

Міністерство освіти і науки України

Національний університет водного господарства та природокористування

Навчально-науковий інститут енергетики, автоматики та водного господарства

Кафедра автоматизації, електротехнічних та комп'ютерно-інтегрованих
технологій

04-03-370М

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до виконання лабораторних робіт з навчальної дисципліни
«Інтелектуальні системи електропостачання» (частина 1) для
здобувачів вищої освіти другого (магістерського) рівня за освітньо-
професійною програмою «Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка» спеціальності 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»
денної та заочної форм навчання

Рекомендовано науково-
методичною радою з якості
ННІ ЕАВГ
Протокол № 1 від 26.09.2023 р.

Рівне – 2023

Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з навчальної дисципліни «Інтелектуальні системи електропостачання» (частина 1) для здобувачів вищої освіти другого (магістерського) рівня за освітньо-професійною програмою «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» денної та заочної форм навчання [Електронне видання] / Василюк С. В., Літковець С. П., Василюк К. С., Ільчук В. В. – Рівне : НУВГП, 2023. – 47 с.

Укладачі:

- Василюк С. В.** професор кафедри автоматизації, електротехнічних та комп'ютерно-інтегрованих технологій, доктор технічних наук, професор
- Літковець С. П.** доцент кафедри автоматизації, електротехнічних та комп'ютерно-інтегрованих технологій, кандидат технічних наук, доцент
- Василюк К. С.** старший викладач кафедри автоматизації, електротехнічних та комп'ютерно-інтегрованих технологій
- Ільчук В. В.** старший лаборант кафедри автоматизації, електротехнічних та комп'ютерно-інтегрованих технологій

Відповідальний за випуск:

Древецький В.В., завідувач кафедри автоматизації, електротехнічних та комп'ютерно-інтегрованих технологій, доктор технічних наук, професор

Керівник групи забезпечення спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»:

Василюк С.В., професор кафедри автоматизації, електротехнічних та комп'ютерно-інтегрованих технологій, доктор технічних наук, професор

© С. В. Василюк,
С. П. Літковець,
К. С. Василюк,
В. В. Ільчук, 2023
© НУВГП, 2023

ЗМІСТ

Вступ.....	4
Лабораторна робота 1. Дослідження функціонування мікропроцесорного реєстратора параметрів мережі РПМ-416.....	5
Лабораторна робота 2. Дистанційне оцінювання ефективності функціонування споживачів електроенергії.....	15
Лабораторна робота 3. Дослідження режимів роботи двигунного навантаження у складі системи електропостачання за даними засобів вимірювальної техніки.....	30
Література.....	45
Додаток А. Принципова електрична схема удосконаленого пункту розподілу електроенергії ПР-11.....	46
Додаток Б. Перелік вимірювальних каналів реєстратора РПМ-416.....	47

ВСТУП

Метою освітньої компоненти є формування у здобувачів освіти сучасного рівня знань, умінь і навичок проектування та експлуатації інтелектуальних автоматичних пристроїв у складі мереж Smart Grid, а також розуміння необхідності застосування сучасних технологій, методів та алгоритмів для функціонування інтелектуальних систем електропостачання.

Завдання: оволодіти теоретичною базою і практичними вміннями побудови та експлуатації інтелектуальних систем електропостачання.

В результаті вивчення даної дисципліни здобувач набуває уміння розв'язувати складні задачі і проблеми у галузі електроенергетики, електротехніки та електромеханіки за відсутності повної інформації про об'єкт досліджень, вчиться використовувати сучасні мікропроцесорні пристрої для управління, моніторингу та аналізу енергоефективності функціонування споживачів та систем електропостачання. Також набуваються навички оброблення та аналізу результатів вимірювань.

