового проводу

1. В ауд. 508 пересвідчитися, що з лабораторного стенда знята напруга. Зібрати схему лабораторного стенда відповідно схеми на рис. 1.4, а. При цьому мультиметр використовувати як **амперметр змінного струму**, що вимірює струм у нульовому проводі.

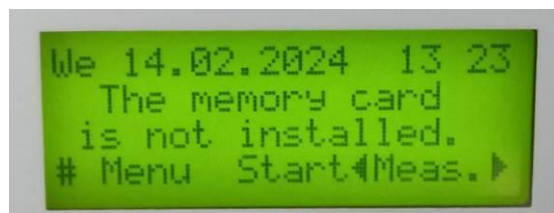
Зібрана схема стенда зображена на рис. 1.5. Зробити фото лабораторного стенда для додавання до звіту.

2. Розмістити на панелі лампи: **EL1 – 300 Вт; EL2 – 300 Вт; EL3 – 300 Вт.**

3. **Показати схему викладачу!**

4. **З дозволу викладача подати напругу на стенд за допомогою автоматичного вимикача ЩРН.**

5. Реєстратор вклучиться, після ініціалізації на екрані буде відображено головний екран:



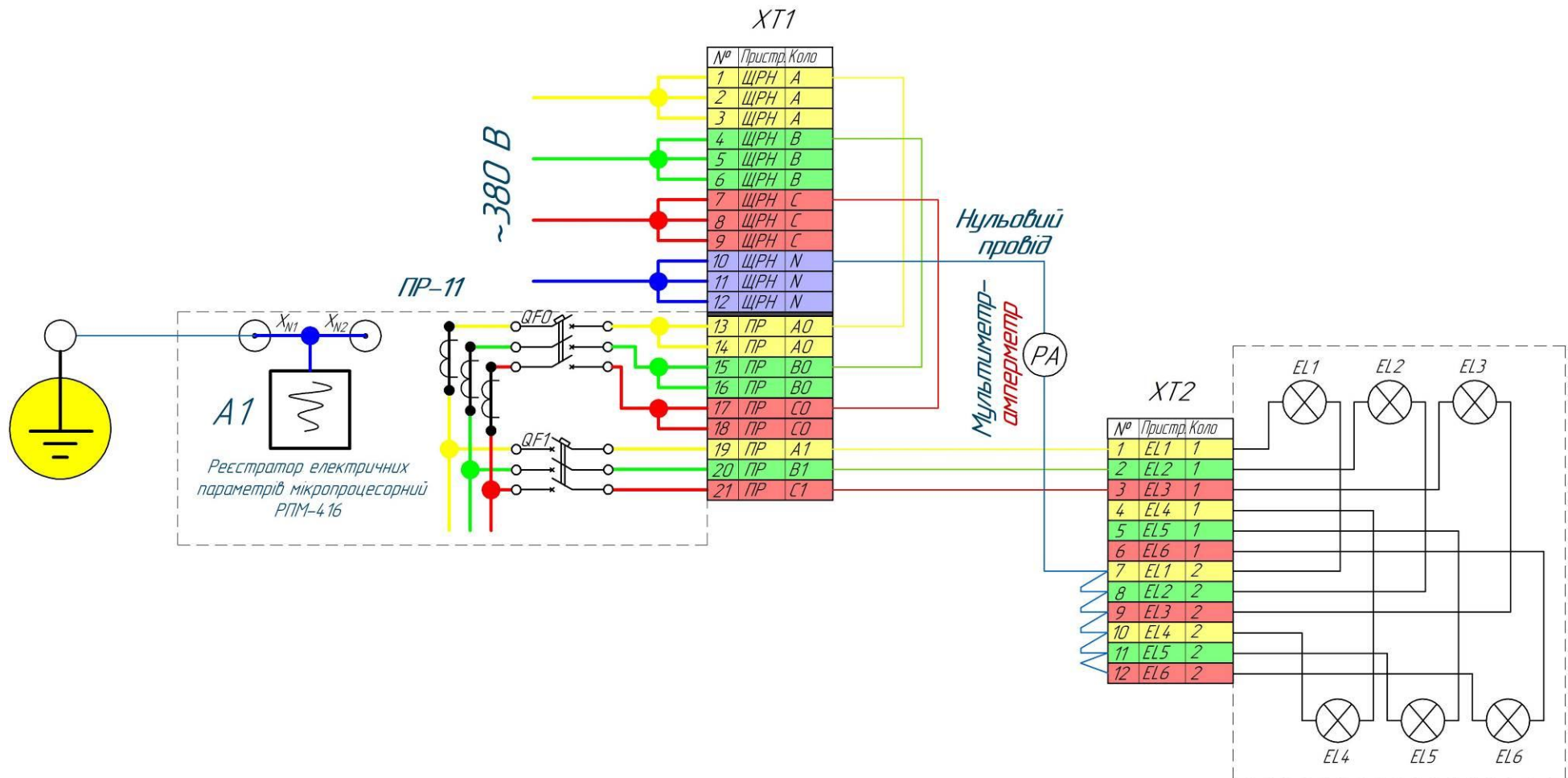


Рисунок 1.4, а – Схема з'єднань елементів лабораторного стенда при **нормальному стані** нульового проводу

Цей провідник забезпечує вимірювання системи фазних напруг на навантаженні при обриві нейтралі

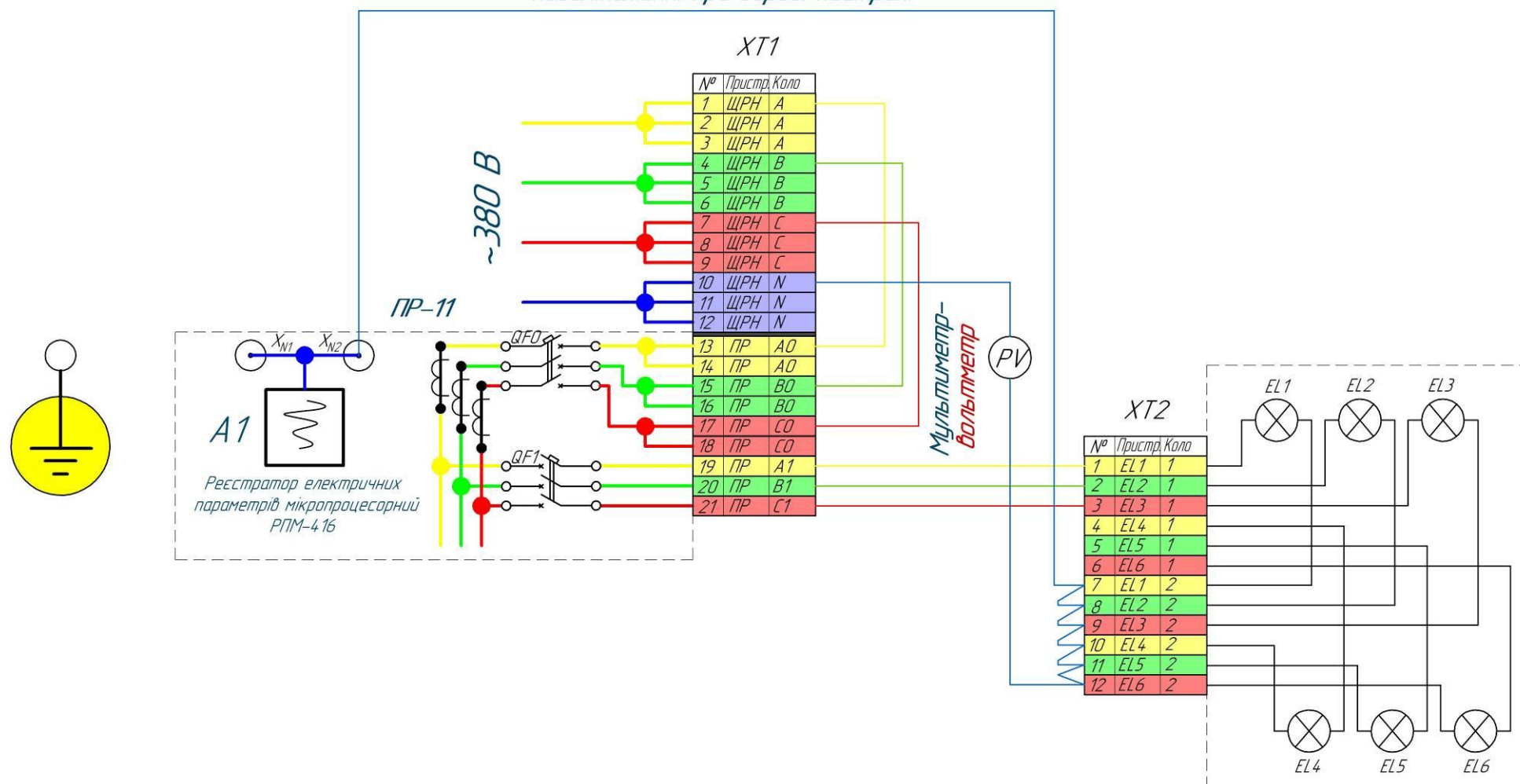


Рисунок 1.4, б – Схема з'єднань елементів лабораторного стенда при **обриві** нульового проводу

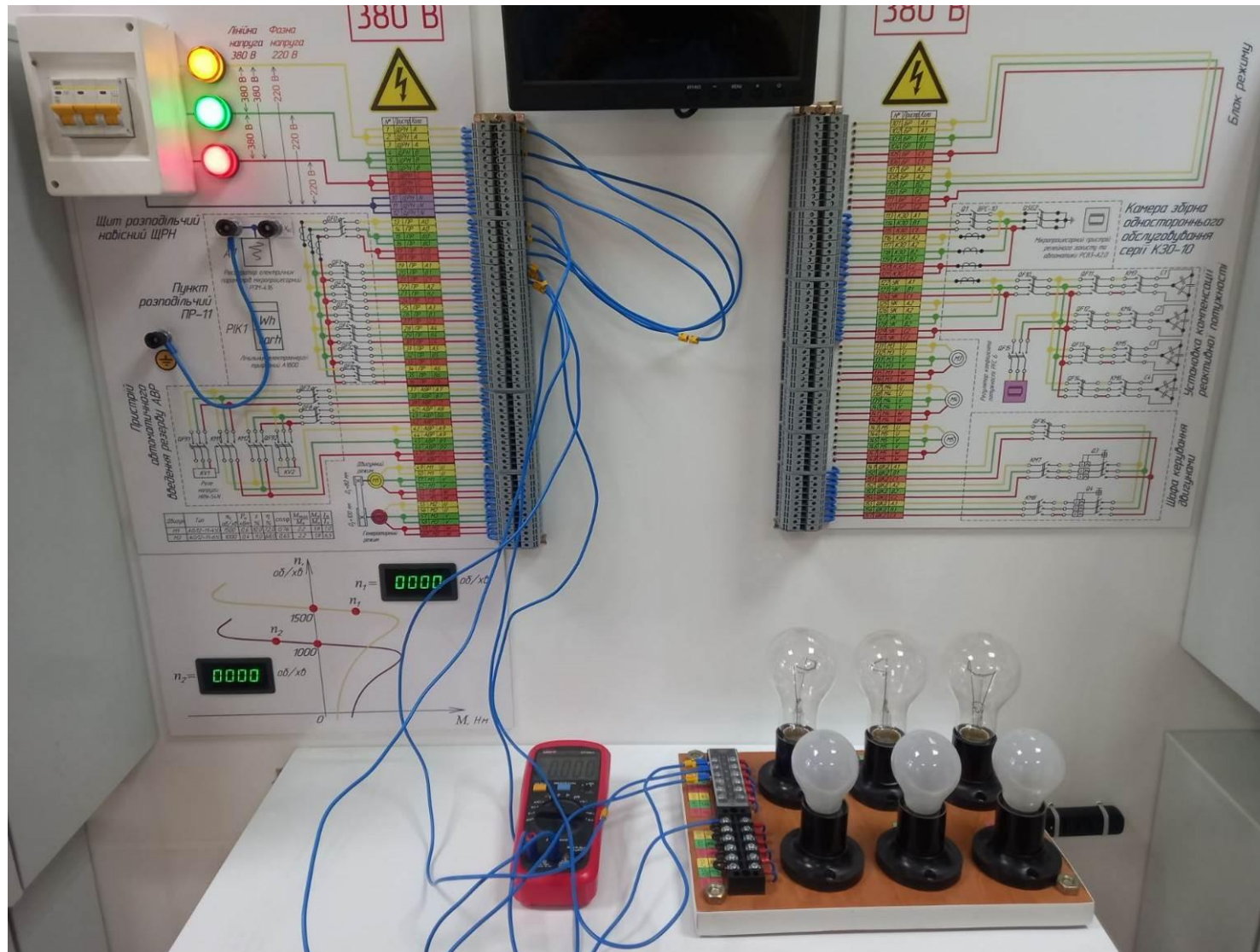


Рисунок 1.5 – З'єднання елементів лабораторного стенда

6. Сконфігурувати реєстратор шляхом задавання типів вимірювальних трансформаторів струму. Для цього обрати пункт «Menu» («Меню»). Для вибору пункту меню використовуються кнопки ► (вправо), ◄ (вліво). Для відкриття пункту меню використовується кнопка ■ (введення, центральна кнопка). Вибрати наступні підменю: «Base channels» («Базові канали») – «Channel 4» («Канал 4») – «Current sensor» («Давач струму»), що відповідає трансформатору ТА1. Задати первинний номінальний струм вимірювального трансформатора струму відповідно до типу трансформаторів, що використовуються у складі ПР-11. Аналогічно встановити первинні номінальні струми ТА2 (канал 5) та ТА3 (канал 6). Вийти на головний екран.

7. **Ввімкнути автоматичний вимикач QF0 у складі ПР-11.**

8. Обрати пункт меню «Meas.» («Вимірювання»).

9. На екрані буде відображено виміряні параметри каналу КН01:



Для гортання списку параметрів каналу використовуються кнопки ▲▼. Для переходу до наступного або попереднього каналу слід натиснути кнопки ►◄. Вихід до головного екрану здійснюється за допомогою кнопки ■.

Список всіх каналів та параметрів, що вимірюються, наведено у додатку Б.

10. **Ввімкнути автоматичний вимикач QF1, на лампи буде подана напруга.**

11. Занести до табл. 1.2 результати вимірювань (стовпчик Дослід 1).

12. Відключити автоматичного вимикача ЩРН.

Дослід 2. Дослідження функціонування несиметричного трифазного навантаження за наявності нульового проводу

13. **Обережно, лампи можуть бути гарячими!** З дозволу викладача замінити лампу розжарювання: EL1 – 100 Вт; EL2 – 300 Вт; EL3 – 300 Вт.

14. **З дозволу викладача подати напругу на стенд за допомогою автоматичного вимикача ЩРН.**

15. Занести до табл. 1.2 результати вимірювань (стовпчик Дослід 2).

16. Відключити автоматичного вимикача ЩРН.

Таблиця 1.2

Результати вимірювань

Канал	Параметр	Дослід 1	Дослід 2	Дослід 3	Дослід 4
		N – норма	N – норма	N – обрив	N – обрив
		EL1 = 300 ВТ EL2 = 300 ВТ EL3 = 300 ВТ	EL1= 100 ВТ EL2= 300 ВТ EL3= 300 ВТ	EL1= 300 ВТ EL2= 300 ВТ EL3= 300 ВТ	EL1= 100 ВТ EL2= 300 ВТ EL3= 300 ВТ
		Результати вимірювань реєстратором РПМ-416			
1	U_a , В				
2	U_b , В				
3	U_c , В				
4	I_a , А			х	х
5	I_b , А			х	х
6	I_c , А			х	х
16	P_a , Вт			х	х
	Q_a , ВАр			х	х
	S_a , ВА			х	х
	$\cos \varphi_a$			х	х
17	P_b , Вт			х	х
	Q_b , ВАр			х	х
	S_b , ВА			х	х
	$\cos \varphi_b$			х	х
18	P_c , Вт			х	х
	Q_c , ВАр			х	х
	S_c , ВА			х	х
	$\cos \varphi_c$			х	х
19	U_{ab} , В				
	U_{bc} , В				
	U_{ca} , В				
Результати вимірювання мультиметром					
U_N , В		х	х		
I_N , А				х	х

Дослід 3. Дослідження функціонування симетричного трифазного навантаження при обриві нульового проводу

17. Зібрати схему лабораторного стенда відповідно схеми на рис. 1.4, б. При цьому мультиметр використовувати як **вольтметр змінного струму**, що вимірює напругу зсуву нейтралі.

18. **Обережно, лампи можуть бути гарячими!** З дозволу викладача замінити лампу розжарювання: EL1 – **300 Вт**; EL2 – 300 Вт; EL3 – 300 Вт.

19. **З дозволу викладача подати напругу на стенд за допомогою автоматичного вимикача ЩРН.**

20. Занести до табл. 1.2 результати вимірювань (стовпчик Дослід 3).

21. Відключити автоматичний вимикач ЩРН.

Дослід 4. Дослідження функціонування несиметричного трифазного навантаження при обриві нульового проводу

22. **Обережно, лампи можуть бути гарячими!** З дозволу викладача замінити лампу розжарювання: EL1 – **100 Вт**; EL2 – 300 Вт; EL3 – 300 Вт.

23. **З дозволу викладача подати напругу на стенд за допомогою автоматичного вимикача ЩРН.**

24. Занести до табл. 1.2 результати вимірювань (стовпчик Дослід 4).

25. Відключити автоматичний вимикач ЩРН.

АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДІВ

26. Проаналізувати характер навантаження. Як співвідносяться номінальна та виміряна потужність ламп розжарювання? Чому дорівнює реактивна потужність? Чому? Як співвідносяться активна та повна потужності? Чому дорівнює коефіцієнт потужності?

27. Проаналізувати вплив характеру навантаження (симетричне, несиметричне) на величину струму у нульовому проводі відповідно до результатів дослідів 1 та 2. Як змінюється величина струму нульового проводу при зміні симетрії навантаження? Чому? Яку роль відіграє нульовий провід при з'єднанні навантажень у «зірку»? Результати аналізу відобразити у звіті.

28. Проаналізувати вплив характеру навантаження (симетричне, несиметричне) на умови функціонування споживача при обриві нульового проводу відповідно до результатів дослідів 3 та 4. Як змінюється величина напруги зсуву нейтралі при зміні симетрії навантаження? Чому? За яких умов нульовий провід може не використовуватися? Результати аналізу відобразити у звіті.

29. За результатами дослідів 2 та 4 побудувати векторну діаграму, що відображає лінійні та фазні напруги навантаження при нормальному стані нульового проводу та в разі обриву. Визначити величину напруги зміщення нейтралі за векторною діаграмою та аналітичним шляхом, як показано в наступному пункті. Порівняти результати розрахунків з виміряними значеннями.

30. Побудова векторної діаграми починається з побудови векторів фазних та лінійних напруг за наявності нульового проводу, тобто за даними досліду 2, рис. 1.6. При цьому вектори напруг будують в обраному масштабі. В такому ж масштабі будують вектори фазних напруг після обриву нульового проводу (за даними досліду 4).

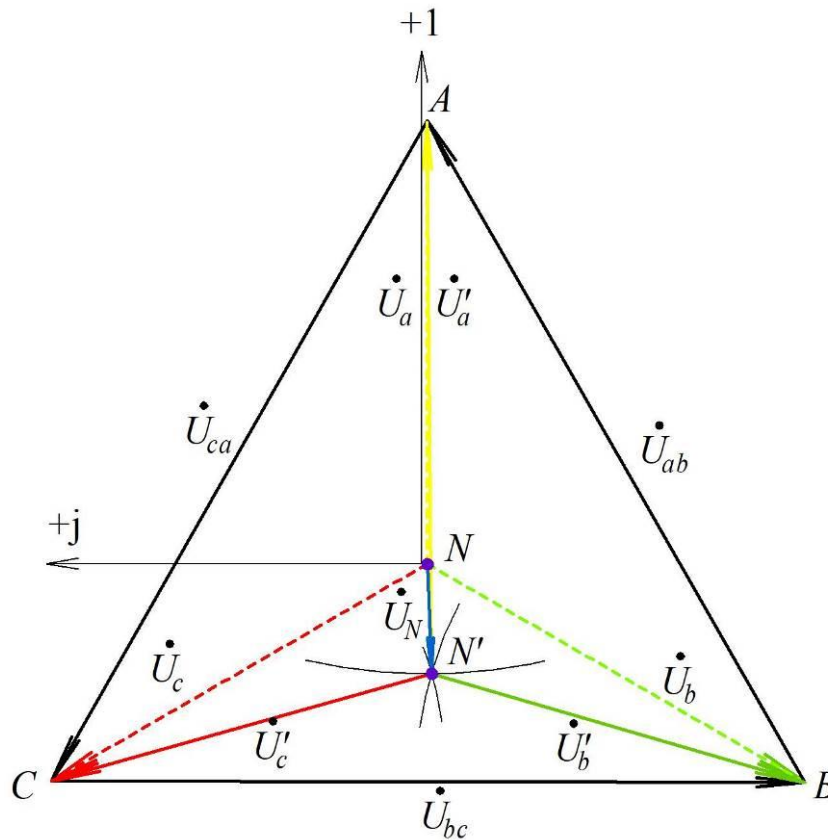


Рисунок 1.6 – Векторна діаграма напруг для схеми «зірка»: при обриві нульового проводу з'являється напруга $\dot{U}_N$ між нульовими вузлами генератора та навантаженням

Оскільки положення нульової точки N' після обриву нейтралі заздалегідь невідоме, то з точок A, B, C за допомогою циркуля проводять дуги, радіус яких відповідає довжинам відповідних векторів фазних напруг після обриву нуля. Місце перетину дуг відповідає положенню точки N' . Довжина вектора $\dot{U}_N$, з урахуванням масштабу, визначає діюче значення напруги зсуву нейтралі U_{N5} , що визначене за векторною діаграмою. Одержане значення необхідно занести до табл. 1.3 та визначити відносну похибку, вважаючи за дійсне значення виміряне в досліді 4 значення U_{N4} , В.

31. Визначення величини напруги зміщення нейтралі аналітичним шляхом здійснюється наступним чином.

Активні провідності фаз до та після обриву нейтралі можуть вважатися незмінними, тому на основі даних досліду 2, враховуючи активний характер навантаження, можна знайти:

$$Y_a = I_a / U_a; \quad Y_b = I_b / U_b; \quad Y_c = I_c / U_c. \quad (1.1)$$

Вектори фазних напруг до обриву нейтралі становили (за даними дослідів 2):

$$\dot{U}_a = U_a \cdot e^{j0^\circ}; \quad \dot{U}_b = U_b \cdot e^{-j120^\circ}; \quad \dot{U}_c = U_c \cdot e^{j120^\circ}. \quad (1.2)$$

Діюче значення напруги зсуву нейтралі дорівнює:

$$U_{N6} = \left| \frac{\dot{U}_a \cdot Y_a + \dot{U}_b \cdot Y_b + \dot{U}_c \cdot Y_c}{Y_a + Y_b + Y_c} \right|. \quad (1.3)$$

Одержану величину слід занести до табл. 1.3 та обчислити відносну похибку обчислення.