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

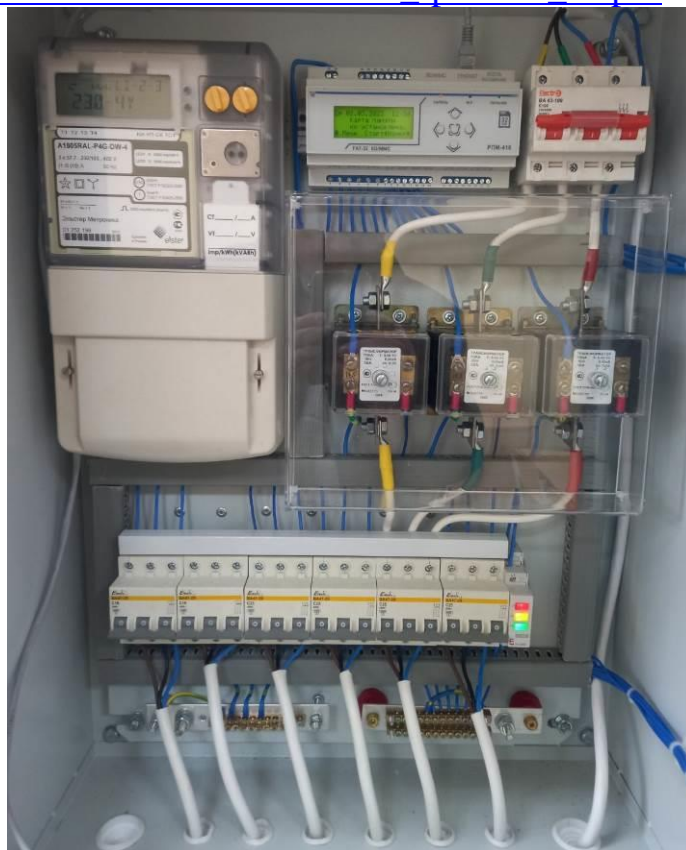


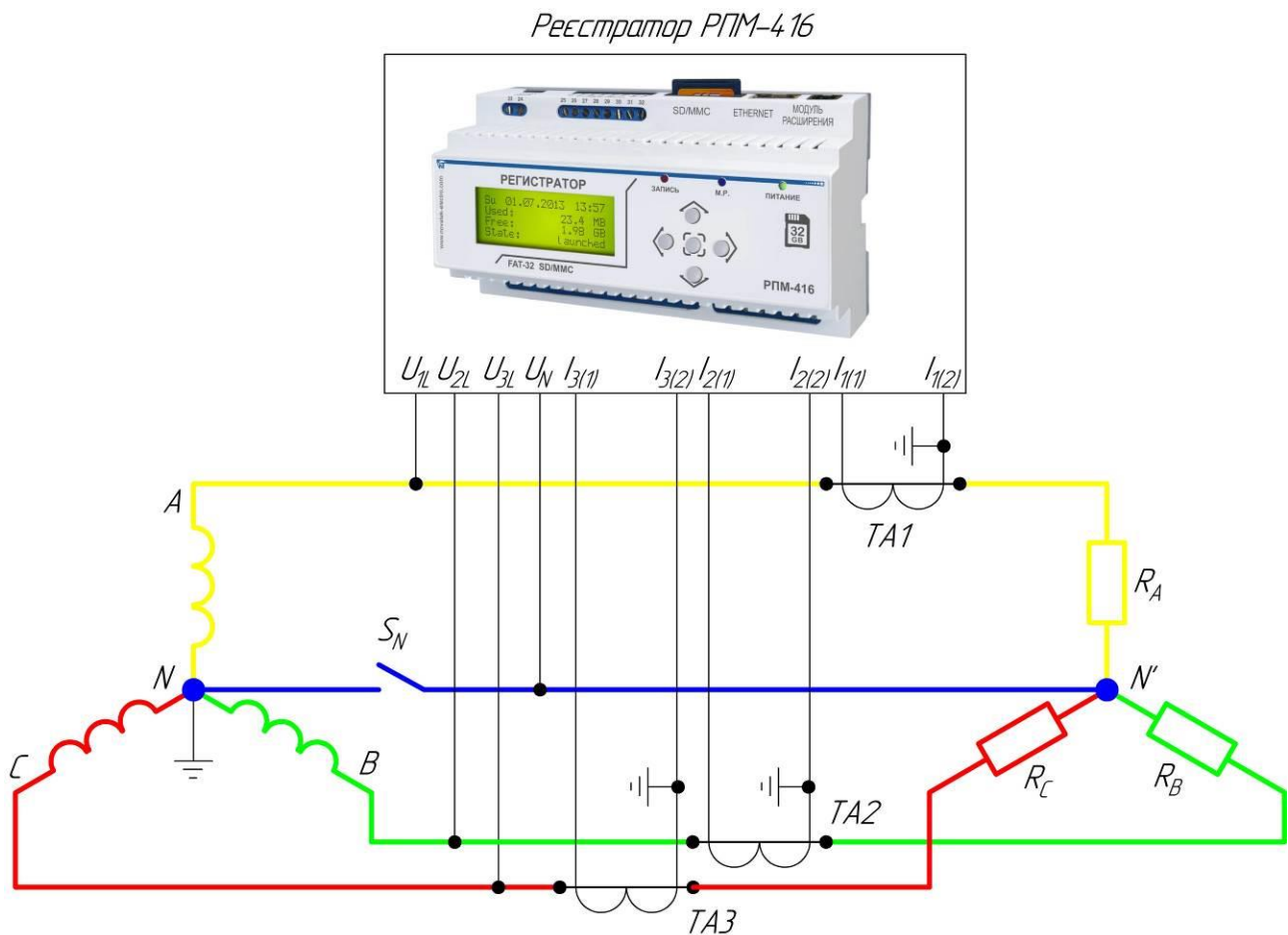
Рисунок 1.1 – Внутрішній вигляд удосконаленого пункту розподілу електроенергії ПР-11

2. Лампи розжарювання, що створюють активно трифазне навантаження, рис. 1.2.
3. Мультиметр для вимірювання напруги зміщення нейтралі.



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. Обрив нейтралі забезпечується розмиканням вимикача S_N . 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.



Умови проведення дослідів наведено у табл. 1.1.

Умови проведення дослідів

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

ЗАВДАННЯ

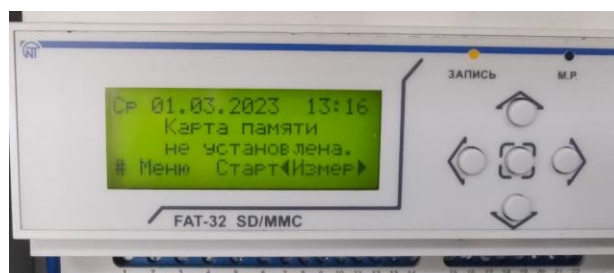
Забезпечити вимірювання параметрів трифазного навантаження за допомогою мікропроцесорного реєстратора параметрів мережі РПМ-416. Виконати порівняльний аналіз функціонування трифазного симетричного та несиметричного навантаження, що зібране за схемою «зірка», за наявності та відсутності нульового проводу.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

ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

1. В ауд. 508 зібрати схему лабораторного стенда відповідно схеми на рис. 1.4. Зібрана схема стенда зображена на рис. 1.5. При цьому нейтраль джерела живлення та нульову точку навантаження з'єднувати провідником, що обладнаний вимикачем S_N . Мультиметр необхідно налаштувати на вимірювання змінної напруги, межа вимірювання – не більше 100 В. Зробити фото лабораторного стенда для додавання до звіту.