Таблиця 1.3

Порівняння вимірених та розрахованих значень напруги зміщення нейтралі

Виміряно в досліді 4	Визначено за векторною діаграмою		Обчислено аналітично	
U_{N4} , В	U_{N5} , В	δ , %	U_{N6} , В	δ , %

32. Проаналізувати одержані в табл. 1.3 величини відносних похибок.

Вміст звіту з лабораторної роботи

1. Тема, мета роботи.
2. Фото лабораторного стенда.
3. Заповнену табл. 1.2 з результатами вимірювань.
4. Аналіз результатів дослідів за вимогами п. 26–31, включаючи векторну діаграму (рис. 1.6) та табл. 1.3.
5. Висновки.

Контрольні запитання

1. Як впливає обрив нульового проводу на функціонування трифазного симетричного навантаження, що з'єднане у «зірку»? Обґрунтувати свою відповідь результатами вимірювань.
2. Як впливає обрив нульового проводу на функціонування трифазного несиметричного навантаження, що з'єднане у «зірку»? Обґрунтувати свою відповідь результатами вимірювань.
3. Поясніть схему підключення аналізатора відповідно до додатка А.
4. Поясніть порядок роботи з аналізатором. Яким чином зчитуються виміряні значення?
5. Чи достатньо для підключення асинхронного двигуна до електромережі трижильного кабелю? Чи необхідно використовувати чотирижильний? Чому? Обґрунтувати свою відповідь результатами вимірювань.
6. Яке практичне значення мають результати вимірювань для експлуатації розподільних електромереж 0,38 кВ? Обґрунтуйте відповідь посиланням на нормативні документи.
7. Як змінилося б положення вектора $\dot{U}_N$ на векторній діаграмі (рис. 1.6) в разі різної потужності всіх трьох ламп навантаження.
8. Перелічити функціональні можливості аналізатора РПМ-416.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2

Дистанційне оцінювання ефективності функціонування споживачів електроенергії

Мета: навчитися аналізувати результати вимірювань для визначення електричних та механічних втрат двигунного навантаження у складі інтелектуальної СЕП.

КОРОТКІ ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Найбільш поширеним типом споживачів електроенергії на промислових підприємствах є електродвигуни, зокрема – асинхронні електричні машини. Особливості технологічного процесу та режим роботи машини (механізму) визначає режим роботи електродвигуна: двигунний або генераторний. Часто двигун переводять до генераторного режиму для економії електроенергії або виконання визначених технологічних операцій.

Зокрема, Харківський машинобудівний завод «Світло шахтаря» виготовляє приводні блоки скребкових конвеєрів для гірничої промисловості, рис. 2.1. До складу таких пристроїв входить редуктор, який після вироблення має пройти передексплуатаційні випробування. Останні передбачають функціонування редуктора протягом певного часу під різними рівнями механічного навантаження. Для зменшення втрат електроенергії використовується взаємне навантаження приводних блоків, коли один з двигунів навмисно переводиться до генераторного режиму роботи.



Рисунок 2.1 – Блок приводу БПК160

Під час передексплуатаційних випробувань приводні блоки з'єднуються за допомогою спеціального додаткового редуктора-прискорювача (рис. 2.2). Це забезпечує функціонування одного з асинхронних двигунів в двигунному режимі, іншого – в генераторному. Зміна рівнів механічного навантаження забезпечується використанням тиристорного регулятора напруги.

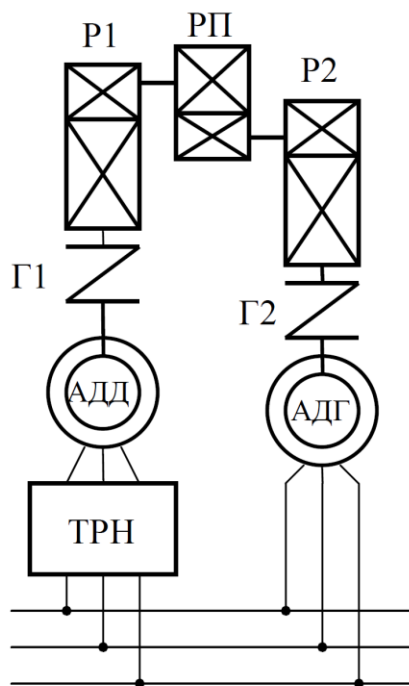


Рисунок 2.2 – Структурна схема навантажувального стенда для передексплуатаційних випробувань приводних блоків в умовах ХМЗ «Світло шахтаря»: АДД – асинхронний двигун, що працює в двигунному режимі; АДГ – асинхронний двигун, що функціонує в генераторному режимі; Г1, Г2 – гідромуфти; Р1, Р2 – редуктори у складі приводних блоків; РП – редуктор-прискорювач; ТРН – тиристорний регулятор напруги

Баланс активної та реактивної потужностей

На рис. 2.3 наведена спрощена схема випробувального стенда, що розглядається. На схемі прийняті наступні позначення:

$P_{ел1}$ – активна потужність, що споживається стендом з мережі;

$P_{ел2}$ – активна потужність, що споживається АДД;

$P_{ел3}$ – активна потужність, яку АДГ віддає в мережу;

$P_{мех1}$ – потужність на валу АДД;

$P_{мех2}$ – потужність на валу АДГ;

$P_{вд}$ – втрати потужності в АДД;

$P_{вг}$ – втрати потужності в АДГ;

$P_{вп}$ – втрати потужності в механічній передачі;

Q_{L1} – реактивні індуктивна потужність, що надходить з мережі до стенда;

Q_{L2} – реактивні індуктивна потужність, що споживається АДД;

Q_{L3} – реактивні індуктивна потужність, що споживається АДГ.

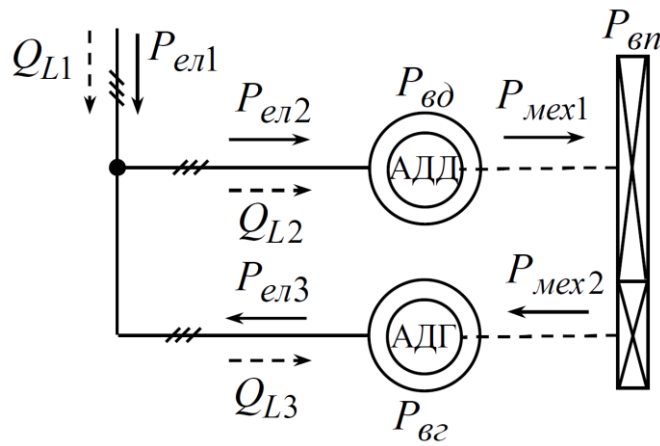


Рисунок 2.3 – Схема випробувального стенда, що пояснює розподіл потужностей

Активна потужність, яка втрачається в системі, відповідає активній потужності, що споживається двигуном, окрім потужності, яка повертається генератором до електромережі:

$$P_{ел1} = P_{ел2} - P_{ел3}. \quad (2.1)$$

Електрична машина, що функціонує у двигунному режимі, дорівнює потужності на валу двигуна та втратам:

$$P_{ел2} = P_{мех1} + P_{вд}. \quad (2.2)$$

На вал генератора передається потужність за виключенням механічних втрат в передачі:

$$P_{мех2} = P_{мех1} - P_{вп}. \quad (2.3)$$

До мережі генератор віддає підведену потужність з урахуванням втрат в машині:

$$P_{ел3} = P_{мех2} - P_{вг}. \quad (2.4)$$

Залежність (2.4) з урахуванням (2.3) має вигляд:

$$P_{ел3} = P_{мех1} - P_{вп} - P_{вг}. \quad (2.5)$$

Враховуючи (2.2) та (2.5) до (2.1), одержимо баланс активної потужності в системі:

$$P_{ел1} = P_{вд} + P_{вп} + P_{вг}. \quad (2.6)$$

Залежність (2.6) говорить про те, що з електромережі споживається активна потужність тільки на покриття втрат в електричних машинах та механічній передачі між ними.

Баланс реактивної потужності:

$$Q_{L1} = Q_{L2} + Q_{L3}. \quad (2.7)$$

Реактивна індуктивна потужність споживається з мережі як двигуном, так і генератором. Це забезпечує створення основного магнітного потоку. Це пояснюється тим, що необхідною умовою функціонування асинхронної машини як у двигунному, так і у генераторному режимі є наявність електромережі, що забезпечує машини реактивною потужністю для створення магнітного поля.

Визначення електричних та механічних втрат у випробувальному стенді

Випробувальний стенд може бути поданий заступною схемою, рис. 4, де активно-індуктивний опір фази двигуна подано еквівалентними елементами R , X . Розглянемо випадок під'єднання до електромережі тільки двигуна М1, при цьому обмотка двигуна М2 відключена. Тоді активна потужність, що споживається фазами двигуна М1, витрачається на покриття електричних втрат в двигуні та механічних втрат в обох двигунах та механічній передачі. З використанням еквівалентного опору R_1 фази двигуна М1 баланс активної потужності становить:

$$P_{1a} + P_{1b} + P_{1c} = R_1[I_{1a}^2 + I_{1b}^2 + I_{1c}^2] + P_m, \quad (2.8)$$

де P_{1a} , P_{1b} , P_{1c} – активні потужності, що споживаються фазами А, В, С двигуна М1 в разі відключеного стану М2; I_{1a} , I_{1b} , I_{1c} – діючі значення струмів фаз двигуна М1; P_m – втрати в механічній частині стенда (у механічних частинах М1, М2 та механічній передачі).

У випадку функціонування тільки двигуна М2 баланс активної потужності становить:

$$P_{2a} + P_{2b} + P_{2c} = R_2[I_{2a}^2 + I_{2b}^2 + I_{2c}^2] + P_m. \quad (2.9)$$

У випадку підключення до мережі обох двигунів:

$$P_{3a} + P_{3b} + P_{3c} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} [I_{3a}^2 + I_{3b}^2 + I_{3c}^2] + P_m. \quad (2.10)$$

З рівнянь (2.8) та (2.9) виразимо еквівалентні опори R_1 , R_2 , а рівняння (2.10) подамо у вигляді неявної функції від P_m , тоді:

$$R_1 = \frac{P_{1a} + P_{1b} + P_{1c} - P_m}{I_{1a}^2 + I_{1b}^2 + I_{1c}^2}; \quad (2.11)$$

$$R_2 = \frac{P_{2a} + P_{2b} + P_{2c} - P_m}{I_{2a}^2 + I_{2b}^2 + I_{2c}^2}; \quad (2.12)$$

$$F(P_m) = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} [I_{3a}^2 + I_{3b}^2 + I_{3c}^2] + P_m - P_{3a} - P_{3b} - P_{3c} = 0. \quad (2.13)$$

Значення втрат P_m в механічній частині стенда може бути обчислено як корінь функції (2.13) з урахуванням виразів (2.11) та (2.12). Електричні втрати в двигуні можуть бути оцінені з використанням еквівалентного опору як:

$$\Delta P = 3I^2 R. \quad (2.14)$$

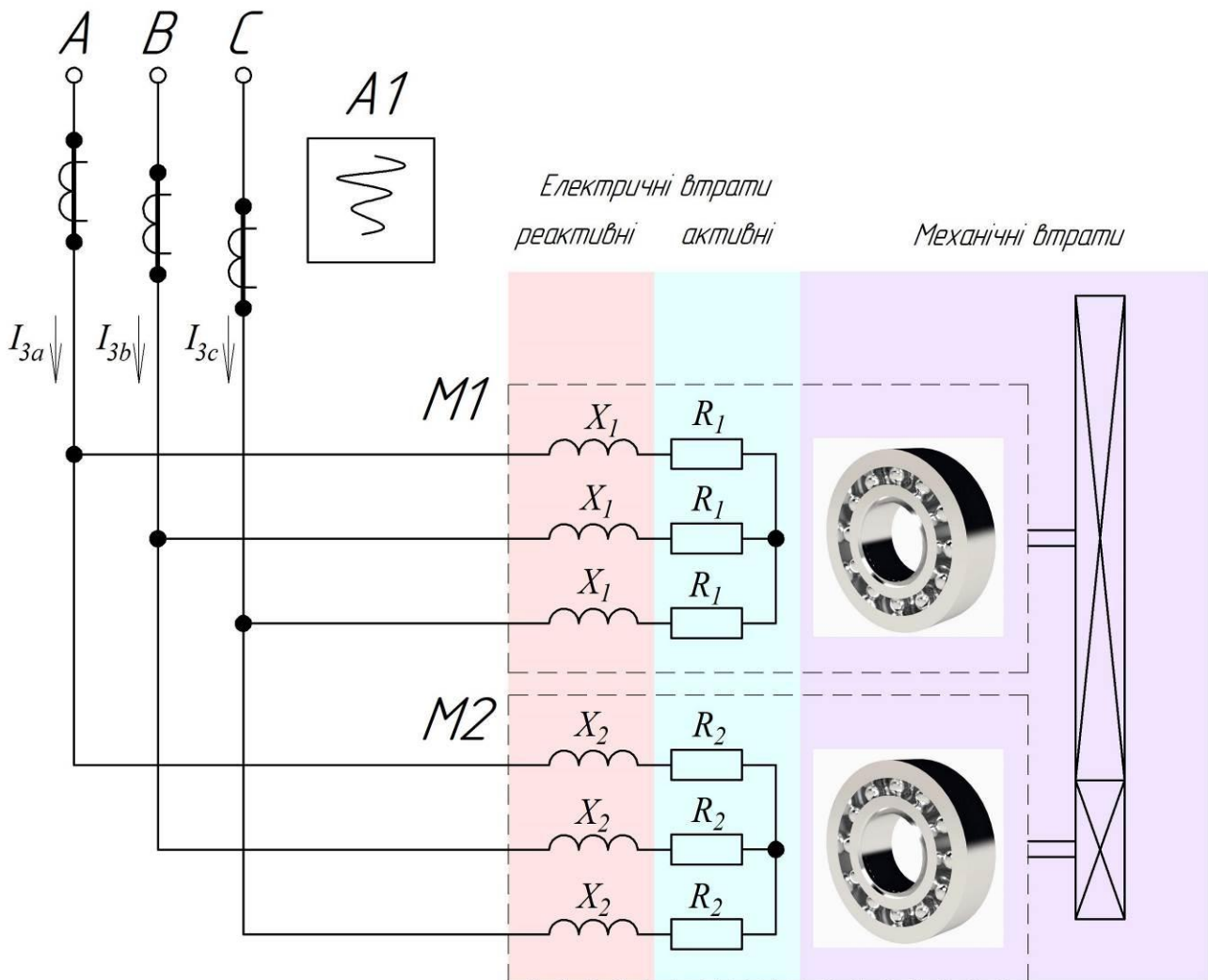


Рисунок 2.4 – Заступна схема випробувального стенда для визначення електричних та механічних втрат

ЛАБОРАТОРНЕ УСТАТКУВАННЯ

Лабораторна робота проводиться з використанням лабораторного стенда, що розміщений в ауд. 508. Для проведення роботи використовується наступне обладнання.

1. Система двох асинхронних машин, що з'єднані за допомогою ремінної передачі, рис. 2.5. Машина M1 працює у двигунному режимі, M2 – у генераторному. Значення параметрів машин наведено у табл. 2.1.

2. Шафа керування двома двигунами, рис. 2.6.

3. Мікропроцесорний реєстратор параметрів РПМ-416, рис. 2.7, у складі ПР-11, що використовується для вимірювання значень параметрів у загальній частині мережі.

ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

Лабораторна робота виконується з використанням наступного програмного забезпечення:

1. Програма RPM-416 Data Analysis для контролю і налаштування реєстратора електричних параметрів РПМ-416 по протоколу зв'язку Modbus TCP, <https://novatek-electro.com/programne-zabezpechennya/rpm-416-data-analysis.html>

2. Програма Advanced IP Scanner для сканування мережі <https://www.advanced-ip-scanner.com/ua/>

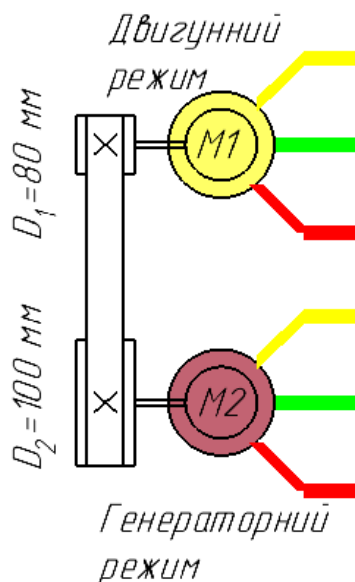


Рисунок 2.5 – Механічне з'єднання асинхронного двигуна та генератора

Таблиця 2.1

Значення параметрів асинхронних машин, що використовуються для дослідів

Двигун	Тип	n_c об/хв	P_n кВт	s %	η %	$\cos\varphi$	$\frac{M_{max}}{M_n}$	$\frac{M_n}{M_n}$	$\frac{I_n}{I_n}$
M1	A0/12-11-4У3	1500	0,6	10,0	72,0	0,76	2,2	1,8	7,0
M2	A0/12-11-6У3	1000	0,4	9,0	68,0	0,65	2,2	1,8	6,5

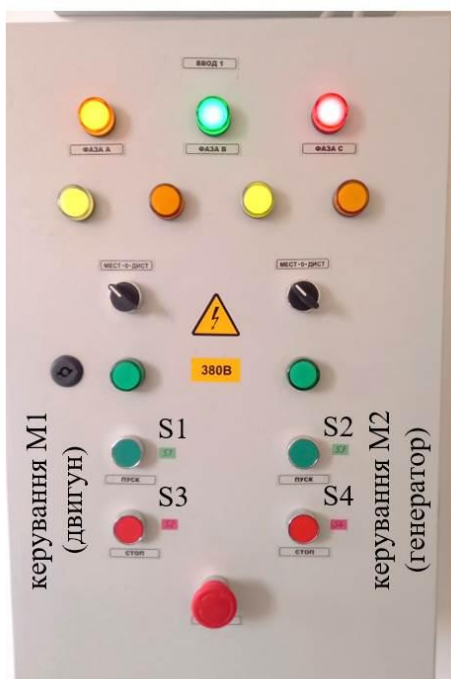


Рисунок 2.6 – Шафа керування двома двигунами



Рисунок 2.7 – Мікропроцесорний реєстратор параметрів РПМ-416

ЗАВДАННЯ

На основі вимірювань проаналізувати електричні втрати потужності в двигунах та механічні втрати в лабораторному стенді.

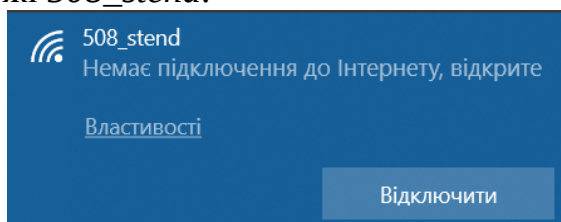
ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

Складання схеми лабораторного стенда

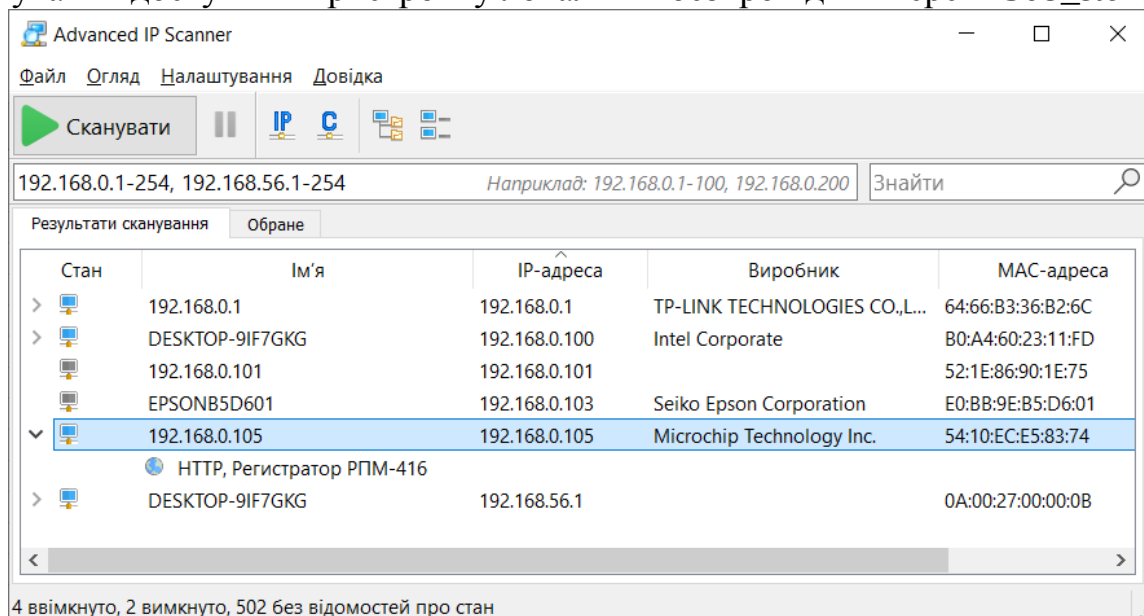
1. Зібрати схему лабораторної установки відповідно до рис. 2.8. Зробити фото лабораторної установки для додавання до звіту.
2. Показати зібрану схему викладачеві.

Підключення до реєстратора за безпроводною мережею

3. Тільки з дозволу викладача подати напругу на лабораторний стенд: ввімкнути автоматичний вимикач ЩРН та автоматичний вимикач QF0 у складі ПР-11.
4. На ноутбучі оновити перелік доступних безпроводних мереж, підключитися до мережі 508_stend.



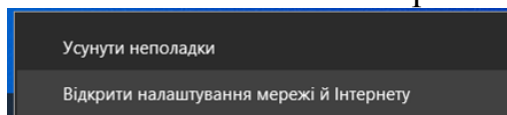
5. Запустити програму Advanced IP Scanner з метою пошуку IP-адреси реєстратора. В головному вікні програми натиснути кнопку Старт для сканування доступних пристроїв у локальній безпроводній мережі 508_stend.



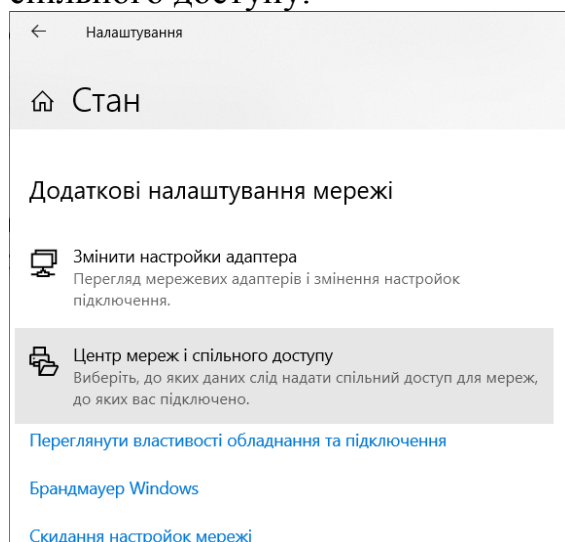
Також IP-адреса та MAC-адреса реєстратора доступні у меню пристрою. Для відображення цих даних на екрані необхідно за допомогою кнопок керування пристроєм зайти до «Меню»—«Мережа»—«TCP-IP»—«Стан».

6. Для коректної роботи програми «РПМ-416 Аналізатор даних» необхідно, щоб комп'ютер та пристрій знаходилися в одній локальній мережі. Для цього необхідно явно задати IP-адресу та маску мережі комп'ютера.