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

2. Розмістити на панелі лампи: EL1 – 300 Вт; EL2 – 300 Вт; EL3 – 300 Вт.
3. Переключити вимикач S_N у положення «норма», що відповідає нормальному стану нульового проводу.
4. **Показати схему викладачу!**
5. **З дозволу викладача подати напругу на стенд за допомогою автоматичного вимикача ЩРН.**
6. **Ввімкнути автоматичний вимикач QF0 у складі ПР-11.**
7. Реєстратор вклучиться, після ініціалізації на екрані буде відображено головний екран:



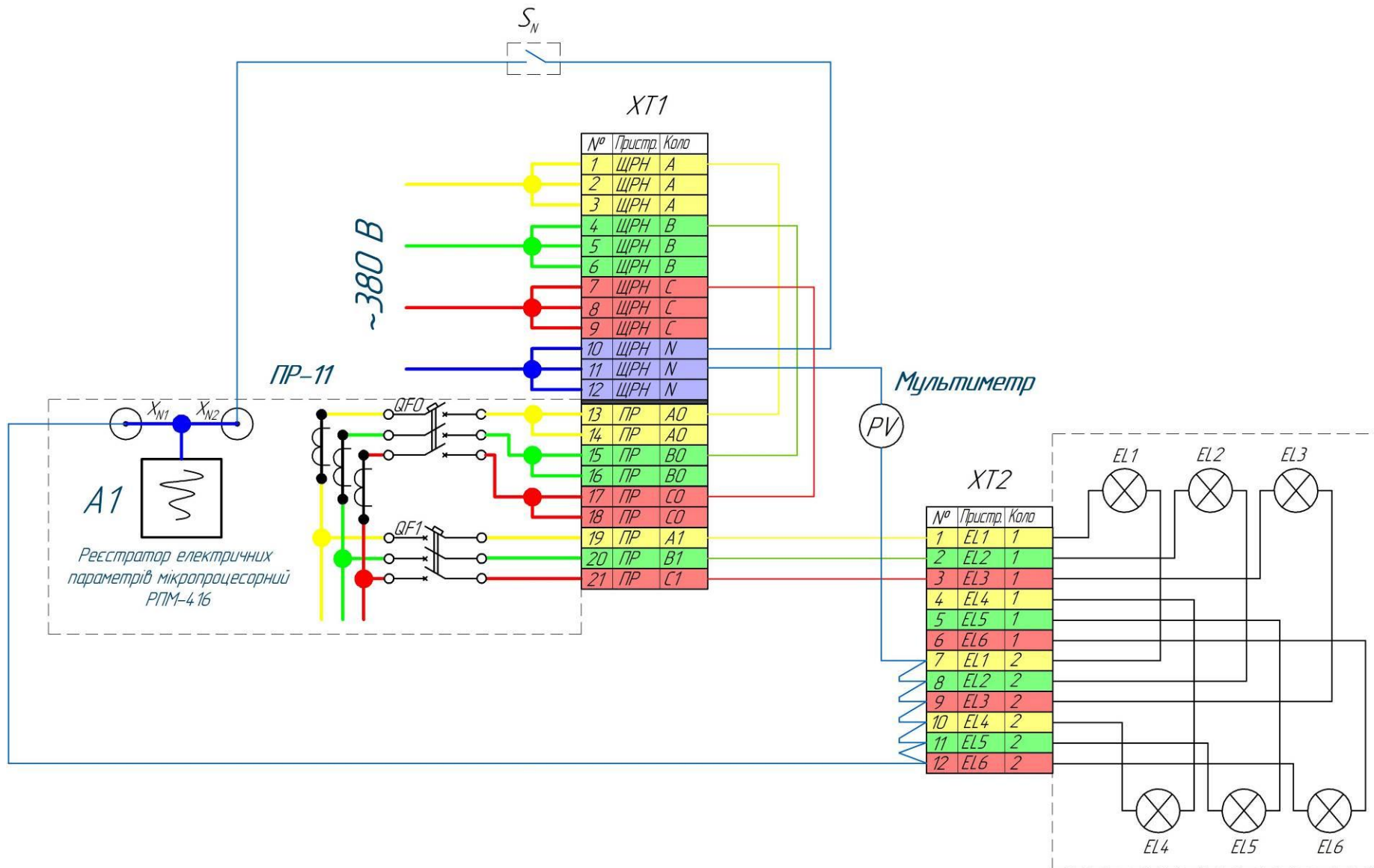


Рисунок 1.4 – Схема з'єднань елементів лабораторного стенда

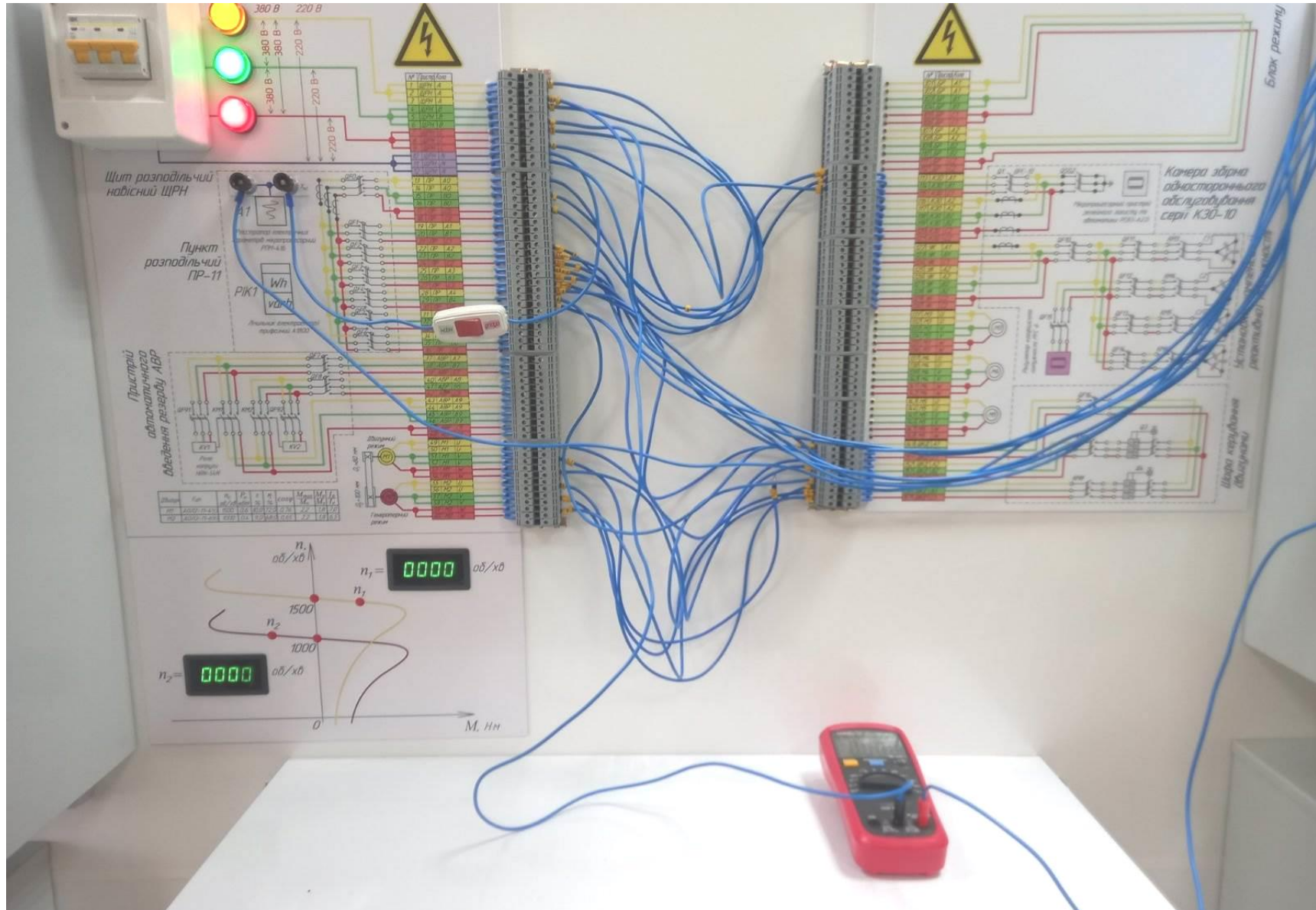


Рисунок 1.5 – З'єднання елементів лабораторного стенда

8. Сконфігурувати реєстратор шляхом задавання типів вимірювальних трансформаторів струму. Для цього обрати пункт «Меню». Для вибору пункту меню використовуються кнопки ► (вправо), ◀ (вліво). Для відкриття пункту меню використовується кнопка ■ (введення, центральна кнопка). Вибрати наступні підменю: «Базові канали» – «Канал 4» – «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.

9. Обрати пункт меню «Вимірювання».

10. 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.

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