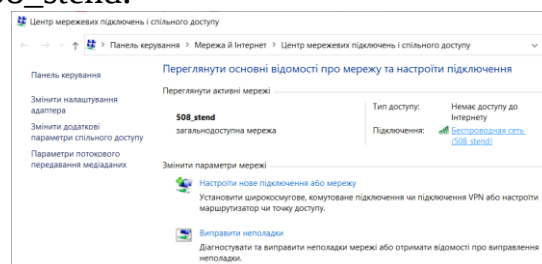
В правому нижньому кутку екрану на значку безпроводної мережі  необхідно натиснути правою кнопкою миші і вибрати пункт меню:



Відкрити Центр мереж і спільного доступу:



Натиснути на назві мережі 508_stend:



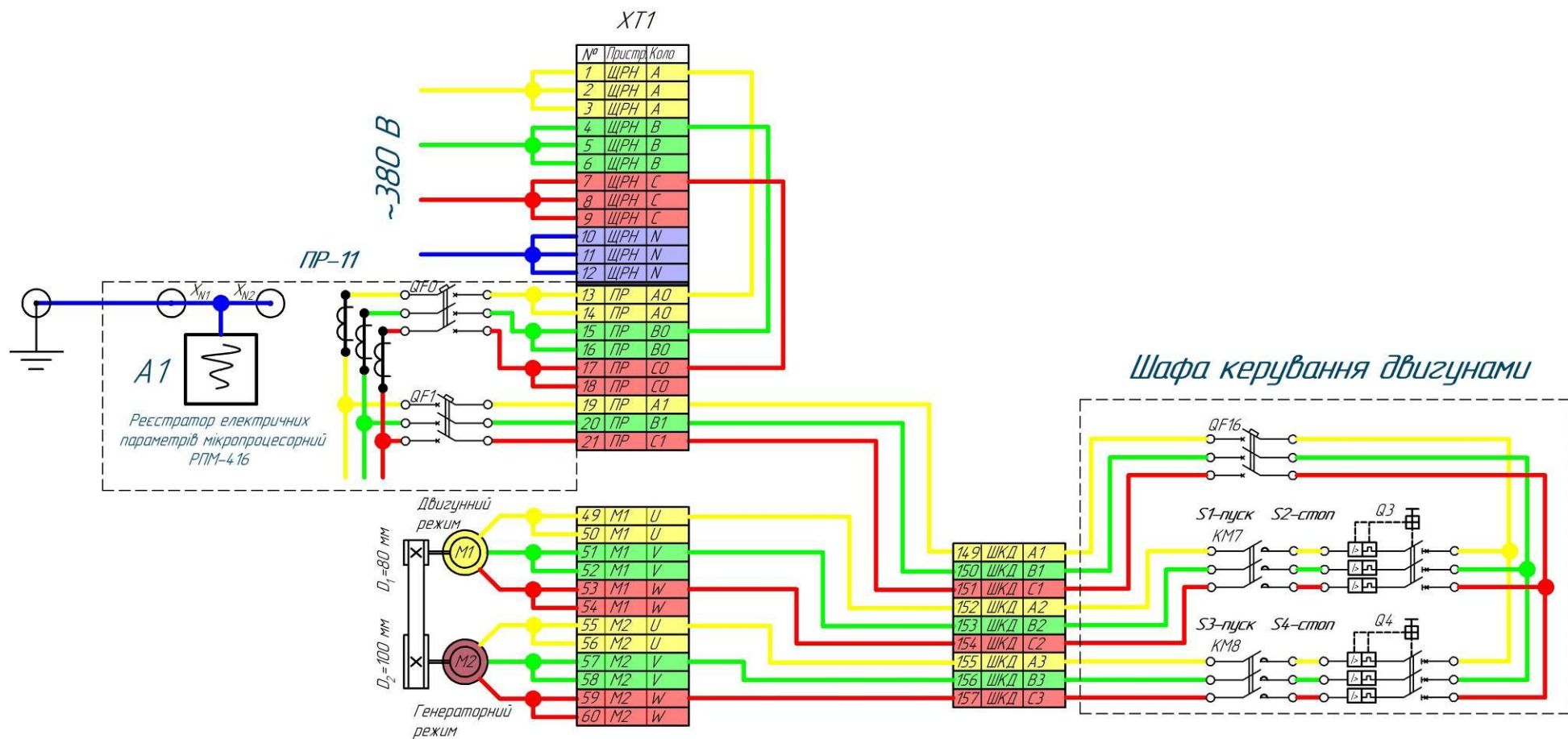
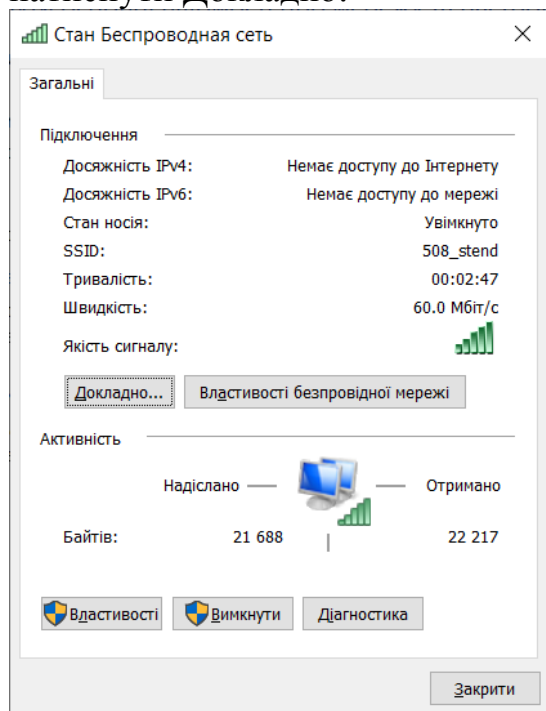
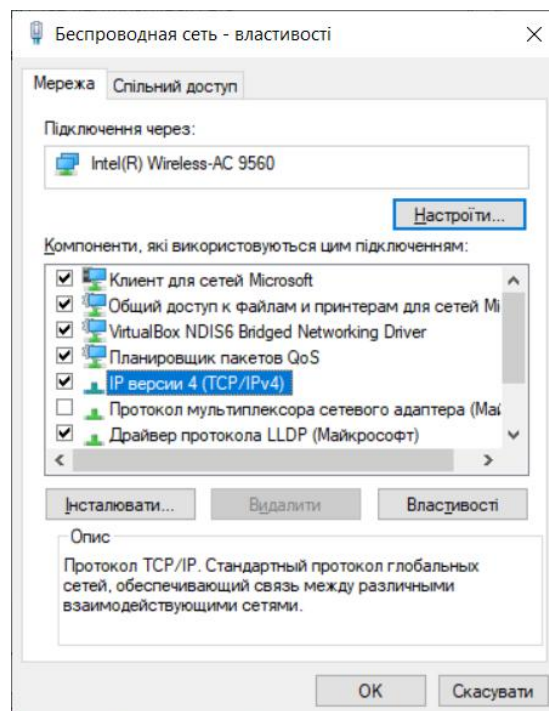


Рисунок 2.8 – Схема з'єднань лабораторного обладнання в ауд. 508 для дослідження функціонування двигунного навантаження

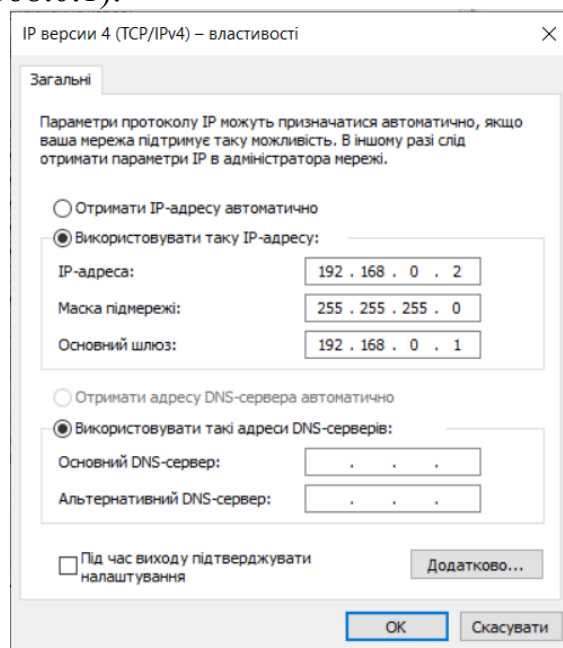
У вікні стану підключення натиснути Докладно:



Обрати TCP/IPv4 і натиснути Властивості:



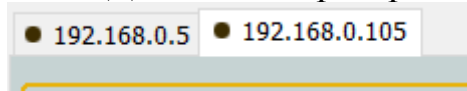
Відмітити «Використовувати таку IP-адресу». Ввести IP-адресу, що не співпадає з наявними в локальній мережі, маску підсистеми (255.255.255.0) та основний шлюз (192.168.0.1):



7. Запустить программу «РПМ-416 Анализатор данных». Натиснути кнопку додавання нового пристрою.

8. Ввести IP-адресу реєстратора. Номер порта змінювати не треба. Можна ввести власну назву пристрою. Заводський пароль admin

Після натискання кнопки Додати для пристрою буде створена вкладка:



Знаходячись на створеній вкладці, необхідно натиснути кнопку «Підключитися».

На екрані мають відображатися значення робочих параметрів, що вимірюються реєстратором.

9. Ввімкнути автоматичний вимикач QF1 у складі ПР-11.

10. На шафі керування двигунами натиснути кнопку S1, що запустить двигун M1.

11. Зберегти вигляд вікна програми «Аналізатор даних», задати ім'я файлу «M1_дослід1.jpg».

12. Вимкнути двигун M1 шляхом натискання кнопки S3.

13. Ввімкнути двигун M2 шляхом натискання кнопки S2.

14. Зберегти вигляд вікна програми «Аналізатор даних», задати ім'я файлу «M2_дослід1.jpg».

15. Ввімкнути двигун M1, натиснувши кнопку S1. Таким чином в роботі знаходяться обидва двигуна.

16. Зберегти вигляд вікна програми «Аналізатор даних», задати ім'я файлу «M1_M2_дослід1.jpg».

17. Відключити двигуни, натискаючи кнопки S3, S4.

18. Повторити пп. 10–17 для дослідів 2–5, зберігаючи файли з іменами «...дослід2.jpg»– «...дослід5.jpg».

19. Відключити автоматичні вимикачі у складі ПР-11. Відключити автоматичний вимикач ЩНР.

20. Закрити програму «Аналізатор даних».

21. Відкрити вікно властивостей TCP/IPv4 та перевести перемикач в положення «Отримувати IP-адресу автоматично».

ОБРОБЛЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДАНИХ

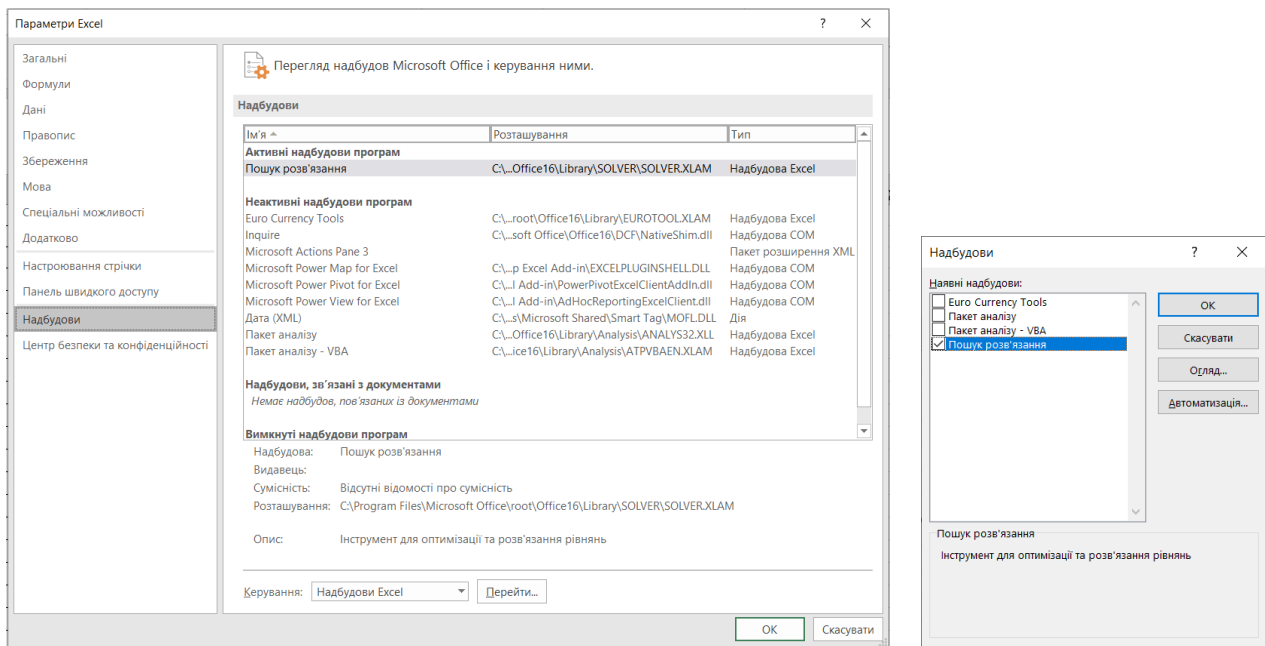
22. Створити таблицю Excel за зразком табл. 2.2.

23. В Excel підключити надбудову «Пошук розв'язання». Для цього зайти в меню Файл–Параметри, обрати вкладку «Надбудови», в рядку Керування натиснути кнопку Перейти та відмітити пункт «Пошук розв'язання». Вказана надбудова з'явиться в переліку активних.

24. Занести до табл. 2.2 (рядки 4–21) результати вимірювань зі збережених файлів.

25. До комірок C23–G23 занести початкові значення для втрат механічної потужності. Наприклад, 100.

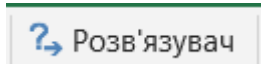
26. До комірок C24–G24 внести формули відповідно до виразу (2.11).



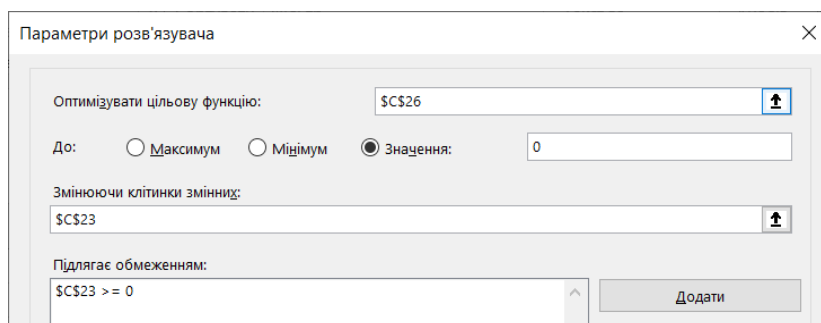
27. До комірок C25–G25 внести формули відповідно до виразу (2.12).

28. До комірок C26–G26 внести вираз функції (2.13).

29. Для кожного з дослідів з використанням надбудови «Пошук розв'язання» знайти корінь функції $F(P_m) = 0$, що відповідає втратам в механічній частині. Для цього необхідно в меню Дані вибрати пункт



. В діалоговому вікні налаштувати параметри розв'язувача. Наприклад, для дослідів 1 параметри наступні:



Після натискання кнопки «Розв'язати» корінь буде знайдено.

30. В комірках рядків 27–32 необхідно обчислити математичні сподівання та стандартні відхилення для параметрів P_m , R_1 , R_2 .

31. Побудувати графіки залежностей електричних втрат в кожному з двигунів від струму відповідно до (2.14).

Таблиця 2.2

Результати вимірювань та розрахунків (таблиця в Excel)

	A	B	C	D	E	F	G
1	Режим	Параметр	Дослід №				
2			1	2	3	4	5
3			Виміряно				
4	M1	I_{1a}, A					
5		I_{1b}, A					
6		I_{1c}, A					
7		$P_{1a}, B\tau$					
8		$P_{1b}, B\tau$					
9		$P_{1c}, B\tau$					
10	M2	I_{2a}, A					
11		I_{2b}, A					
12		I_{2c}, A					
13		$P_{2a}, B\tau$					
14		$P_{2b}, B\tau$					
15		$P_{2c}, B\tau$					
16	M1+M2	I_{3a}, A					
17		I_{3b}, A					
18		I_{3c}, A					
19		$P_{3a}, B\tau$					
20		$P_{3b}, B\tau$					
21		$P_{3c}, B\tau$					
22			Розраховано				
23	$P_m, B\tau$		100	100	100	100	100
24	R_1, Ω						
25	R_2, Ω						
26	$F(P_m)=$						
27	$m[P_m], B\tau$						
28	$s[P_m], B\tau$						
29	$m[R_1], \Omega$						
30	$s[R_1], \Omega$						
31	$m[R_2], \Omega$						
32	$s[R_2], \Omega$						

Вміст звіту з лабораторної роботи

1. Тема, мета роботи.
2. Основні відомості щодо улаштування випробувального стенда.
3. Основні залежності, що використовувалися для визначення електричних та механічних втрат у випробувальному стенді.
4. Фотографія лабораторного стенда.
5. Вигляд вікна «Аналізатор даних» для одного з дослідів.
6. Заповнену табл. 2.2 з результатами вимірювань та розрахунків.
7. Графіки залежностей електричних втрат в кожному з двигунів від струму відповідно до (2.14).
8. Висновки.

Контрольні запитання

1. Накресліть енергетичну діаграму асинхронного двигуна. Поясніть, які втрати супроводжують функціонування асинхронного двигуна.
2. Поясніть розподіл потужностей випробувального стенда відповідно до рис. 3.
3. З використанням механічної характеристики асинхронного двигуна поясніть умови переходу двигуна до генераторного режиму роботи.
4. Яким чином визначається ковзання асинхронного двигуна?
5. В якому стані знаходиться двигун при $s=1$, $s=0$, $s=-0.1$?
6. Що показує стандартне відхилення нормально розподіленої випадкової величини?
7. В якому діапазоні знаходяться втрати P_m , відповідно до даних обчислень, з імовірністю 0,95?
8. Поясніть терміни «IP-адреса» та «MAC-адреса» цифрового мережевого пристрою.
9. Що позначає маска підмережі 255.255.255.0 ?
10. Для чого в лабораторній роботі використовується надбудова Excel «Пошук розв'язання»? Чи можна було одержати результат без використання такого інструмента? Яким чином?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 3

Дослідження режимів роботи двигунного навантаження у складі системи електропостачання за даними засобів вимірювальної техніки

Мета: навчитися аналізувати результати вимірювань для визначення режиму роботи навантаження у складі інтелектуальної СЕП.

КОРОТКІ ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

В якості двигунного навантаження аналізується навантажувальний стенд для випробувань приводних блоків конвеєрів, що описаний у попередній лабораторній роботі. Дослідити процеси в системі можна за векторною діаграмою, яка відображає співвідношення між фазами та величинами струмів та напруг. Під час роботи стенда одна з асинхронних машин функціонує в режимі двигуна, а інша – в режимі генератора. Нижче розглядаються векторні діаграми асинхронної машини при роботі в кожному з цих режимів. Об'єднання таких діаграм дає змогу одержати загальну векторну діаграму випробувального стенда.

Розглянемо схему заміщення фази асинхронної машини в статичному режимі (рис. 3.1), де позначено: U_1 – фазна напруга мережі; I_1 – струм фази статора; I_0 – струм холостого ходу; I_2' – приведений струм ротора; r_1 – активний опір статора; r_2' – приведений активний опір ротора; x_1 – індуктивний опір, що відповідає розсіянню статора; x_2' – приведений індуктивний опір, що відповідає розсіянню ротора; r_m, x_m – активний та індуктивний опори намагнічення машини; s – ковзання.

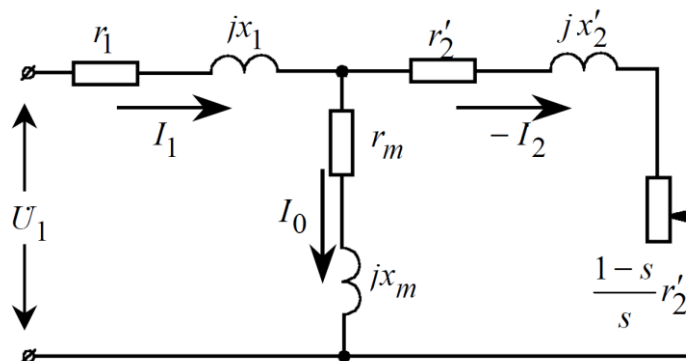


Рисунок 3.1 – Заступна схема асинхронної машини

При роботі в режимі двигуна обертове магнітне поле перетинає провідники статора та ротора в одному напрямку. Це обумовлює співпадіння за фазою електрорушійних сил (ЕРС) статора E_1 та ротора E_2 , рис. 3.2. При функціонуванні в режимі двигуна провідники статора та ротора перетинаються обертовим полем в протилежних напрямках. Це визначає зміну на протилежний ЕРС ротора (рис. 3.3).

Вираз для струму ротора має вигляд:

$$I_2' = \frac{E_2' s}{r_2' + jx_2' s} = \frac{E_2' r_2' s}{r_2'^2 + (x_2' s)^2} - j \frac{E_2' x_2' s^2}{r_2'^2 + (x_2' s)^2}. \quad (3.1)$$

З останньої залежності можна встановити, що перехід до генераторного режиму супроводжується зміною напрямку тільки активної складової струму ротора через зміну знаку моменту. Реактивна складова зберігає свій знак і при від'ємному ковзанні.

З векторної діаграми генератора (рис. 3.3) можна бачити, що між $\dot{U}_1$ та $\dot{I}_1$ кут зсуву фаз становить $\varphi_2 > \frac{\pi}{2}$. Це визначає причиною виникнення струму I_1 не напругу мережі, а електрорушійну силу E_1 .

Аналогічний висновок може бути зроблений на основі аналізу виразів для активної та реактивної потужностей. Вираз для електромагнітної (активної) потужності є наступним:

$$P_{em} = m_1 (I_2')^2 \frac{r_2'}{s} = \frac{m_1 U_1^2 \frac{r_2'}{s}}{\left(r_1 + \frac{r_2'}{s}\right)^2 + x_k^2} = \frac{m_1 U_1^2 r_2' s}{(r_1 s + r_2')^2 + (x_k s)^2}, \quad (3.2)$$

причому m_1 – число фаз обмотки статора; $x_k = x_1 + x_2'$ – індуктивний опір короткого замикання.

Залежність (3.2) дає змогу встановити, що при переході до генераторного режиму активна потужність змінює свій знак. Це визначає передачу потужності з вторинного кола (з ротора) до первинного (до статора), тобто генератор віддає активну потужність до електромережі.

Реактивна потужності вторинного контуру обчислюється як:

$$\begin{aligned} Q_2 &= m_1 U_1 I_2' \sin \varphi_2 = \frac{m_1 U_1^2}{\sqrt{\left(r_1 + \frac{r_2'}{s}\right)^2 + x_k^2}} \cdot \frac{x_k}{\sqrt{\left(r_1 + \frac{r_2'}{s}\right)^2 + x_k^2}} = \\ &= \frac{m_1 U_1^2 x_k s^2}{(r_1 s + r_2')^2 + (x_k s)^2}, \end{aligned} \quad (3.3)$$

де φ_2 – фазове зрушення між ЕРС і струмом ротора генератора.