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

Дослід 2. Дослідження функціонування симетричного трифазного навантаження при обриві нульового проводу

13. Переключити вимикач S_N у положення «обрив», що відповідає обриву нульового проводу.

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

15. Відключити автоматичні вимикачі QF0, QF1 у складі ПР-11.

16. Відключити автоматичний вимикач ЩРН.

Дослід 3. Дослідження функціонування несиметричного трифазного навантаження за наявності нульового проводу

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

18. Переключити вимикач S_N у положення «норма», що відповідає нормальному стану нульового проводу.

19. **Показати схему викладачу!**

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

21. **Ввімкнути автоматичні вимикачі QF0, QF1 у складі ПР-11.**

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

Таблиця 1.2

Результати вимірювань

Канал	Параметр	Варіант			
		Дослід 1 N – норма	Дослід 2 N – обрив	Дослід 3 N – норма	Дослід 4 N – обрив
		EL1 = 300 ВТ EL2 = 300 ВТ EL3 = 300ВТ		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					
	$U_N, В$				

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

23. Переключити вимикач S_N у положення «обрив», що відповідає обриву нульового проводу.

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

25. Відключити автоматичні вимикачі QF0, QF1 у складі ПР-11.

26. Відключити автоматичний вимикач ЩРН.

АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДІВ

27. 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?

28. Проаналізувати вплив стану нульового проводу (нормальний режим, обрив) на функціонування трифазного симетричного навантаження, що зібране за схемою «зірка» відповідно до результатів дослідів 1 та 2. Чому дорівнює напруга зміщення нейтралі? Чому? Результати аналізу відобразити у звіті.

29. За результатами дослідів 3 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 вимірним значенням.

30. Побудова векторної діаграми починається з побудови векторів фазних та лінійних напруг за наявності нульового проводу, тобто за даними дослідів 3, 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 дослідів 4). 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}, V .

Таблиця 1.3

Порівняння вимірних та розрахованих значень напруги зміщення нейтралі

Виміряно в досліді 4	Визначено за векторною діаграмою		Обчислено аналітично	
U_{N4}, V	U_{N5}, V	$\delta, \%$	U_{N6}, V	$\delta, \%$