Залежність (3.3) дозволяє встановити, що знак реактивної потужності зберігається незалежно від того, в якому режимі працює машина: двигунному або генераторному. Асинхронна машина як у двигунному, так і у генераторному режимі споживає реактивну потужність з мережі. Тобто генераторний режим є можливим тільки за наявності мережі, яка може постачати асинхронному генератору реактивну потужність, що необхідна для створення магнітного поля.

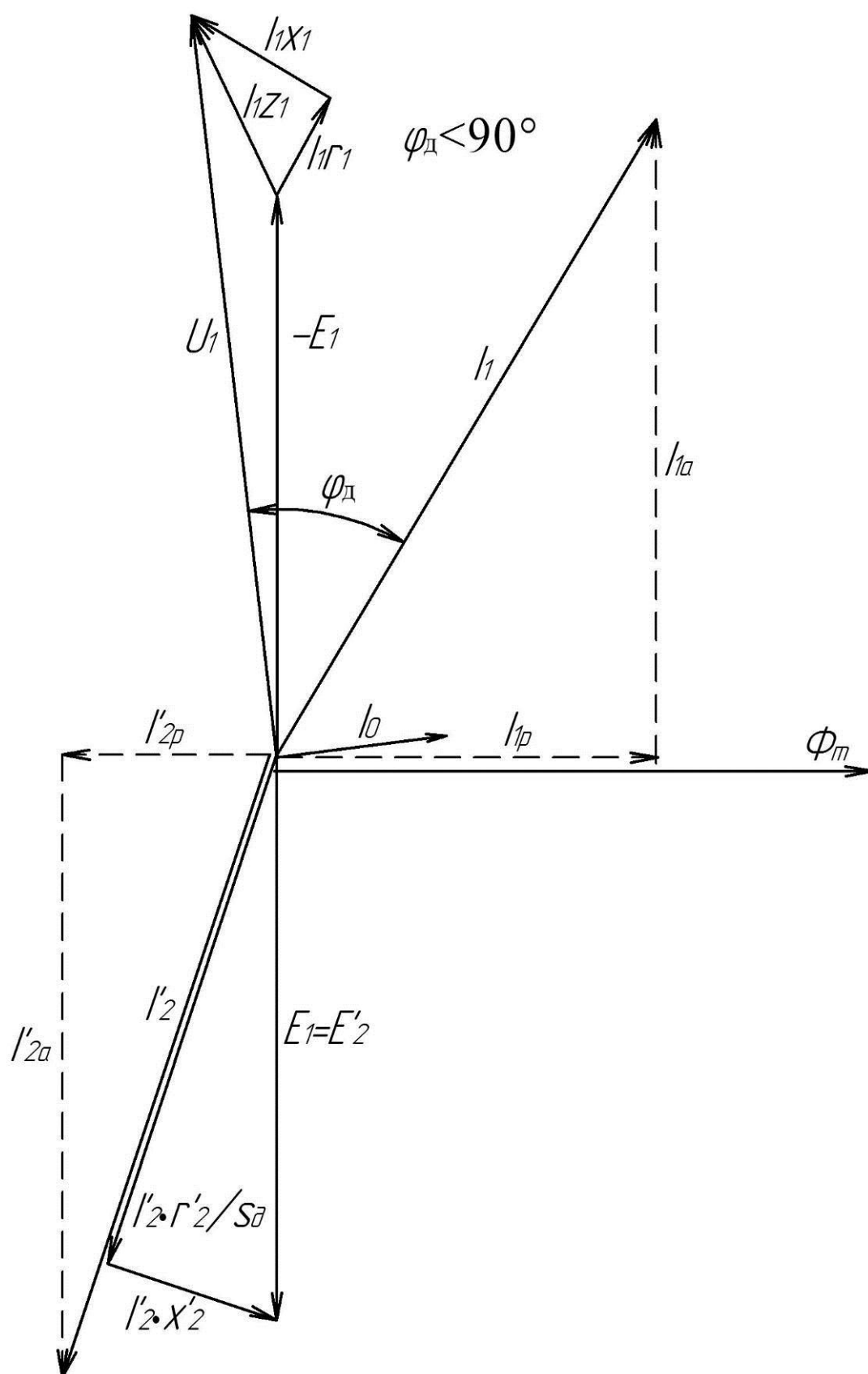


Рисунок 3.2 – Векторна діаграма асинхронного двигуна

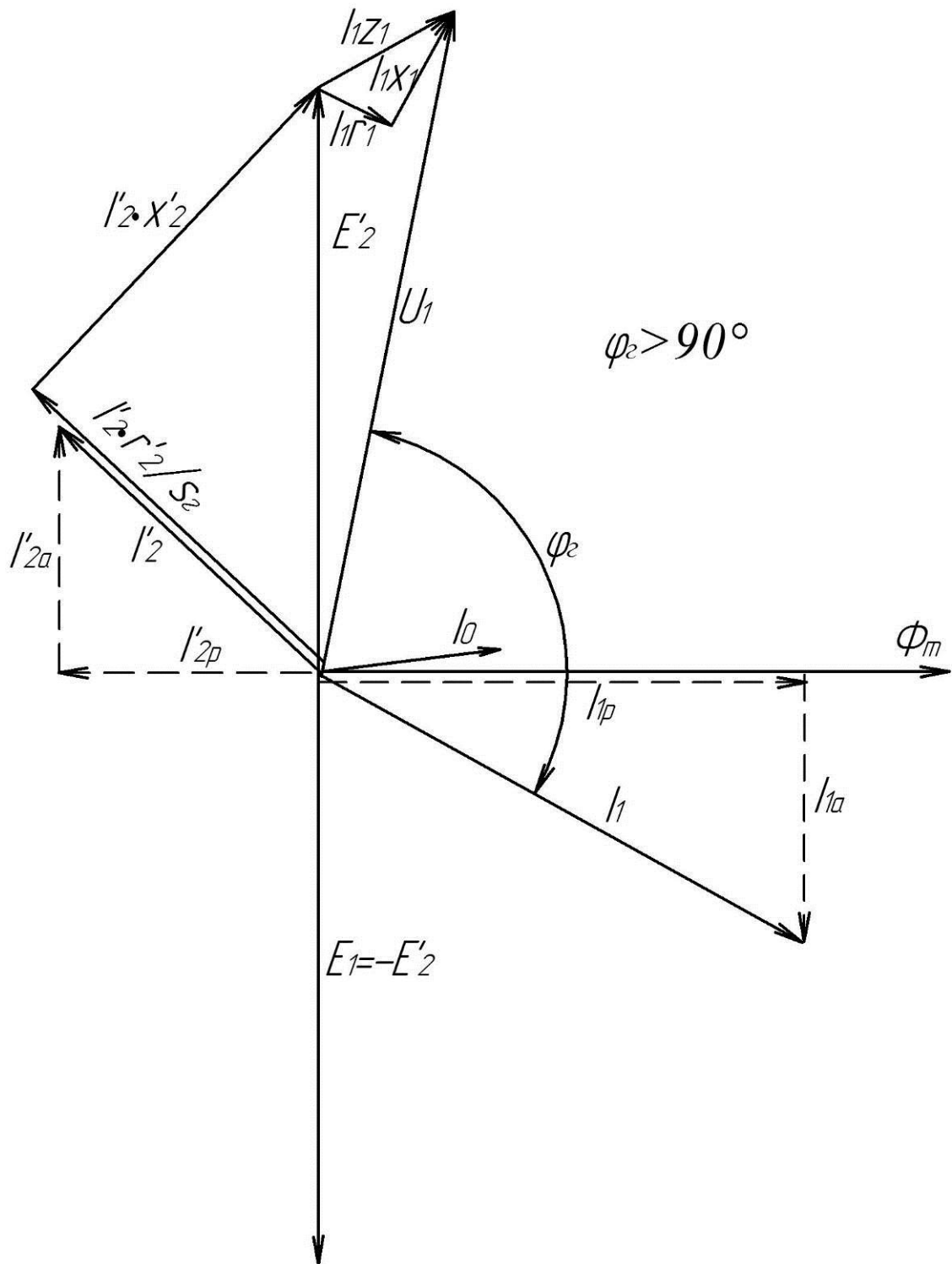


Рисунок 3.3 – Векторна діаграма асинхронного генератора

Узагальнена векторна діаграма випробувального стенда складається з векторних діаграм двигуна (рис. 3.2) та генератора (рис. 3.3). Такі діаграми суміщаються векторами напруг $\dot{U}_{1\partial}$ та $\dot{U}_{12}$ (рис. 3.4), оскільки машини під'єднуються до спільної мережі (рис. 3.5):

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_{1\partial} = \dot{U}_{12}. \quad (3.4)$$

Вектор струму у загальній частині мережі $\dot{I}_3$ дорівнює геометричній сумі вектора струму $\dot{I}_{1\partial}$ статора двигуна та вектором струму $\dot{I}_{12}$ генератора:

$$\dot{I}_3 = \dot{I}_{1\partial} + \dot{I}_{12}. \quad (3.5)$$

Рис. 3.6 ілюструє фрагмент узагальненої векторної діаграми, що показує фазові співвідношення між вектором напруги мережі $\dot{U}_1$ та векторами струмів $\dot{I}_{1\partial}$ та $\dot{I}_{12}$.

Аналіз наведеної векторної діаграми, що наведена на рис. 3.6, дозволяє встановити наступне.

1. Активні складові струму статора двигуна ($I_{1\partial a}$) та генератора (I_{12a}) знаходяться в протифазі, що визначає споживання двигуном та віддачу генератором активної потужності до загальної мережі. Активна складова загального струму визначається як:

$$I_{3,a} = I_{1\partial a} - I_{12a}, \quad (3.6)$$

що говорить про споживання системою активної потужності з загальної мережі лише для покриття втрат.

2. Реактивні складові струмів $I_{1\partial p}$ та I_{12p} знаходяться в фазі, причому:

$$I_{3,p} = I_{1\partial p} + I_{12p}, \quad (3.7)$$

що відображає споживання як двигуном, так і генератором реактивної потужності з мережі живлення для створення основного магнітного потоку.

3. Для фазових кутів двигуна (φ_∂), генератора (φ_2) та зсуву фаз у загальній мережі (φ_3) виконується співвідношення:

$$\varphi_\partial < \varphi_3 < \varphi_2, \quad (3.8)$$

що слідує з виразів (3.4) та (3.5).

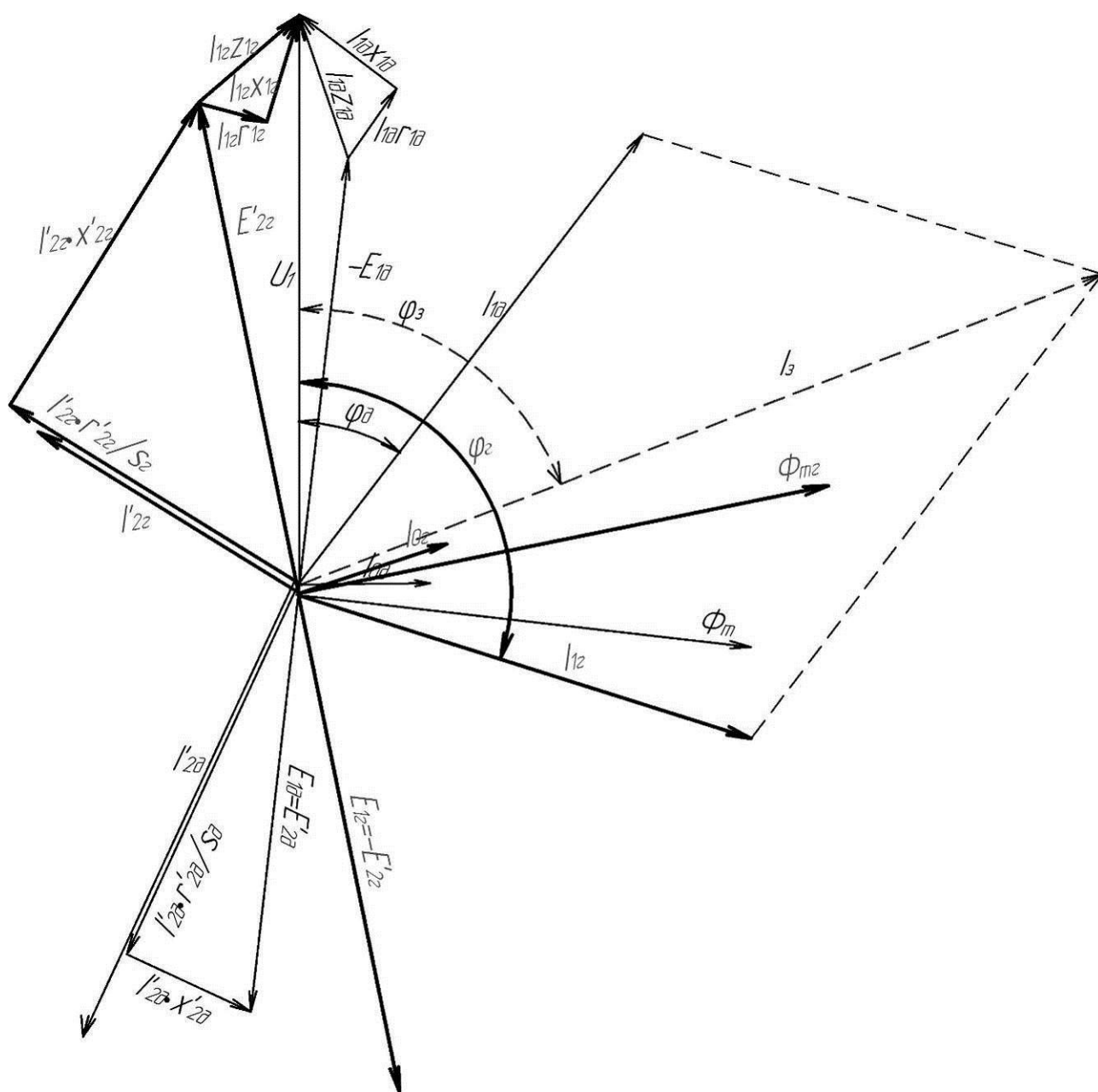


Рисунок 3.4 – Узагальнена вектора діаграма системи АДД–АДГ

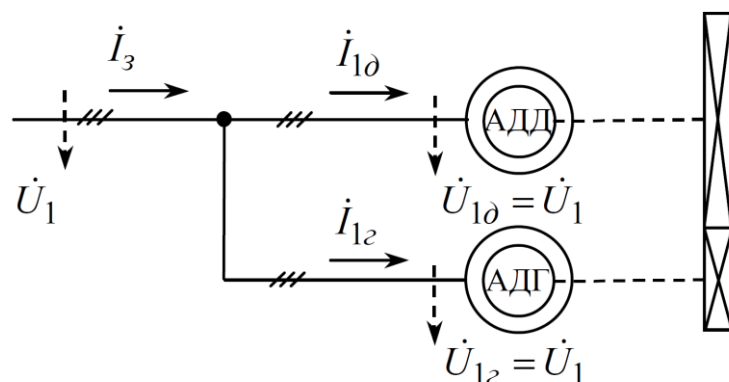


Рисунок 3.5 – Спрощена схема стенду, прийнята для побудови векторної діаграми

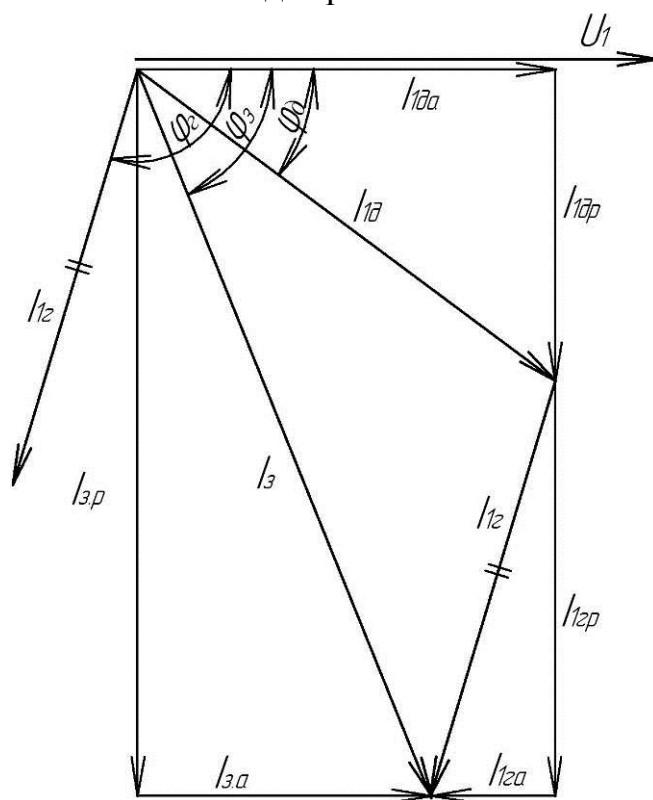


Рисунок 3.6 – Фрагмент узагальненої векторної діаграми системи

ЛАБОРАТОРНЕ УСТАТКУВАННЯ

Лабораторна робота проводиться з використанням лабораторного стенда, що розміщений в ауд. 508. Для проведення роботи використовується наступне обладнання.

1. Система двох асинхронних машин, що з'єднані за допомогою ремінної передачі, рис. 3.7. Машина М1 працює у двигунному режимі, М2 – у генераторному. Значення параметрів машин наведено у табл. 3.1.

2. Шафа керування двома двигунами, рис. 3.8.

3. Тахометри для вимірювання частоти обертання роторів двигунів, цифрові індикатори яких виведені на передню панель лабораторного стенда, рис. 3.9.

4. Панель з цифровими лічильниками електроенергії, рис. 3.10, що використовуються для вимірювання значень робочих параметрів двигунів.

5. Мікропроцесорний реєстратор параметрів РПМ-416, у складі ПР-11, що використовується для вимірювання значень параметрів у загальній частині мережі.

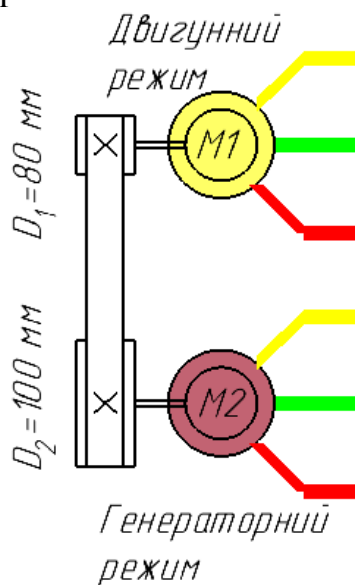


Рисунок 3.7 – Механічне з'єднання асинхронного двигуна та генератора

Таблиця 3.1

Значення параметрів асинхронних машин, що використовуються для досліду

Двигун	Тип	n_c об/хв	P_H кВт	s %	η %	$\cos\varphi$	$\frac{M_{max}}{M_H}$	$\frac{M_n}{M_H}$	$\frac{I_n}{I_H}$
M1	A012-11-4У3	1500	0,6	10,0	72,0	0,76	2,2	1,8	7,0
M2	A012-11-6У3	1000	0,4	9,0	68,0	0,65	2,2	1,8	6,5

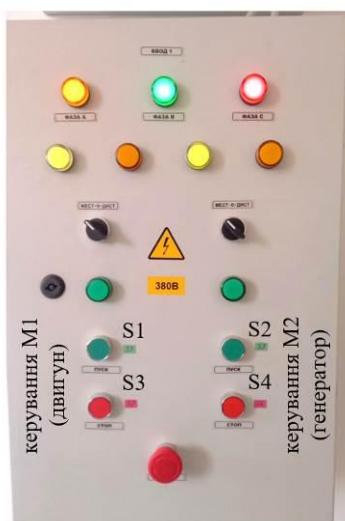


Рисунок 3.8 – Шафа керування двома двигунами

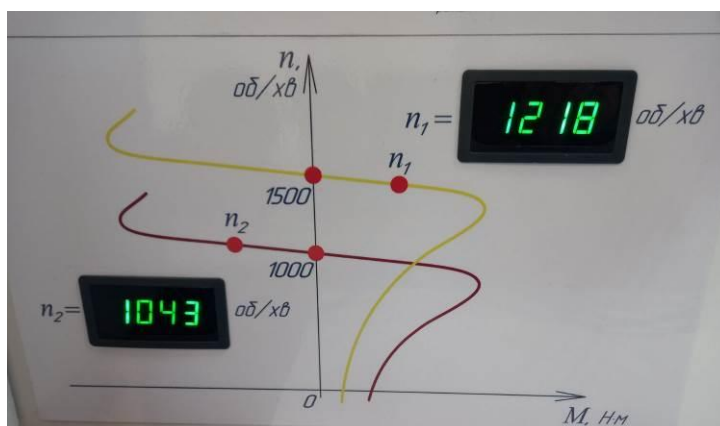


Рисунок 3.9 – Цифрові індикатори тахометрів

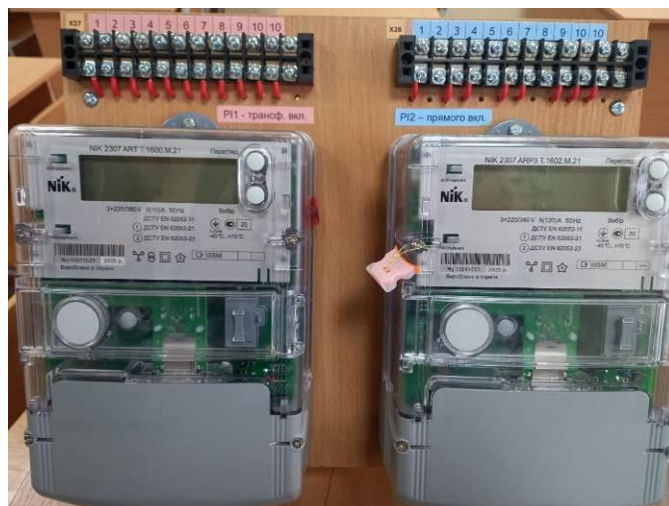


Рисунок 3.10 – Панель з цифровими лічильниками електроенергії, що використовується для вимірювань

ЗАВДАННЯ

На основі вимірювань параметрів електродвигунів лабораторного стенда проаналізувати особливості режимів їх роботи з використанням векторної діаграми.

ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

Складання схеми лабораторного стенда

1. Зібрати схему лабораторної установки відповідно до рис. 3.11. Загальний вигляд під'єднання панелі цифрових лічильників до стенда ілюструє рис. 3.12. Зробити фото лабораторної установки для додавання до звіту.
2. **Показати зібрану схему викладачеві.**

Підключення до реєстратора за Wi-Fi через браузер

3. **Тільки з дозволу викладача подати напругу на лабораторний стенд:** ввімкнути автоматичний вимикач ЩРН та автоматичний вимикач QF0 у складі ПР-11.
4. На ноутбучі оновити перелік доступних безпроводних мереж, підключитися до мережі 508_stend.
5. За допомогою програми Advanced IP Scanner або вбудованого меню визначити IP-адресу реєстратора.
6. У вікні інтернет-браузера перейти за IP-адресою реєстратора, наприклад: 192.168.0.105/auth.html.
7. Вказати пароль admin.
8. Перейти до вкладки «Вимірювання власні».

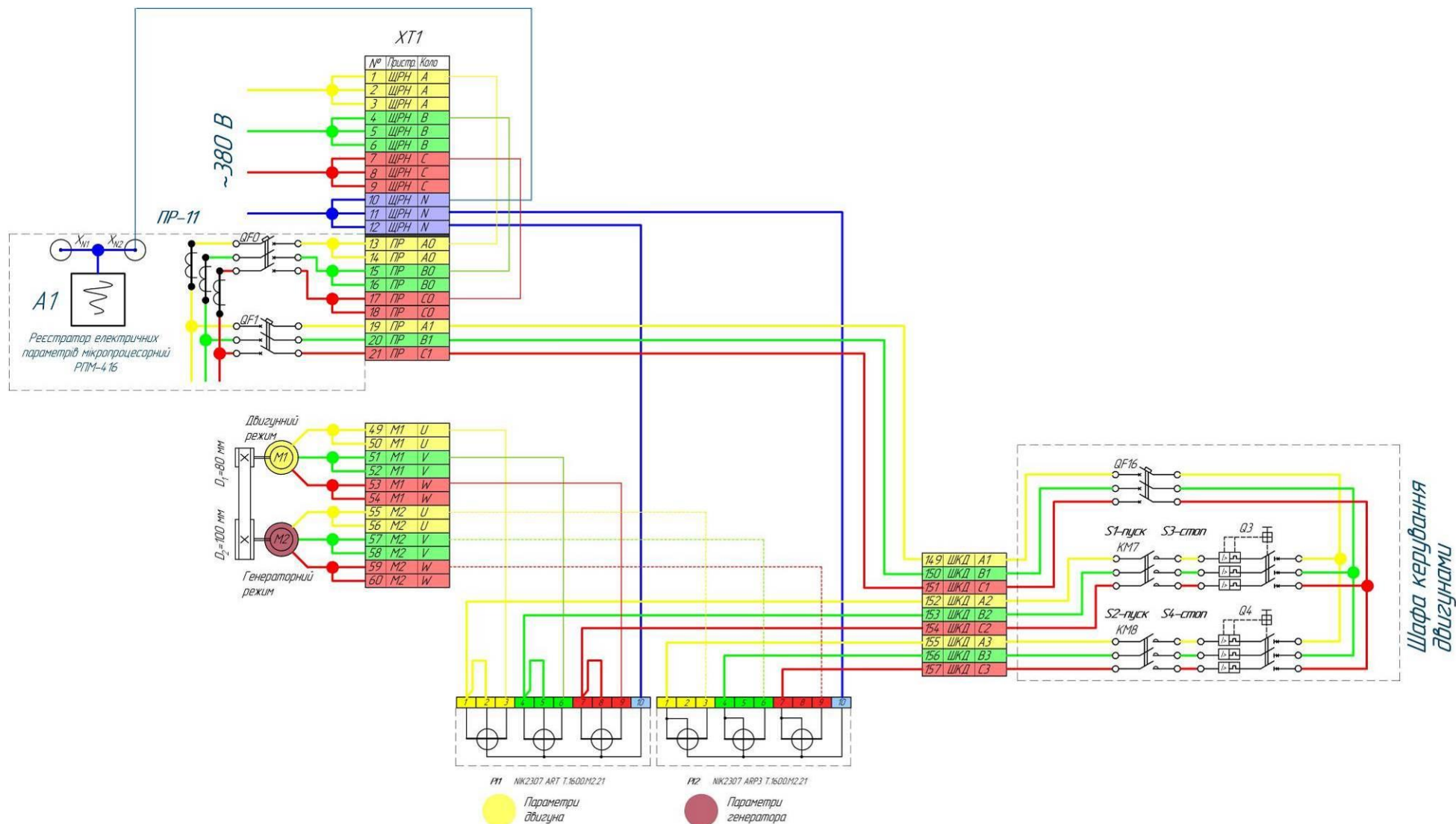


Рисунок 3.11 – Схема з'єднань лабораторного обладнання в ауд. 508 для проведення дослідів

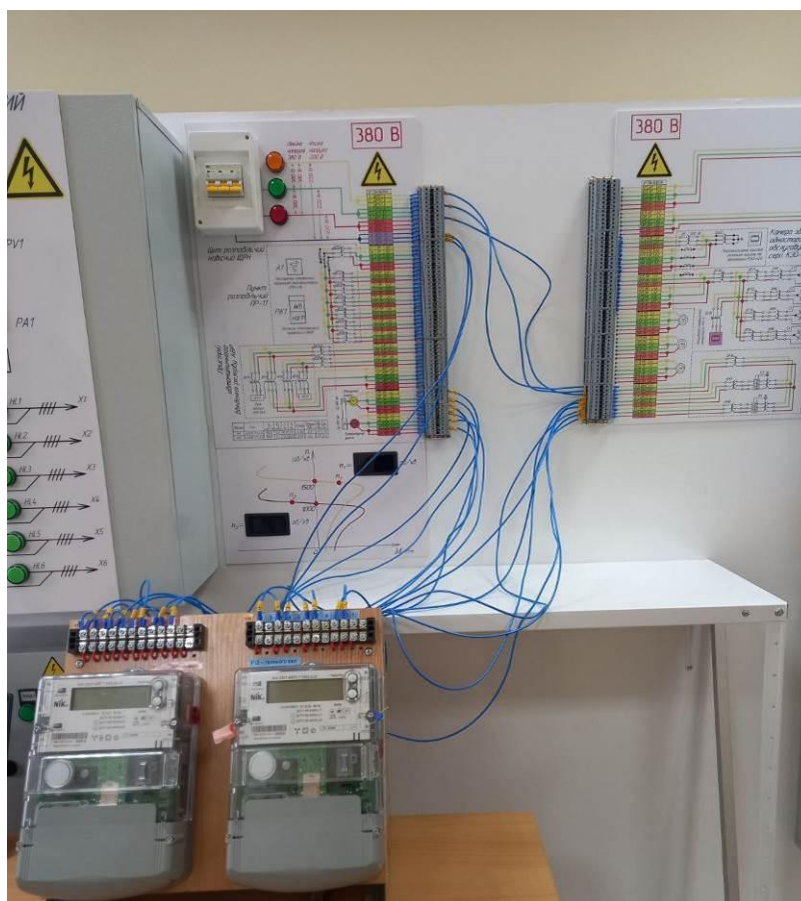


Рисунок 3.12 – Підключення панелі цифрових лічильників електроенергії до лабораторного стенда

Зняття показів вимірювальних приладів

9. Ввімкнути автоматичний вимикач QF1 у складі ПР–11, що подає напругу на шафу керування двигунами.

10. Ввімкнути двигуни M1, M2 за допомогою кнопок S1, S2 на шафі керування двигунами.

11. Занести до табл. 3.2. результати вимірювання частоти обертання за показами тахометрів. Для кожного двигуна необхідно записати по 5 вибірових значень.

Таблиця 3.2

Результати вимірювання частоти обертання за показами тахометрів

Параметр	M1	M2
Вибіркові значення частоти обертання двигуна, об/хв	$n_1 =$	$n_2 =$
	$n_1 =$	$n_2 =$
	$n_1 =$	$n_2 =$
	$n_1 =$	$n_2 =$
	$n_1 =$	$n_2 =$
Математичне сподівання частоти обертання двигуна, об/хв	$\bar{n}_1 =$	$\bar{n}_2 =$

Таблиця 3.3

Результати вимірювання параметрів двигунів цифровими лічильниками

Код OBIS	Параметр	PI1 (двигун M1)	PI2 (генератор M2)
Виміряно			
1.7.0	Активна потужність A+ (QI+QIV) сумарно по фазам, кВт	$P_{M1} =$	
21.7.0	Активна потужність A+ (QI+QIV) фази L1, кВт		
41.7.0	Активна потужність A+ (QI+QIV) фази L2, кВт		
61.7.0	Активна потужність A+ (QI+QIV) фази L3, кВт		
2.7.0	Активна потужність A- (QII+QIII) сумарно по фазам, кВт		$P_{M2} =$
22.7.0	Активна потужність A- (QII+QIII) фази L1, кВт		
42.7.0	Активна потужність A- (QII+QIII) фази L2, кВт		
62.7.0	Активна потужність A- (QII+QIII) фази L3, кВт		
31.7.0	Струм фази L1, А	$I_{L1} =$	$I_{L1} =$
51.7.0	Струм фази L2, А	$I_{L2} =$	$I_{L2} =$
71.7.0	Струм фази L3, А	$I_{L3} =$	$I_{L3} =$
33.7.0	Коефіцієнт потужності фази L1	$\cos \varphi_{Ma} =$	$\cos \varphi_{Ma} =$
53.7.0	Коефіцієнт потужності фази L2	$\cos \varphi_{Mb} =$	$\cos \varphi_{Mb} =$
73.7.0	Коефіцієнт потужності фази L3	$\cos \varphi_{Mc} =$	$\cos \varphi_{Mc} =$
3.7.0	Реактивна потужність R+ (QI+QII) сумарно по фазам, кВАр	$Q_{M1} =$	$Q_{M2} =$
23.7.0	Реактивна потужність R+ (QI+QII) фази L1, кВАр		
43.7.0	Реактивна потужність R+ (QI+QII) фази L2, кВАр		
63.7.0	Реактивна потужність R+ (QI+QII) фази L3, кВАр		
4.7.0	Реактивна потужність R- (QIII+QIV) сумарно по фазам, кВАр		
24.7.0	Реактивна потужність R- (QIII+QIV) фази L1, кВАр		
44.7.0	Реактивна потужність R- (QIII+QIV) фази L2, кВАр		
64.7.0	Реактивна потужність R- (QIII+QIV) фази L3, кВАр		
Обчислено			
$I_M = (I_{L1} + I_{L2} + I_{L3}) / 3, A$		$I_{M1} =$	$I_{M2} =$
$\cos \varphi_M = (\cos \varphi_{Ma} + \cos \varphi_{Mb} + \cos \varphi_{Mc}) / 3$		$\cos \varphi_{M1} =$	$\cos \varphi_{M2} =$

12. Покази цифрових лічильників занести до табл. 3.3.

13. У вікні браузера **натиснути кнопку Оновити**, зберегти вигляд екрана з даними вимірювань у графічний файл (або декілька файлів, або надрукувати вигляд веб-сторінки «Вимірювання власні» у pdf).

14. Відключити двигуни M1, M2 за допомогою кнопок S3, S4.

15. Відключити автоматичні вимикачі QF1, QF0 та ЩРН.

16. Занести покази реєстратора зі графічного файлу до табл. 3.4.

Таблиця 3.4

Результати вимірювання параметрів загальної частини мережі реєстратором

Виміряно		Обчислено	
$U_a, \text{В}$		$U = \frac{U_a + U_b + U_c}{3}, \text{В}$	
$U_b, \text{В}$			
$U_c, \text{В}$			
$I_a, \text{А}$		$I_{M12} = \frac{I_a + I_b + I_c}{3}, \text{А}$	
$I_b, \text{А}$			
$I_c, \text{А}$			
$P_a, \text{Вт}$		$P_{\text{em}} = P_a + P_b + P_c, \text{Вт}$	
$P_b, \text{Вт}$			
$P_c, \text{Вт}$			
$Q_a, \text{ВАр}$		$Q = Q_a + Q_b + Q_c, \text{ВАр}$	
$Q_b, \text{ВАр}$			
$Q_c, \text{ВАр}$			
$\cos \varphi_a$		$\cos \varphi_{M12} = \frac{\cos \varphi_a + \cos \varphi_b + \cos \varphi_c}{3}$	
$\cos \varphi_b$			
$\cos \varphi_c$			

5 ОБРОБЛЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДАНИХ

17. Виконати обчислення необхідних величин у табл. 3.2–3.4.

18. **Визначення режиму роботи двигунів за частотами обертання.** Порівняти математичні сподівання фактичних частот обертання M1 та M2 з синхронними частотами (табл. 3.1) та встановити режим роботи.

19. **Визначення втрат активної потужності.** Занести до табл. 3.5 виміряні значення, обчислити втрати активної потужності та порівняти їх з виміряною величиною.

20. **Визначення споживання реактивної потужності.** Занести до табл. 3.6 виміряні значення, обчислити споживання реактивної потужності та порівняти їх з виміряною величиною.

21. **Визначення фазових кутів.** Занести до табл. 3.7 виміряні значення коефіцієнтів потужності та обрахувати фазові кути.

22. **Побудова векторної діаграми струмів.** Занести до табл. 3.7 виміряні значення струмів. З використанням даних табл. 3.7 побудувати векторну діаграму випробувального стенду відповідно до зразка (рис. 3.6).

Таблиця 3.5

**Визначення втрат активної потужності в електричних машинах
та механічній передачі**

Активна потужність, що споживається двигуном М1 P_{M1} , Вт	Активна потужність, що віддається генератором М2 P_{M2} , Вт	Активні втрати в електричних машинах та механічній передачі, Вт		
		Розраховано $P'_{em} = P_{M1} - P_{M2}$	Виміряно реєстратором P_{em}	Відносна похибка $\delta = \frac{P_{em} - P'_{em}}{P_{em}} \cdot 100\%$

Таблиця 3.6

Визначення споживання реактивної потужності

Реактивна потужність, що споживається двигуном М1 Q_{M1} , ВАр	Реактивна потужність, що споживається генератором М2 Q_{M2} , ВАр	Споживання реактивної потужності, ВАр		
		Розраховано $Q'_{M12} = Q_{M1} + Q_{M2}$	Виміряно реєстра- тором Q_{M12}	Відносна похибка $\delta = \frac{Q_{M12} - Q'_{M12}}{Q_{M12}} \cdot 100\%$

Таблиця 3.7

Дані для побудови векторної діаграми

$\cos \varphi_{M1}$	φ_{M1} , град.	$\cos \varphi_{M2}$	φ_{M2} , град.	$\cos \varphi_{M12}$	φ_{M12} , град.
I_{M1} , А		I_{M2} , А		I_{M12} , А	

Вміст звіту з лабораторної роботи

1. Тема, мета роботи.
2. Фото лабораторної установки.
3. Заповнені табл. 3.2–3.4.
4. Аналіз режиму роботи двигунів за частотами обертання відповідно до п.18.
5. Заповнені табл. 3.5–3.7.
6. Векторна діаграма, що ілюструє фазові співвідношення між напругою та струмами випробувального стенда.
7. Висновки з аналізом одержаних результатів.

Контрольні запитання

1. Проаналізуйте заступну схему асинхронної машини, рис. 3.1. Які величини позначені на схемі? Яка їх фізична сутність?
2. Проаналізуйте векторну діаграму асинхронного двигуна, рис. 3.2. Поясніть порядок її побудови. Які величини показані на діаграмі? Поясніть положення векторів.
3. Проаналізуйте векторну діаграму асинхронного генератора, рис. 3.3. Поясніть порядок її побудови. Які величини показані на діаграмі? Поясніть положення векторів.
4. Проаналізуйте векторну діаграму функціонування асинхронного двигуна та генератора у складі випробувального стенда, рис. 3.4. Поясніть порядок її побудови. Які величини показані на діаграмі? Поясніть положення векторів.
5. Проаналізуйте фрагмент узагальненої векторної діаграми випробувального стенда, рис. 3.6. Поясніть, яким чином положення векторів струму відносно вектора напруги визначає напрямки активної та реактивної потужностей кожної електричної машини у схемі стенда.
6. Накресліть комплексну площину, позначте квадранти та проаналізуйте умови функціонування активно-реактивного навантаження при розташуванні вектора повної потужності в кожному квадранті.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №4

Дослідження роботи блоку АВР на основі пристрою управління резервним живленням AVR-02-G

Мета: ознайомитися з функціонуванням блоку автоматичного введення резерву, що побудований на основі мікропроцесорного пристрою управління резервним живленням.

КОРОТКІ ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Автоматичне введення резерву. Для підвищення надійності електропостачання споживачів використовують схеми живлення одночасно від декількох джерел. В якості джерел можуть використовуватися лінії від різних підстанцій, два трансформатори, трансформатор та дизель-генератор тощо. За наявності декількох (хоча би двох) джерел живлення відключення одного з них не порушує електропостачання споживачів.

Підключення споживачів до резервного джерела в разі відмови основного джерела здійснюють пристрої автоматичного введення резерву (АВР). Особливо актуальним є використання пристроїв АВР в схемах живлення споживачів I категорії. Пристрої АВР використовуються на трансформаторах, секційних вимикачах, лініях електропередачі, в схемах живлення двигунів тощо.

До пристроїв АВР висуваються наступні основні вимоги:

1. АВР приходить в дію в разі зникнення напруги на шинах споживачів. При цьому причини зникнення напруги можуть бути різними: помилкове або аварійне відключення силового вимикача, відмова робочого джерела живлення тощо.

2. Живлення до споживача від резервного джерела має подаватися з найменшою витримкою часу після відмови робочого джерела.

3. АВР має спрацьовувати тільки один раз, тобто його дія має бути однократною. Така вимога обумовлена необхідністю уникнути декількох ввімкнень резервного джерела на коротке замикання.

4. АВР не має спрацьовувати до моменту відключення робочого джерела. Це дозволяє уникнути ввімкнення резервного джерела на коротке замикання, яке має місце в схемі робочого джерела.

В якості прикладу розглянемо порядок роботи схеми АВР секційного вимикача для двотрансформаторної підстанції, рис. 4.1. Трансформатор Т1 живиться від джерела S1, Т2 – від S2. В нормальному режимі: від трансформатора Т1 через вимикач Q1 живиться перша секція збірних шин (1С); від Т2 через вимикач Q3 живиться друга секція збірних шин (2С); секційний вимикач Q5 відключений. Припустимо, з певної причини вимикач Q1 відключився. Тоді споживачі, які живляться від 1С, будуть знеструмлені. Для відновлення живлення до цих споживачів пристрій АВР має подати сигнал на ввімкнення секційного вимикача Q5. Після цього обидві секції збірних шин

будуть одержувати живлення від трансформатора T2. В разі відновлення роботи трансформатора T1, пристрій АВР відключає секційний вимикач Q5 та вмикає Q1.

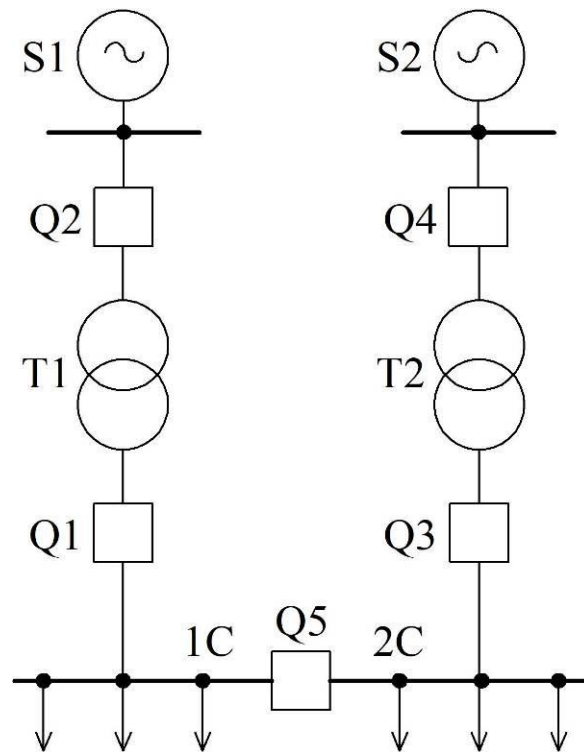


Рисунок 4.1 – Спрощена схема двотрансформаторної підстанції

Призначення та функції пристрою AVR-02-G. В лабораторній роботі розглядається функціонування пристрою AVR-02-G (рис. 4.2), який призначено для роботи у складі шаф (блоків) автоматичного введення резерву для трифазних споживачів електроенергії.



Рисунок 4.2 – Пристрій управління резервним живленням AVR-02-G

Пристрій АВР виконує наступні функції:

- автоматичне включення резервного живлення відповідно до заданого алгоритму (параметри алгоритму налаштовуються користувачем, зокрема – витримки часу);
- ручне керування комутаційними апаратами;
- індикація стану комутаційних апаратів;
- індикація наявності та параметрів напруги входів (чергування фаз, синфазність, верхній та нижній рівні напруги, обрив фази, асиметрія напруг);
- індикація режимів роботи;
- реалізація блокувань.

Пристрій AVR-02-G може забезпечувати реалізацію функцій АВР в наступних схемах електропостачання.

1. Схема N1+G, рис. 4.3, а. В такій схемі джерело N1 – робоче (наприклад, силовий трансформатор), джерело G – резервне (в якості якого може використовуватися генератор). В нормальному режимі комутаційний апарат Q1 ввімкнений, Q2 відключений. В разі зникнення напруги робочого джерела N1 через затримку часу T_z пристрій подає сигнал на відключення комутаційного апарату Q1. Через 3 с пристрій подає сигнал на запуск генератора G. Через витримку часу T_g , яка потрібна для запуску генератора, за умови знаходження напруги генератора в допустимих межах, пристрій подає сигнал на ввімкнення Q2. Завдяки цьому споживачі одержують живлення від генератора.

В разі відновлення напруги робочого джерела, через витримку часу T_g пристрій відключає Q2. Через витримку часу перемикання T_n пристрій вмикає Q1 і споживачі одержують живлення від робочого джерела N1.

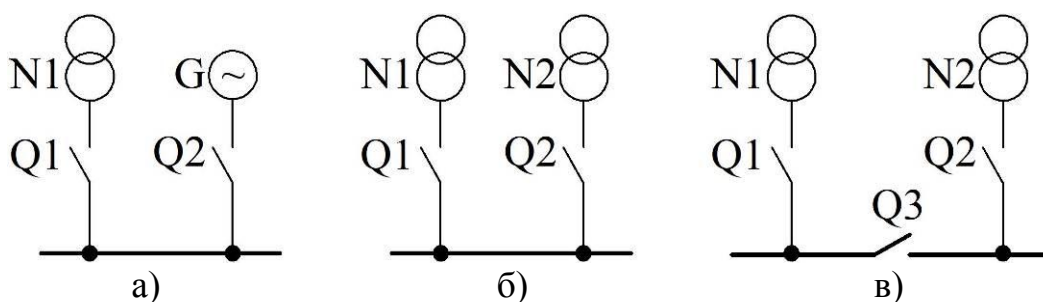


Рисунок 4.3 – Схеми систем електропостачання, в яких АВР забезпечується пристроєм AVR-02-G:

а – схема N1+G; б – схема N1+N2; в – схема N1+N2+S

2. Схема N1+N2, рис. 4.3, б. В такій схемі наявні два джерела живлення (наприклад, силові трансформатори): N1 – робоче, N2 – резервне. Робота схема аналогічна схемі N1+G, за виключенням того, що відсутня необхідність подавати сигнал на запуск генератора.

3. Схема N1+N2+S, рис. 4.3, в. В нормальному режимі джерела N1 та N2 подають живлення через комутаційні апарати Q1 та Q2 на відповідні секції збірних шин, секційний вимикач Q3 відключений.

Припустимо, що в момент часу t_1 зникає напруга U_{N1} робочого джерела N1. Через затримку часу T_3 , в момент $t_2 = t_1 + T_3$, пристрій АВР подає сигнал на відключення комутаційного апарату Q1, рис. 4.4. Через витримку часу перемикання T_n , в момент $t_3 = t_2 + T_n$, пристрій вмикає секційний вимикач Q3 і обидві секції шин живляться від джерела N2.

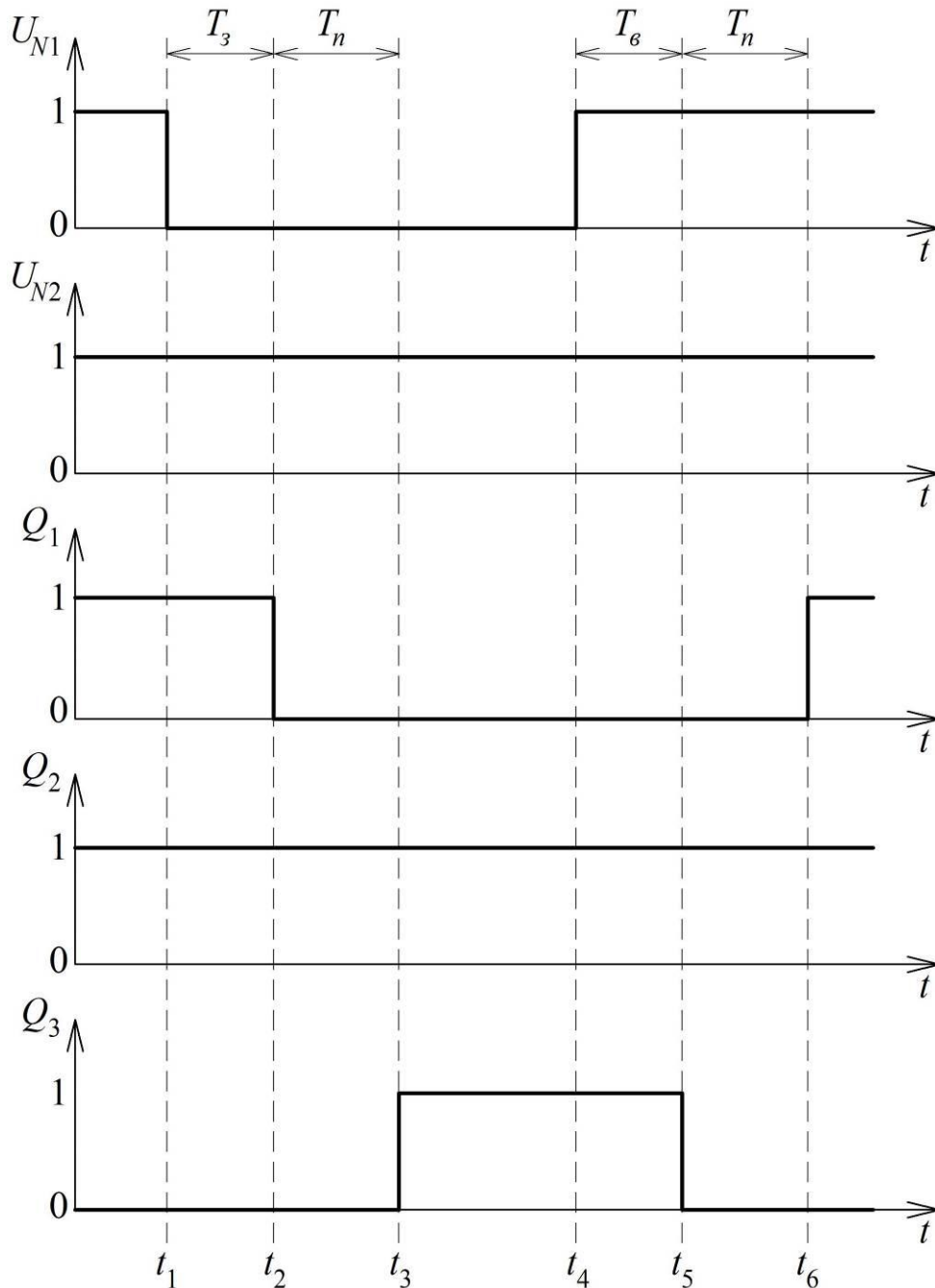


Рисунок 4.4 – Цикл спрацювання АВР для схеми N1+N2+S

Припустимо, що живлення від джерела N1 відновилося в момент t_4 . Тоді через витримку часу відновлення T_6 , в момент $t_5 = t_4 + T_6$, пристрій відключає

Q3. Через витримку часу перемикання T_n , в момент $t_6 = t_5 + T_n$, пристрій вмикає Q1 і нормальна схема живлення відновлюється, рис. 4.4.

В разі відмови джерела N2 комутації здійснюються аналогічним чином.

Вбудовані реле пристрою AVR-02-G. До складу пристрою входять наступні реле:

K1 – реле для керування вимикачем Q1, що подає живлення від джерела N1 (рис. 4.3);

K2 – реле для керування вимикачем Q2, що подає живлення від генератора G або джерела N2;

K3 – реле для керування секційним вимикачем Q3;

K4 – реле для подавання сигналу на запуск генератора G;

K5 – реле, що забезпечує безперебійність напруги U_0 живлення кіл управління та контролю.

Діюче значення змінної напруги U_0 має знаходитися в діапазоні від 100 В до 350 В. Принцип формування напруги U_0 та живлення нею кіл управління ілюструє спрощена схема на рис. 4.5.

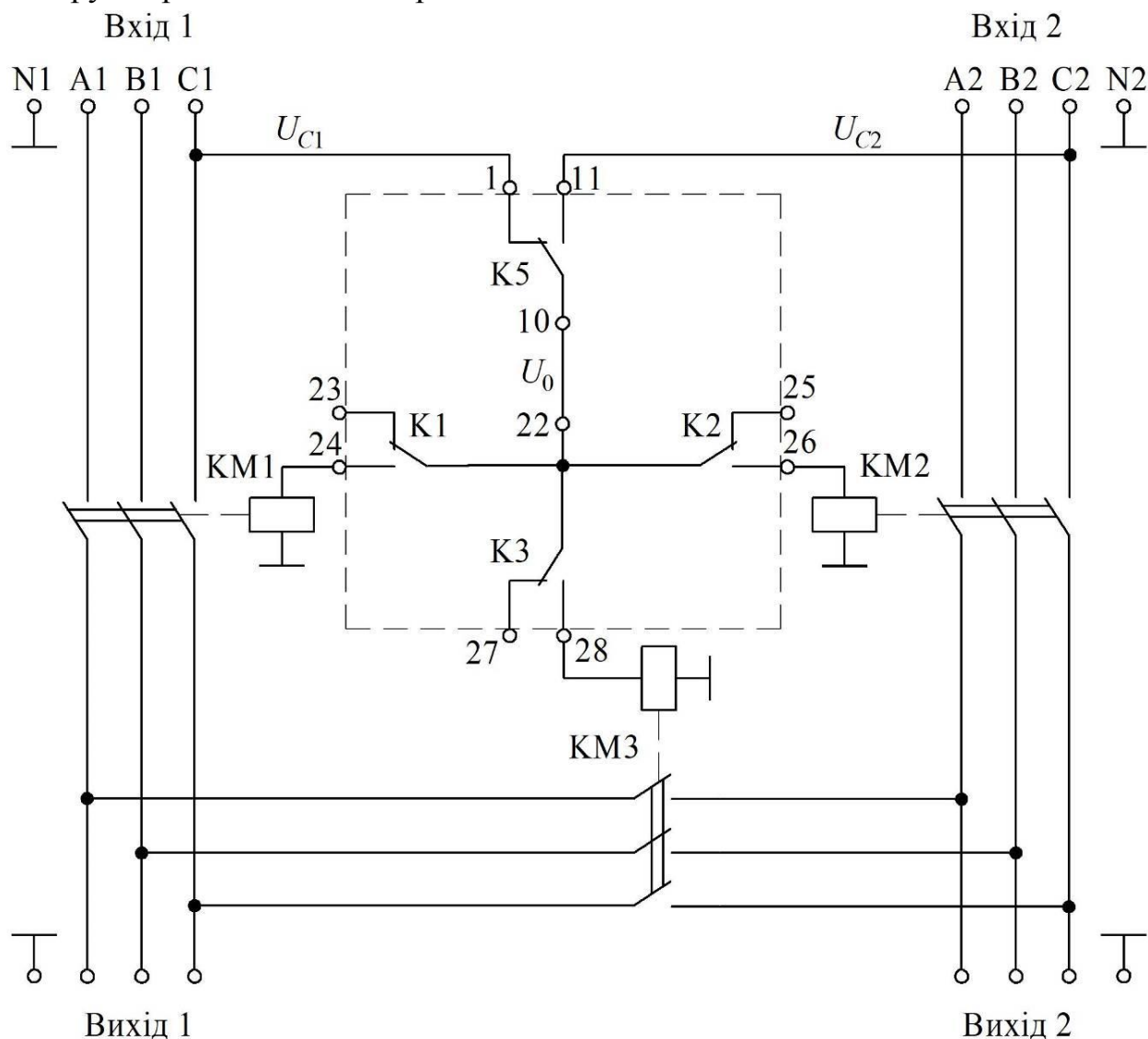


Рисунок 4.5 – Живлення напругою U_0 кіл управління

На схемі, рис. 4.5, функцію вимикача Q1 (рис. 4.3) виконує електромагнітний контактор КМ1, Q2 – КМ2, Q3 – КМ3. Нерухомі контакти вбудованого в пристрій реле К5 приєднані до фаз С двох джерел живлення: нормально-замкнений контакт (вивід 1 пристрою) – до фази С1 входу 1, нормально-розімкнений (вивід 11) – до фази С2 входу 2. Напруга U_0 на рухомому контакті реле К5 (вивід 10) дорівнюватиме U_{C1} в разі нормального стану реле К5, а при його спрацюванні – напрузі U_{C2} . Мікропроцесор керує реле К5 наступним чином: в разі наявності напруги на вході 1 реле К5 відключено, відповідно $U_0 = U_{C1}$. При зникненні напруги на вході 1 пристрій вмикає реле К5 і напруга $U_0 = U_{C2}$. Це забезпечує безперебійне живлення напругою U_0 кіл управління від одного з вводів. Вбудовані до пристрою реле К1–К3, що керуються мікроконтролером, подають напругу U_0 до котушок відповідних контакторів КМ1–КМ3.

Призначення виводів пристрою AVR-02-G. Виводи пристрою мають наступне призначення (рис. 4.6):

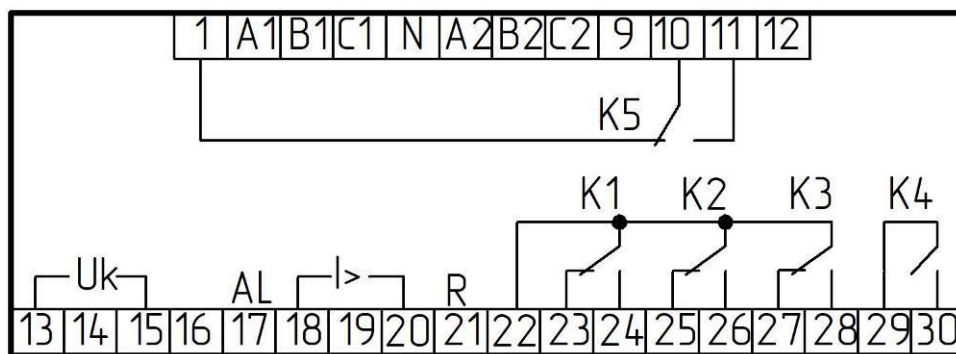


Рисунок 4.6 – Розташування виводів пристрою AVR-02-G

A1, B1, C1 – вхід 1 – фазні напруги джерела N1;

A2, B2, C2 – вхід 2 – фазні напруги джерела N2 (або G);

N – об'єднана нейтраль входів 1 та 2;

1, 10, 11 – виводи вбудованого реле К5;

22 – спільний вивід рухомих контактів вбудованих реле К1–К3;

23, 24 – нерухомі контакти вбудованого реле К1;

25, 26 – нерухомі контакти вбудованого реле К2;

27, 28 – нерухомі контакти вбудованого реле К3;

29, 30 – нормально-розімкнений контакт вбудованого реле К4, що призначений для подавання сигналу на запуск генератора;

12 – підключення зовнішнього джерела живлення (+12 В), що використовується в схемі з генератором G; загальний вивід джерела 12 В підключається до клеми N;

9 – вивід для подавання напруги живлення пристрою від джерела безперебійного живлення або фази С резервної лінії генератора, така напруга підтримує працездатність пристрою за відсутності напруги на входах 1 та 2;

13, 14, 15 – виводи для підключення нормально-розімкнених блок-контактів вимикачів Q1, Q2, Q3, відповідно. При ввімкненні вимикача його блок-контакт подає напругу U_0 на відповідний вивід 13–15. Ввімкнений стан хоча би одного з вимикачів Q1–Q3, тобто наявність напруги U_0 на одному з виводів 13–15, забороняє пристрою здійснення перемикання на робоче (резервне) джерело живлення. Такий захист дозволяє уникнути зустрічного ввімкнення входів живлення. Виводи 13–15 можуть лишитися непідключеними, проте тоді вказаний захист не реалізується.

16 – вивід дозволу автоматичного режиму роботи пристрою: наявність напруги U_0 на даному виводі дозволяє автоматичний режим; в разі відсутності напруги U_0 на виводі 16, робота пристрою блокується та всі вбудовані реле відключаються;

17 – вивід для подачі сигналу аварії, умови видачі такого сигналу налаштовуються через меню;

18, 19, 20 – виводи контролю стану ліній, що живлять навантаження. Релейний захист таких ліній, в разі виявлення аварії, подає на один з даних входів напругу U_0 . При виявленні такої напруги на виводах 18–20 блокується можливість ввімкнення вимикачів Q1–Q3, відповідно. Це унеможливорює приєднання працездатного джерела до аварійної лінії живлення навантаження. Після усунення несправності лінії, для відновлення роботи пристрою, необхідно скинути сигнал аварії шляхом короткочасної подачі напруги U_0 на вивід 21 скидання;

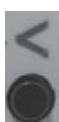
21 – вивід для скидання сигналу аварії за виводами 18–20. Сигнал аварії зберігається навіть при знеструмленні пристрою, оскільки записується до енергонезалежної пам'яті. Скидання сигналу аварії забезпечується короткочасною подачею напруги U_0 .

Налаштування пристрою AVR-02-G. На передній панелі пристрою AVR-02-G розташовані наступні елементи управління та індикації (рис. 4.2):

– рідкокристалічний дворядковий індикатор;

– кнопка  – виклик меню, запис до пам'яті встановленого значення;

– кнопки  (вверх),  (вниз) – вибір параметра;

– кнопки  (вліво),  (вправо) – встановлення значення обраного параметра;

– світлодіоди  – індикатори ввімкнення реле K1–K4;



– світлодіоди – індикатори стану входів живлення 1 та 2, відповідно, якщо вхід у робочому стані, то відповідний індикатор горить, а у випадку аварійного стану – блимає.

Пристрій може знаходитися в двох режимах: РОБОТА, МЕНЮ.

Для входу до режиму МЕНЮ необхідно:

- короткочасно натиснути кнопку ОК;
- за допомогою кнопок «вверх» та «вниз» обрати необхідний параметр;
- натиснути кнопку ОК на 5 с до блимання курсору;
- кнопками «вправо», «вліво» встановити значення параметра;
- короткочасно натиснути ОК для запам'ятовування встановленого значення;
- вихід з режиму МЕНЮ до режиму РОБОТА забезпечується повторним короткочасним натисканням ОК.

Повідомлення на екрані пристрою. В режимі РОБОТА на екрані пристрою можуть з'являтися повідомлення відповідно до табл. 4.1.

ОПИС ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА

Лабораторна робота виконується з використанням блоку АВР на основі пристрою AVR-02-G (рис. 4.7).

До складу блоку АВР входять:

- пристрій AVR-02-G;
- електромагнітні контактори КМ1–КМ3 типу SCG-9;
- індикаторні лампи, кнопка, перемикачі.

Принципова електрична схема блоку АВР наведена на рис. 4.8. Клемник для підключення входу 1 живлення позначено ХТ1 (INPUT 1), входу 2 – ХТ2 (INPUT 2). Напруга від входу 1 до виходу 1 (клемник ХТ3, OUTPUT 1) подається через силові контакти КМ1.1 контактора КМ1. Аналогічним чином напруга від входу 2 до виходу 2 (клемник ХТ4, OUTPUT 1) подається через силові контакти КМ2.1 контактора КМ2. Контактор КМ3 виступає як секційний. Напруга U_0 на котушки керування контакторів КМ1–КМ3 подається за допомогою вбудованих до пристрою реле К1–К3. Виводи 13–15 пристрою контролюють стан блок-контактів контакторів КМ1–КМ3.

До виводу 16 пристрою приєднано перемикач S1 «Автоматичний режим». Його замкнений стан дозволяє роботу пристрою в автоматичному режимі, розімкнений – забороняє.

Таблиця 4.1

Повідомлення на екрані пристрою в режимі РОБОТА

№	Повідомлення	Характеристика події
1	Вв1 224/225/231 Вв2 219/230/225	Пристрій функціонує в нормальному режимі, відображаються фазні напруги на входах 1 та 2.
2	Вв1 224/225/231 Вв2 помилка $U_{\min}$	Вхід 1 працює нормально. На вході 2 обрив однієї або декількох фаз (напруга менша від встановленої нижньої межі $U_{\min}$).
3	Вв1 помилка черг Вв2 помилка черг	Невірне чергування фаз на входах 1 та 2.
4	Помилка синфазності вводів	Порушення синфазності між фазами входів 1 та 2. Така помилка виникає, коли на кожному вході порядок чергування фаз дотримується, проте існує фазовий зсув між напругами на симетричних входах пристрою (наприклад, А1 та А2). В разі виникнення помилки синфазності обидва світлодіоди N1 та N2 на передній панелі пристрою блимають.
5	Вв1 224/225/231 Вв2 помилка $U_{\max}$	Вхід 1 працює нормально. На вході 2 має місце перенапруга (напруга більше від встановленої верхньої межі $U_{\max}$).
6	Вв1 224/225/231 Вв2 помилка асим	Асиметрія напруги на вході 2 перевищує допустиму.
7	Помилка зустрічна напруга	Одночасне підключення двох вводів на одне навантаження, що виникає через несправність силового комутаційного апарата.
8	Аварія розчеплювача 1, , ,	Повідомлення виникає в разі аварійних станів ліній, що живлять навантаження. Цифра «1» відповідає виникненню напруги на виводі 18 пристрою, «2» – 19, «3» – 20.
9	Помилка генератора	Виникає при аварії генератора.

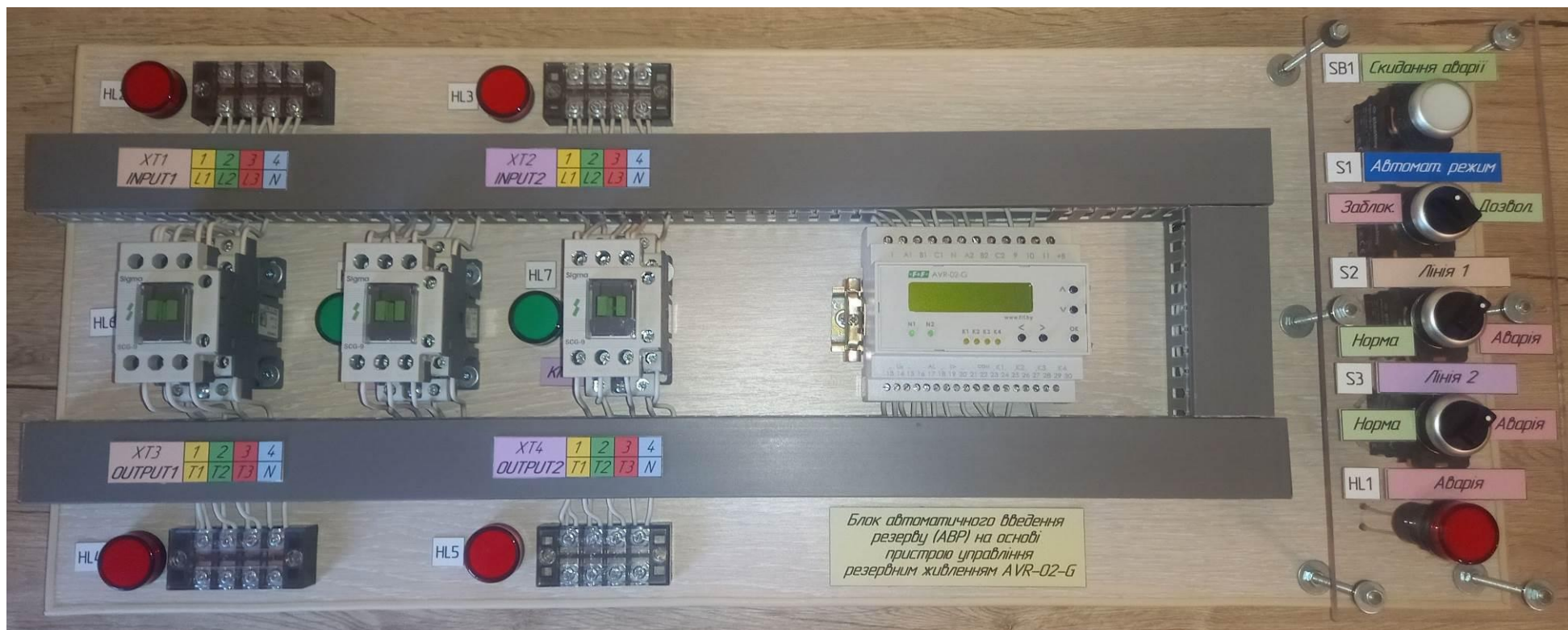


Рисунок 4.7 – Блок АВР на основі пристрою AVR-02-G

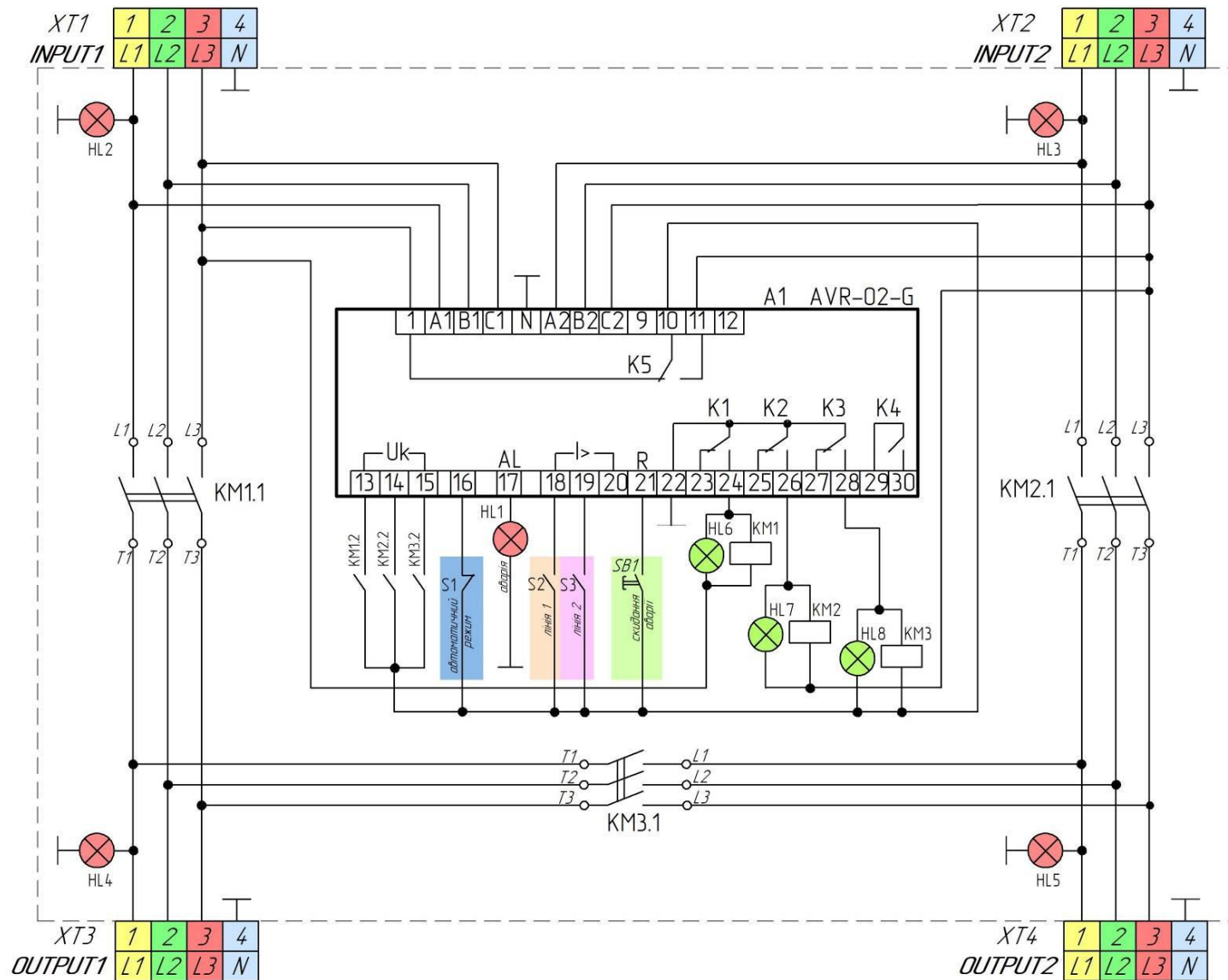


Рисунок 4.8 – Принципова електрична схема блоку автоматичного введення резерву (АВР) на основі пристрою управління резервним живленням AVR-02-G

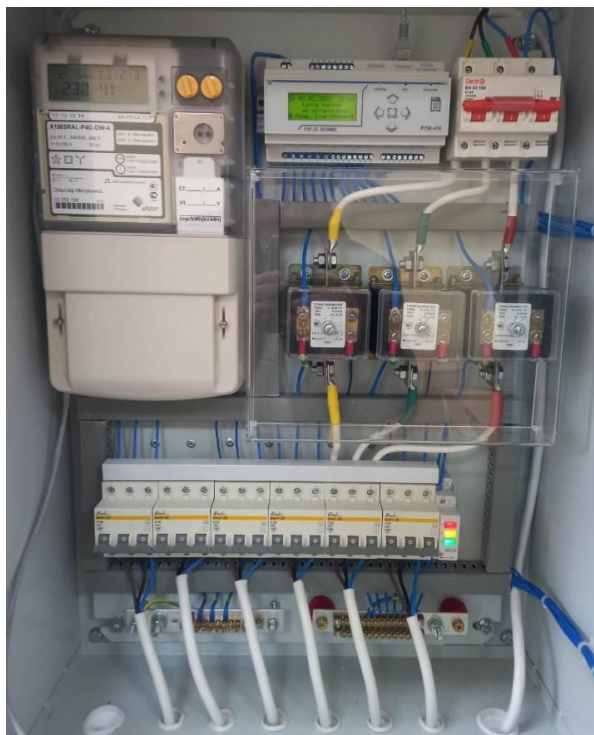
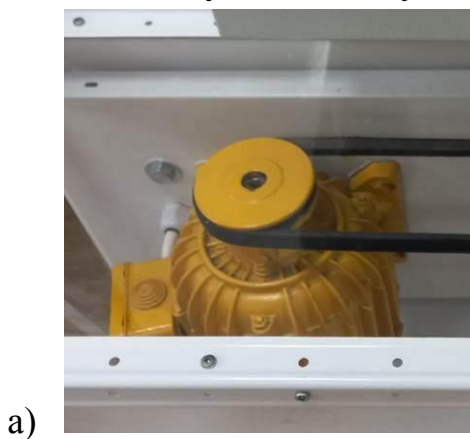


Рисунок 4.9 – Пункт розподілу електроенергії ПР-11



а)



б)

Рисунок 4.10 – Асинхронний двигун АОЛ2-11-4У3 (а) та панель з лампами розжарювання (б)



Рисунок 4.11 – Струмові кліщі UT204+.

Загоряння індикаторної лампи HL1, що приєднана до виводу 17 пристрою, свідчить про наявність сигналу аварії.

Замикання контакту перемикача S2 («Лінія 1»), що приєднаний до виводу 18, імітує несправний стан лінії, що живить перше навантаження. Аналогічним чином перемикач S3 («Лінія 2», вивід 19) імітує несправність лінії до другого навантаження.

Короткочасне натискання на кнопку SB1 (вивід 21), за умови відсутності несправностей на першій та другій лініях, скидає сигнал аварії.

Для проведення лабораторної роботи блок АВР підключається до лабораторного стенда в ауд. 508. Живлення на блок АВР подається від пункту розподілу електроенергії ПР-11, рис. 4.9. В якості першого навантаження використовується асинхронний двигун АОЛ2-11-4У3, рис. 4.10, а. Друге навантаження – лампи розжарювання, рис. 4.10, б. Вимірювання струму здійснюється струмовими кліщами UT204+, рис. 4.11.

3. ЗАВДАННЯ

Дослідити режими роботи блоку автоматичного введення резерву, що побудований на основі мікропроцесорного пристрою управління резервним живленням AVR-02-G.

4 ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

Підготовка схеми досліду

1. В ауд. 508 пересвідчитися, що стенд знеструмлено (автоматичний вимикач ЩРН відключений). Також пересвідчитися, що в ПР-11 всі автоматичні вимикачі відключені.

2. Зібрати схему досліду відповідно до рис. 4.12.

3. Перевести органи управління блоку АВР у наступні положення:

S1 «Автоматичний режим» – «Заблоковано»;

S2 «Лінія 1» – «Норма»;

S3 «Лінія 2» – «Норма»;

4. Показати зібрану схему викладачеві. Сфотографувати схему для оформлення звіту.

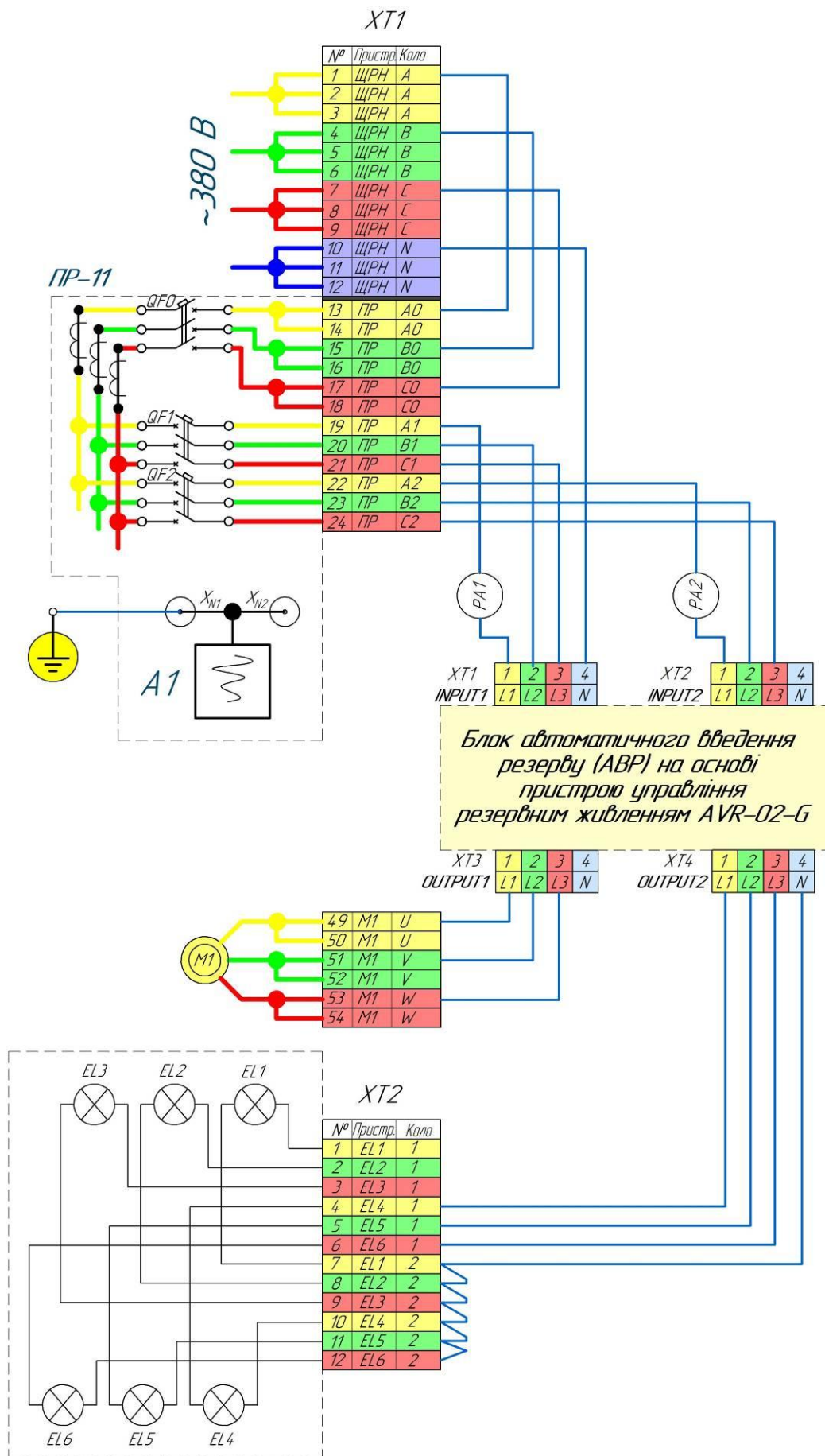
5. Подавати напругу на стенд можна тільки з дозволу викладача!

6. Ввімкнути автоматичний вимикач ЩРН, що подає напругу на стенд.

7. Ввімкнути автоматичні вимикачі QF0, QF1, QF2 у складі ПР-11.

Конфігурування та перевірка пристрою АВР

8. На екрані відображається повідомлення «Блокування». Короткочасно натиснути кнопку ОК для переходу до режиму МЕНЮ. На індикаторі буде відображена назва поточної схеми роботи.



9. Натиснути ОК впродовж 5 с до блимання курсору. З'явиться запит на код доступу. За допомогою кнопок «вліво», «вправо», «вверх», «вниз» встановити **код доступу 1234** (кнопку «вліво» натиснути 1 раз, «вправо» – 2 рази, «вверх» – 3 рази, «вниз» – 4 рази). Короткочасно натиснути ОК. Після одержання доступу – обрати схему N1+N2+S. Короткочасно натиснути ОК. На екрані знову відобразиться напис «Блокування».

10. Короткочасно натиснути кнопку ОК для переходу до режиму МЕНЮ. За допомогою кнопки «вниз» перейти до пункту меню «Вх.12345678 Вих», що відповідає налагоджувальному режиму. Натиснути ОК впродовж 5 с до блимання курсору, за необхідності ввести код доступу.

11. Перевірити функціонування елементів стенда. Для цього слід мати на увазі, що режимі налагодження:

- керування реле здійснюється кнопками «вліво», «вправо», «вверх», «вниз»;
- позначки («0» або «■») в другому рядку екрану відповідають стану виводів пристрою згідно з табл. 4.2 («0» – відсутність напруги U_0 , «■» – наявність).

Таблиця 4.2

Відповідність позначень на індикаторі виводам пристрою в режимі налагодження

Позначення на індикаторі	1	2	3	4	5	6	7	8
Вивід пристрою	13	14	15	16	18	19	20	21
Підключено на лабораторному стенді	KM1.2	KM2.2	KM3.2	S1	S2	S3	–	SB1

Перевести перемикач S1 в положення «Дозволено». На екрані значення під цифрою 4 має змінитися з «0» на «■».

Короткочасно натиснути кнопку «вліво» – реле K1, відповідно – контактор KM1, має ввімкнутися, запуститься двигун. На екрані значення під цифрою 1 має змінитися з «0» на «■». Також вмикається світлодіод стану реле K1 на передній панелі пристрою. Повторно натиснути кнопку «вліво» – контактор KM1 має відключитися, двигун зупиниться. Значення на екрані під цифрою 1 має стати «0».

Кнопка «вправо» керує реле K2, відповідно – контактором KM2, який подає живлення на лампи. Блок-контакт цього контактора подає сигнал до виводу 14, що на екрані відповідає логічному значенню під цифрою 2. Одночасно дозволяється вмикати тільки одне реле.

Кнопка «вверх» керує реле K3, відповідно – контактором KM3, на екрані це відповідає логічному значенню під цифрою 3.

Кнопка «вниз» – реле K4, однак до нього не підключено жодного виконавчого механізму.

12. Перевести перемикач S2 в положення «Аварія». На екрані значення під цифрою 5 має змінитися з «0» на «1». Також встановлюється внутрішній сигнал аварії, однак лампа HL1 не вмикається. Повернути перемикач S2 в положення «Норма». Для скидання внутрішнього сигналу аварії натиснути кнопку SB1 «Скидання аварії» (під час натискання значення під цифрою 8 змінюється з «0» на «1»).

Аналогічно випробувати перемикач S3.

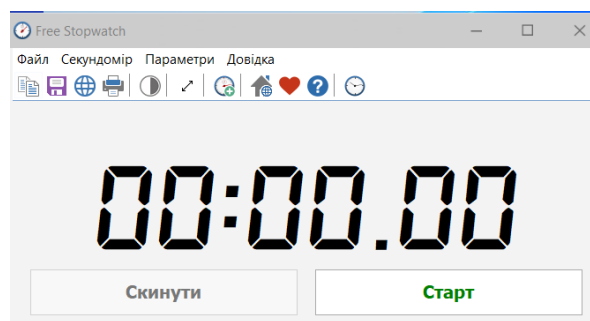
Перевести перемикач S1 в положення «Заблоковано».

Для виходу з режиму налагодження необхідно короткочасно натиснути ОК.

13. В режимі МЕНЮ **встановити значення параметрів** та функцій відповідно до табл. 4.3.

Дослід №1 – Дослідження автоматичного введення резерву

14. Включити комп'ютер, що вбудований у стенд (звернутися до викладача). Запустити програму таймера Free Stopwatch. Розгорнути вікно програми на весь екран:



15. Перевести перемикач S1 «Автоматичний режим» в положення «Дозволено». Контактори KM1, KM2 мають включитися, KM3 – бути відключеним, двигун і лампи ввімкнуться.

Занести стан елементів системи, значення напруг та струмів до рядка 1а протоколу випробувань, табл. 4.4.

16. Одночасно виконати дві дії (краще запросити одногрупника): відключити автоматичний вимикач QF1 у складі ПР-11 та натиснути кнопку «Старт» у програмі таймера. Слідкувати за спрацюванням АВР (спрацьовує із заданими витримками часу). В момент запуску двигуна натиснути кнопку «Стоп» у програмі таймера. Занести дані до рядка 1б протоколу випробувань, табл. 4.4. При цьому значення витримку часу, що визначено таймером, занести до клітинки ΔT_1 .

17. Скинути таймер.

Таблиця 4.3

Значення параметрів пристрою АВР

Параметр, функція	Варіант 1		Варіант 2		Примітка
	Значення (вибір кнопками «вправо», «вліво»: on, off)	Сигнал аварії (вибір кнопками «вверх», «вниз»: “А” сигнал подається, “–” не подається)	Значення (вибір кнопками «вправо», «вліво»: on, off)	Сигнал аварії (вибір кнопками «вверх», «вниз»: “А” сигнал подається, “–” не подається)	
Відключення при помилці чергування	on	A	on	A	
Відключення при помилці синфазності	on	A	on	A	
Аварія при спрацюванні розчіплювача	–	A	–	A	
Зустрічна напруга	–	–	–	A	
Час відключення при $U < U_{\min}$	15 с	A	7 с	A	T_3
Час відключення при $U > U_{\max}$	1,0 с	–	1,5	A	
Час відключення при асиметрії	8 с	A	12 с	A	
Макс. напруга $U_{\max}$	260 В	–	250 В	–	
Мін. напруга $U_{\min}$	170 В	–	180 В	–	
Асиметрія напруги U_{asimm}	60 В	–	40 В	–	
Час перемикання $T_{\text{п}}$	4,0 с	–	5,9 с	–	T_n
Час відновлення $T_{\text{в}}$	5 с	–	7 с	–	T_6

18. Одночасно виконати дві дії: ввімкнути автоматичний вимикач QF1 у складі ПР-11 та натиснути кнопку «Старт» у програмі таймера. Слідкувати за спрацюванням АВР (спрацьовує із заданими витримками часу). В момент запуску двигуна натиснути кнопку «Стоп» у програмі таймера. Занести витримку часу до клітинки ΔT_2 (рядок 1б). Скинути таймер.

19. Одночасно виконати дві дії: відключити автоматичний вимикач QF2 у складі ПР-11 та натиснути кнопку «Старт» у програмі таймера. Слідкувати за спрацюванням АВР (спрацьовує із заданими витримками часу). В момент ввімкнення ламп натиснути кнопку «Стоп» у програмі таймера. Занести дані до рядка 1в протоколу випробувань, табл. 4.4. При цьому значення витримку часу, що визначено таймером, занести до клітинки ΔT_1 .

20. Скинути таймер.

21. Одночасно виконати дві дії: ввімкнути автоматичний вимикач QF2 у складі ПР-11 та натиснути кнопку «Старт» у програмі таймера. Слідкувати за спрацюванням АВР (спрацьовує із заданими витримками часу). В момент ввімкнення ламп натиснути кнопку «Стоп» у програмі таймера. Занести витримку часу до клітинки ΔT_2 (рядок 1в).

Дослід №2 – Функціонування АВР при пошкодженні ліній до навантаження

22. Перевести перемикач S2 «Лінія 1» в положення «Аварія».

23. Слідкувати за спрацюванням АВР. Занести дані щодо стану системи до рядка 2а протоколу випробувань, табл. 4.4.

24. Перевести перемикач S2 «Лінія 1» в положення «Норма». Короткочасно натиснути кнопку SB1 «Скидання аварії». Слідкувати за спрацюванням АВР.

25. Перевести перемикач S3 «Лінія 2» в положення «Аварія».

26. Слідкувати за спрацюванням АВР. Занести дані щодо стану системи до рядка 2б протоколу випробувань, табл. 4.4.

27. Перевести перемикач S3 «Лінія 2» в положення «Норма». Короткочасно натиснути кнопку SB1 «Скидання аварії». Слідкувати за спрацюванням АВР.

28. Вимкнути комп'ютер, що вбудований у стенд (Пуск – Завершити роботу).

29. Відключити автоматичний вимикач ЩРН.

Дослід №3 – Функціонування АВР при обриві фази джерела

30. Пересвідчитися, що стенд знеструмлено.

31. Внести зміни до схеми лабораторного стенда відповідно до рис. 4.13, а саме – від'єднати провід, що з'єднує клеми 24/ПР/С2 та ХТ2/3/Л3.

32. Показати зібрану схему викладачеві.

33. Подавати напругу на стенд можна тільки з дозволу викладача!

34. Ввімкнути автоматичний вимикач ЩРН, що подає напругу на стенд.

Таблиця 4.4

Протокол випробування блоку АВР на основі пристрою управління резервним живленням AVR-02-G

№ стану	Стан автоста- тичних вимикачів ПР-11		Перемикачі, що імітують аварію на лінії до навантаження		Напруга на вході INPUT1 блоку АВР			Напруга на вході INPUT2 блоку АВР			Стан контакторів			Напруга на виходах блоку АВР		Сигнал аварії	Струм		Фактичні затримки			
						U_{A1} , В	U_{B1} , В	U_{C1} , В		U_{A2} , В							U_{B2} , В	U_{C2} , В	I_1 , А	I_2 , А	ΔT_1 , с	ΔT_2 , с
	QF1	QF2	S2 Лінія1	S3 Лінія2		HL2, 0/1	На екрані пристрою Вв1	HL3, 0/1		На екрані пристрою Вв2	KM1 (HL6), 0/1	KM3 (HL8), 0/1	KM2 (HL7), 0/1	OUTPUT1 (HL4), 0/1	OUTPUT2 (HL5), 0/1	HL1, 0/1	PA1	PA2				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
Схема – рис. 4.12. Дослід №1 – Дослідження автоматичного введення резерву																						
1а	on	on	норма	норма																	х	х
1б	off	on	норма	норма																		
1в	on	off	норма	норма																		
Схема – рис. 4.12. Дослід №2 – Функціонування АВР при пошкодженні ліній до навантаження																						
2а	on	on	аварія	норма																	х	х
2б	on	on	норма	аварія																	х	х
Схема – рис. 4.13. Дослід №3 – Функціонування АВР при обриві фази джерела																						
3	on	on	норма	норма																	х	х
Схема – рис. 4.14. Дослід №4 – Функціонування АВР при помилковому чергуванні фаз																						
4	on	on	норма	норма																	х	х
Схема – рис. 4.15. Дослід №5 – Функціонування АВР при відсутності синфазності																						
5	on	on	норма	норма																	х	х

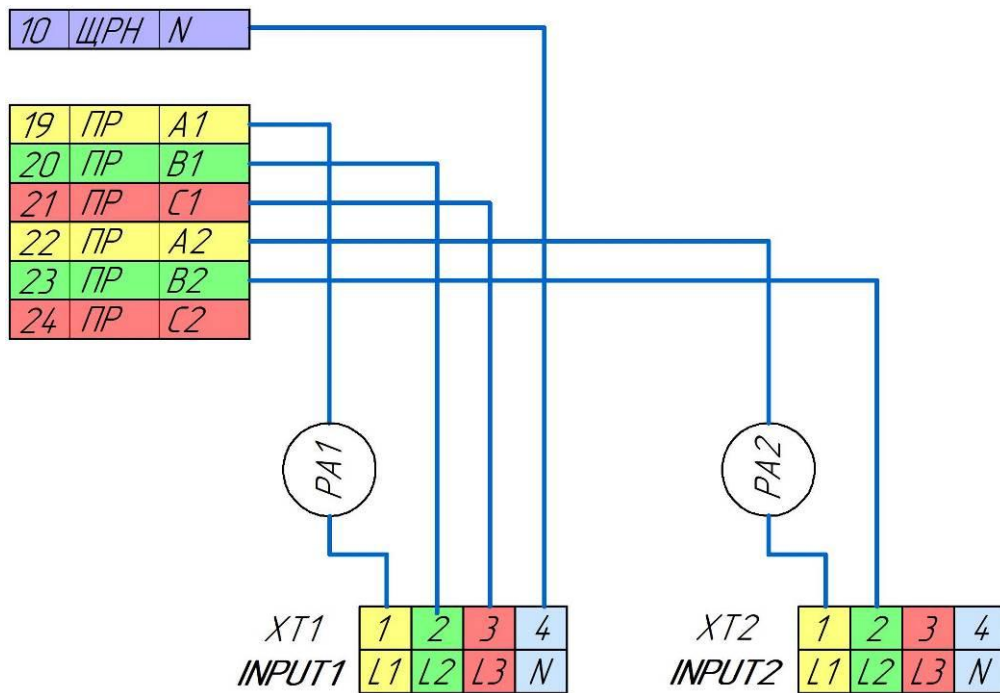


Рисунок 4.13 – Схема лабораторного стенда для дослідження роботи блоку АВР при обриві фази джерела (дослід №3)

35. Слідкувати за станом АВР. Занести дані щодо стану системи до рядка 3 протоколу випробувань, табл. 4.4.

36. Відключити автоматичний вимикач ЩРН.

Дослід №4 – Функціонування АВР при помилковому чергуванні фаз

37. Пересвідчитися, що стенд знеструмлено.

38. Внести зміни до схеми лабораторного стенда відповідно до рис. 4.14.

Проводи, які необхідно переключити, виділені червоним.

39. Показати зібрану схему викладачеві.

40. Подавати напругу на стенд можна тільки з дозволу викладача!

41. Ввімкнути автоматичний вимикач ЩРН, що подає напругу на стенд.

42. Слідкувати за станом АВР. Занести дані щодо стану системи до рядка 4 протоколу випробувань, табл. 4.4.

43. Відключити автоматичний вимикач ЩРН.

Дослід №5 – Функціонування АВР при відсутності синфазності

44. Пересвідчитися, що стенд знеструмлено.

45. Внести зміни до схеми лабораторного стенда відповідно до рис. 4.15.

Проводи, які необхідно переключити, виділені червоним.

46. Показати зібрану схему викладачеві.

47. Подавати напругу на стенд можна тільки з дозволу викладача!

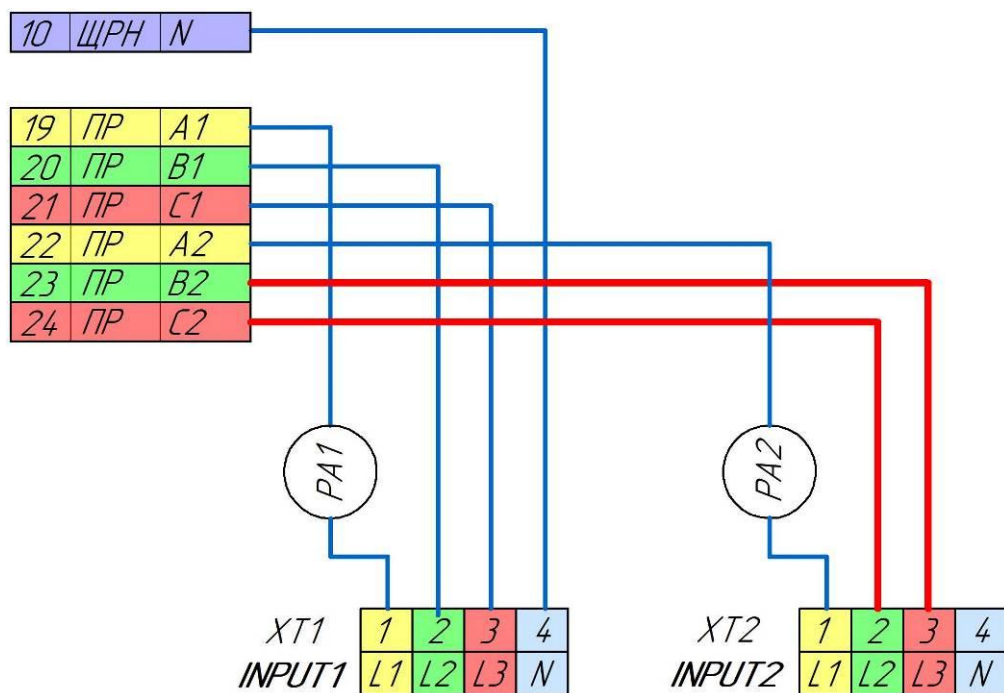


Рисунок 4.14 – Схема лабораторного стенда для дослідження роботи блоку АВР при помилковому чергуванні фаз (дослід №4)

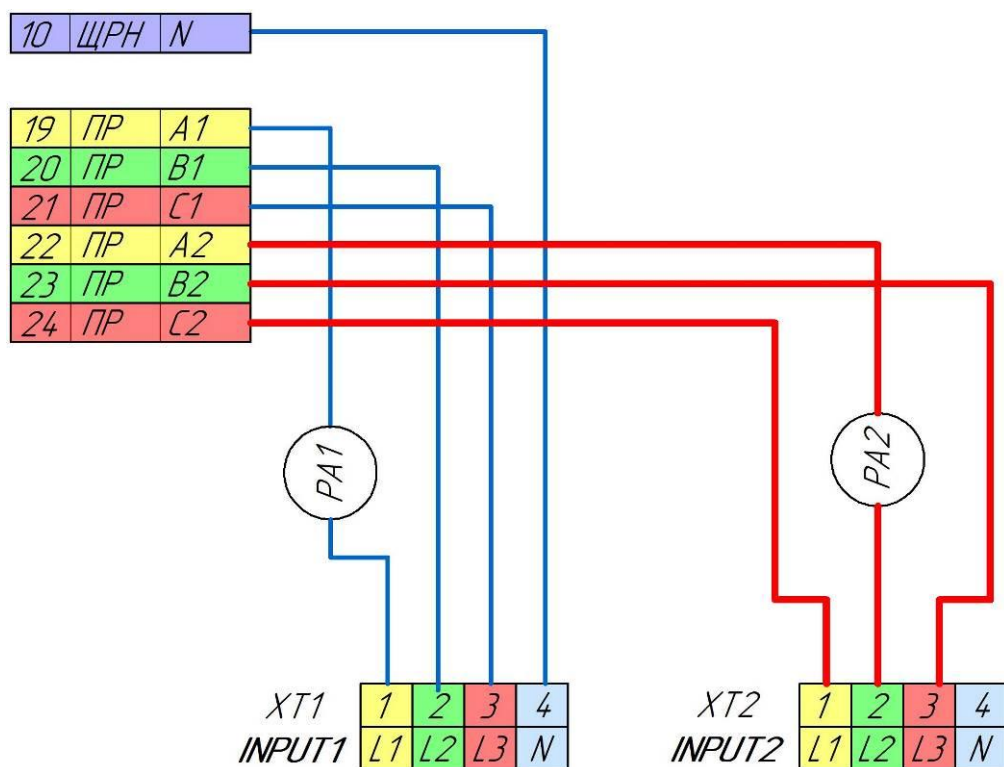


Рисунок 4.15 – Схема лабораторного стенда для дослідження роботи блоку АВР при відсутності синфазності (дослід №5)

48. Ввімкнути автоматичний вимикач ЩРН, що подає напругу на стенд.

49. Слідкувати за станом АВР. Занести дані щодо стану системи до рядка 5 протоколу випробувань, табл. 4.4.

50. Відключити автоматичний вимикач ЩРН. Відключити автоматичні вимикачі QF0, QF1, QF2 у складі ПР-11.

Аналіз результатів дослідів

51. На основі експериментальних даних (рядки 1а, 1б табл. 4.4) побудувати графіки, що відображають цикл спрацювання АВР при втраті живлення від першого джерела. За віссю абсцис необхідно відкласти час t , с. За осями ординат:

- фазна напруга U_{A1} , В, першої фази на вході INPUT1 блоку АВР;

- лінійний струм I_1 , А, першої фази входу INPUT1 блоку АВР;

- фазна напруга U_{A2} , В, першої фази на вході INPUT2 блоку АВР;

- лінійний струм I_2 , А, першої фази входу INPUT2 блоку АВР;

- логічна змінна, яка відповідає наявності («1») або відсутності («0») напруги на виході OUTPUT1 блоку АВР;

- логічна змінна, яка відповідає наявності («1») або відсутності («0») напруги на виході OUTPUT2 блоку АВР.

При побудові графіка на осі абсцис мають бути відкладені витримки часу ΔT_1 , ΔT_2 , що були експериментально виміряні (рядок 1б табл. 4.4). Для побудови графіка можна скористатися шаблоном, що наведений на рис. 4.16.

52. На основі експериментальних даних скласти текстовий опис циклу спрацювання АВР при втраті живлення від першого джерела. Приділити увагу наявності напруг на входах та виходах блоку АВР, величинам струмів, що споживаються від кожного з джерел, стану контакторів, витримкам часу.

53. На основі експериментальних даних (рядки 1а, 1в табл. 4.4) побудувати графіки, що відображають цикл спрацювання АВР при втраті живлення від другого джерела. Графік необхідно будувати аналогічно попередньому на окремому шаблоні.

54. На основі експериментальних даних, скласти текстовий опис циклу спрацювання АВР при втраті живлення від другого джерела.

55. На основі експериментальних даних (рядки 2а, 2б табл. 4.4) скласти текстовий опис функціонування блоку АВР при виникненні аварії на одній з ліній, які живлять навантаження.

56. Скласти текстовий опис функціонуванню блоку АВР при обриві фази джерела (рядок 3 табл. 4.4).

57. Скласти текстовий опис функціонуванню блоку АВР при помилковому чергуванні фаз (рядок 4 табл. 4.4).

58. Скласти текстовий опис функціонуванню блоку АВР при відсутності синфазності між системами напруг джерел (рядок 5 табл. 4.4).

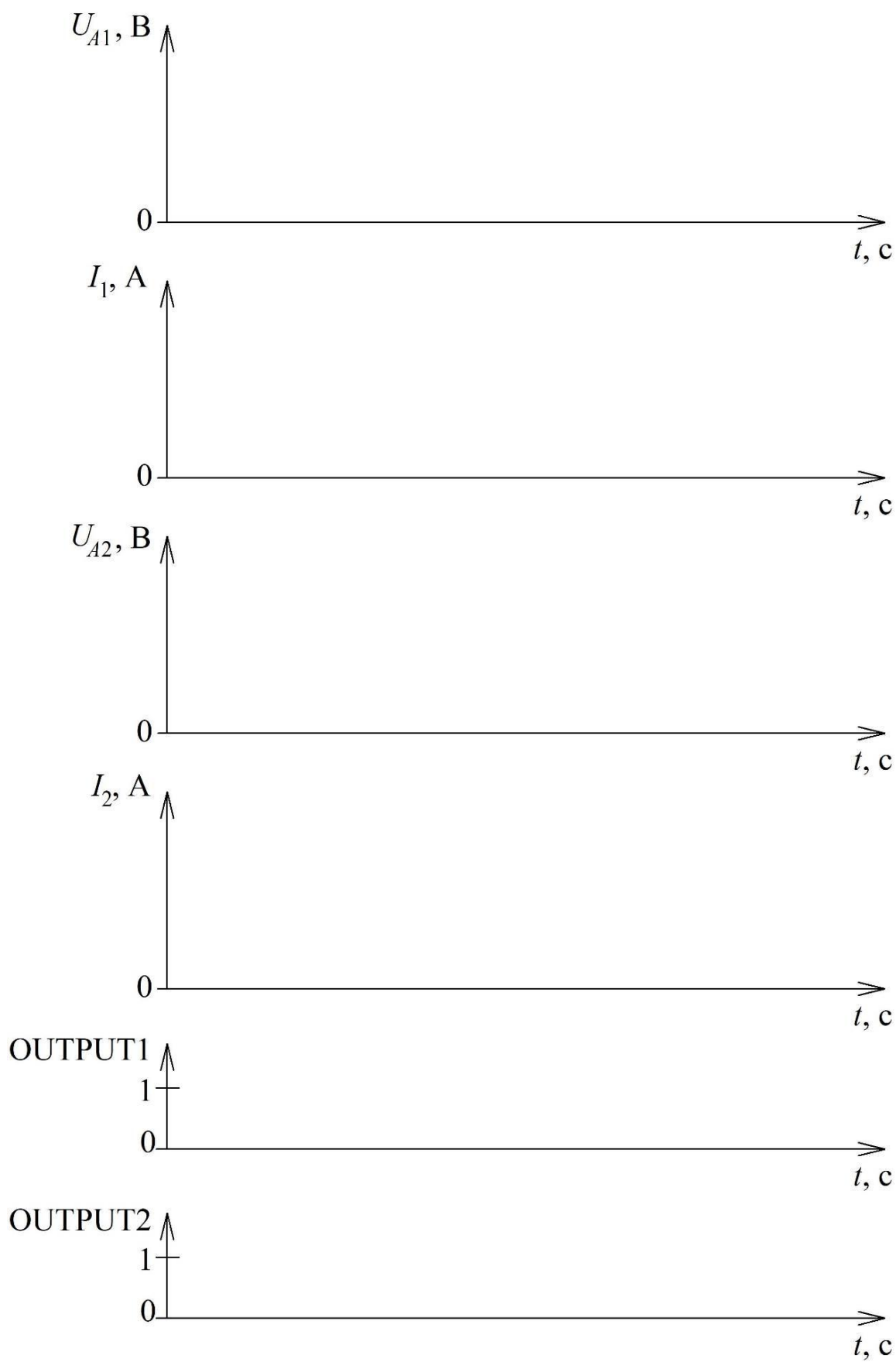


Рисунок 4.16 – Шаблон для побудови графіків спрацювання АВР

Вміст звіту з лабораторної роботи

1. Тема, мета роботи.
2. Опис принципу функціонування АВР відповідно до схеми $N1+N2+S$.
3. Пояснення формування напруги живлення кіл управління відповідно до рис. 4.5.
4. Фото лабораторного стенда.
5. Принципова електрична схема блоку автоматичного введення резерву (АВР) на основі пристрою управління резервним живленням AVR-02-G, рис. 4.8, з описом роботи.
6. Налаштовані значення параметрів пристрою.
7. Протокол випробування блоку АВР на основі пристрою управління резервним живленням AVR-02-G, табл. 4.4.
8. Графіки, що відображають цикл спрацювання АВР при втраті живлення від першого джерела (за шаблоном рис. 4.16).
9. Опис циклу спрацювання АВР при втраті живлення від першого джерела.
10. Графіки, що відображають цикл спрацювання АВР при втраті живлення від другого джерела (за шаблоном рис. 4.16).
11. Опис циклу спрацювання АВР при втраті живлення від другого джерела.
12. Опис функціонування блоку АВР при виникненні аварії на одній з ліній, які живлять навантаження.
13. Опис функціонування блоку АВР при обриві фази джерела.
14. Опис функціонування блоку АВР при помилковому чергуванні фаз.
15. Опис функціонування блоку АВР при відсутності синфазності між системами напруг джерел.
16. Висновки.

Контрольні питання

1. Для чого використовується автоматичне введення резерву?
2. Які основні вимоги висуваються до пристроїв АВР?
3. Охарактеризуйте порядок роботи схеми АВР секційного вимикача для двотрансформаторної підстанції, рис. 4.1.
4. Розкрийте призначення та функції пристрою AVR-02-G.
5. Опишіть типові схеми електропостачання, в яких може застосовуватися пристрій AVR-02-G.
6. Опишіть функціонування пристрою AVR-02-G для схеми $N1+N2+S$, користуючись рис. 4.3 та 4.4.
7. Скільки вбудованих реле має пристрій AVR-02-G? Для чого вони призначені?
8. Поясніть формування напруги живлення кіл управління за схемою на рис. 4.5.

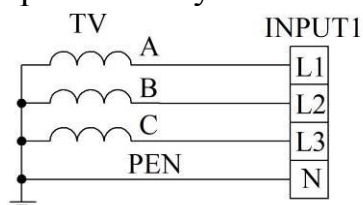
9. Поясніть улаштування блоку АВР за схемою на рис. 4.8. Для чого призначено кожний елемент? Яка умова його ввімкнення/відключення?

10. Користуючись одержаними графіками, поясніть цикл спрацювання АВР при втраті живлення від одного з джерел.

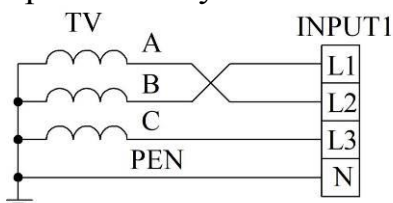
11. Що необхідно для того, щоб блок АВР відреагував на коротке замикання одного з приєднань? Якою є реакція блоку?

12. Що станеться, якщо обірветься фаза одного з джерел?

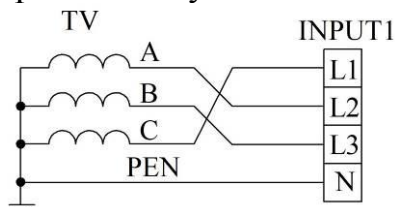
13. Яким чином буде функціонувати блок АВР, вхід INPUT1 якого підключено до трансформатора TV наступним чином:



14. Яким чином буде функціонувати блок АВР, вхід INPUT1 якого підключено до трансформатора TV наступним чином:



15. Яким чином буде функціонувати блок АВР, вхід INPUT1 якого підключено до трансформатора TV наступним чином:

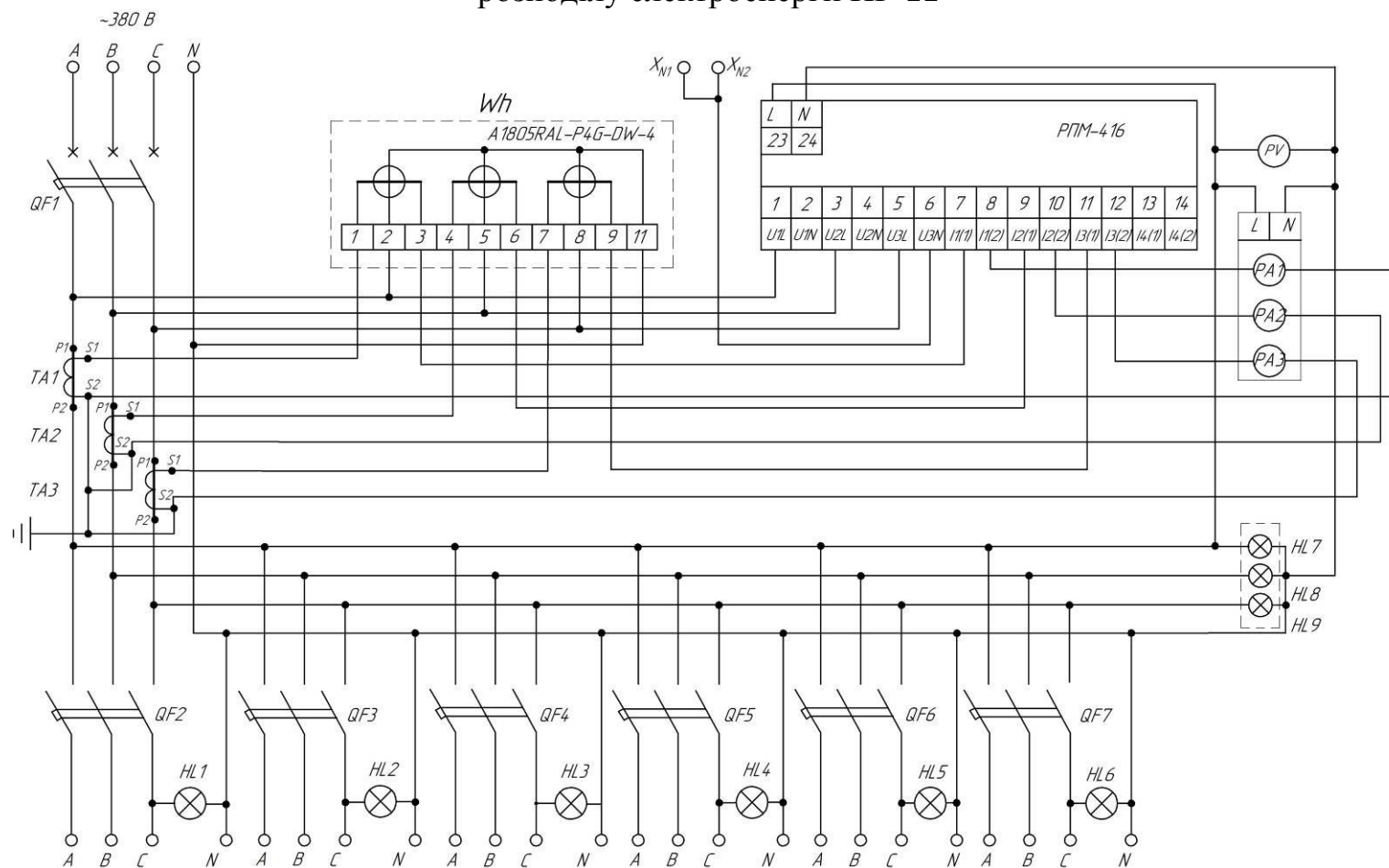


16. Чи допускається наявність фазового зсуву між векторами $\underline{U}_{A1}$ та $\underline{U}_{A2}$? Відповідь обґрунтуйте.

ЛІТЕРАТУРА

- 1 Apostolov A. IEC 61850 Digitizing the Electric Power Grid. Artech House, 2023. 353 p.
- 2 Bishop P., Nair N.-K. C. IEC 61850 Principles and Applications to Electric Power Systems. 2nd ed. Springer Nature Switzerland AG, 2023. 585 p. DOI: 10.1007/978-3-031-24567-1
- 3 Pujari S. IEC 61850 And Digital Substation Basics. Amazon Digital Services LLC - Kdp, 2024. 78 p.
- 4 Інтелектуальні системи в електроенергетиці. Теорія та практика : навчальний посібник. / Стаднік М. І., Видмиш А. А., Штуць А. А., Колісник М. А. Вінниця : ТОВ «ТВОРИ», 2020. 332 с. URL: <https://surli.cc/pjaggw>
- 5 Касаткіна І. В., Бойко С. М., Жуков О. А. Інтелектуальні системи електропостачання: навчальний посібник. 2023. 151 с. URL: <https://surl.lt/odzyic>
- 6 Махлін П. В., Костенко С. Ю., Кузьменко О. П. Інтелектуальні пристрої релейного захисту та автоматики : навч. посібник. Запоріжжя : НУ «Запорізька політехніка», 2020. 256 с. URL: <https://surl.li/irjall>
- 7 IEC 61850 A Complete Guide - 2020 Edition. 5STARCOoks, 2021. 305 p.
- 8 Mike L Unleashing the Power of IEC 61850: A Comprehensive Guide. 2023. 228 p.
- 9 Суходоля О. М. Штучний інтелект в енергетиці : аналіт. доповідь. К. : НІСД, 2022. 49 с. URL: <https://doi.org/10.53679/NISS-analytrep.2022.09>

ДОДАТОК А Принципова електрична схема удосконаленого пункту розподілу електроенергії ПР-11



ДОДАТОК Б

Перелік вимірювальних каналів реєстратора РПМ-416

[illegible]