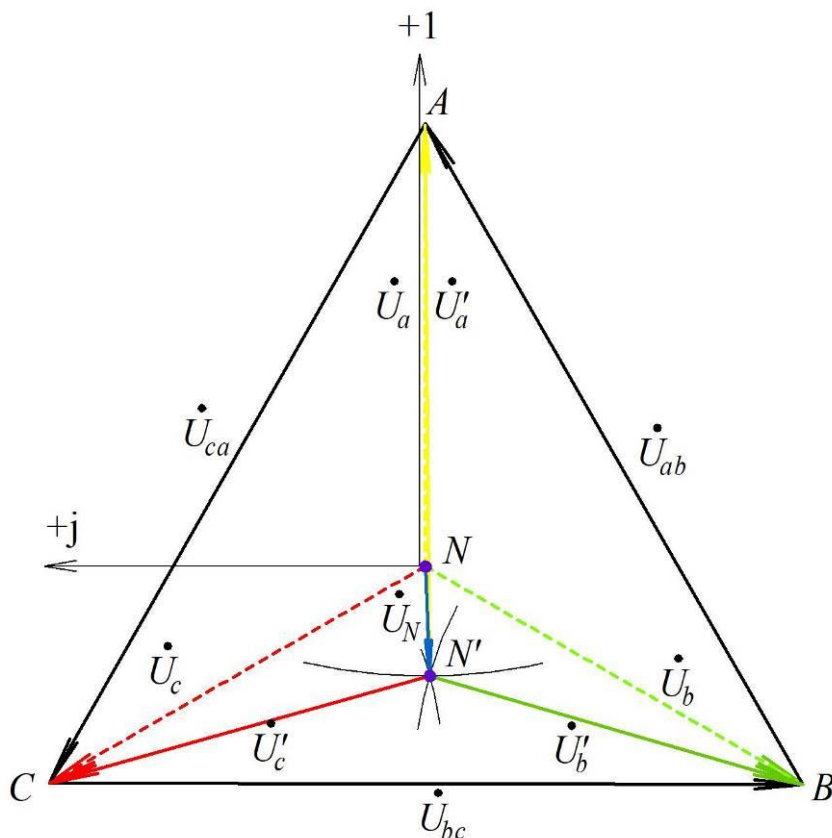


Рисунок 1.6 – Векторна діаграма напруг для схеми «зірка»: при обриві нульового проводу з’являється напруга \dot{U}_N між нульовими вузлами генератора та навантаженням

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 3, 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 досліду 3):

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

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.

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.

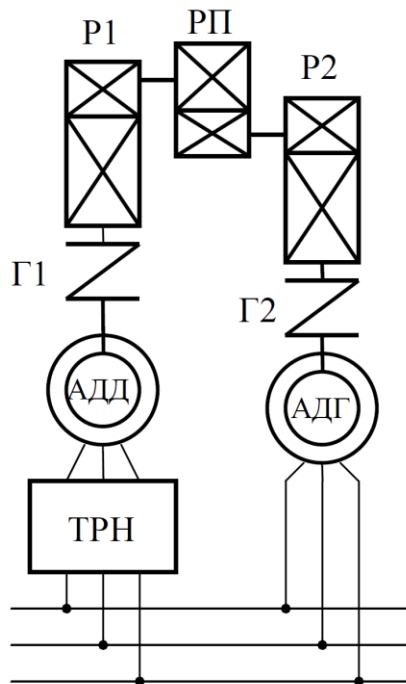


Рисунок 2.2 – Структурна схема навантажувального стенда для передексплуатаційних випробувань приводних блоків в умовах ХМЗ «Світло шахтаря»: АДД – асинхронний двигун, що працює в двигунному режимі; АДГ – асинхронний двигун, що функціонує в генераторному режимі; Г1, Г2 – гідромуфти; Р1, Р2 – редуктори 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} – реактивна індуктивна потужність, що надходить з мережі до стенда;

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

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

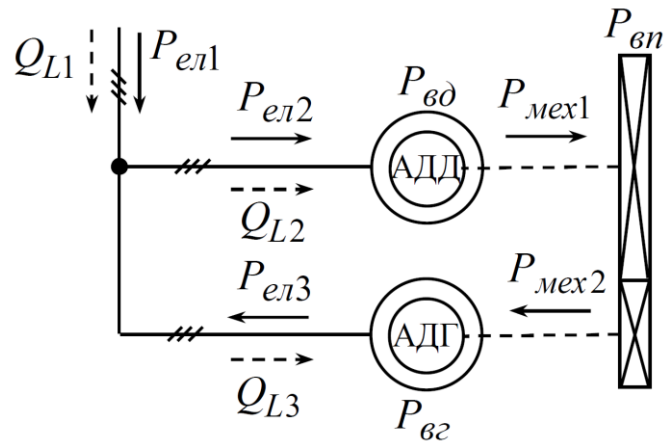


Рисунок 2.3 – Схема випробувального стенда, що пояснює розподіл потужностей

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:

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

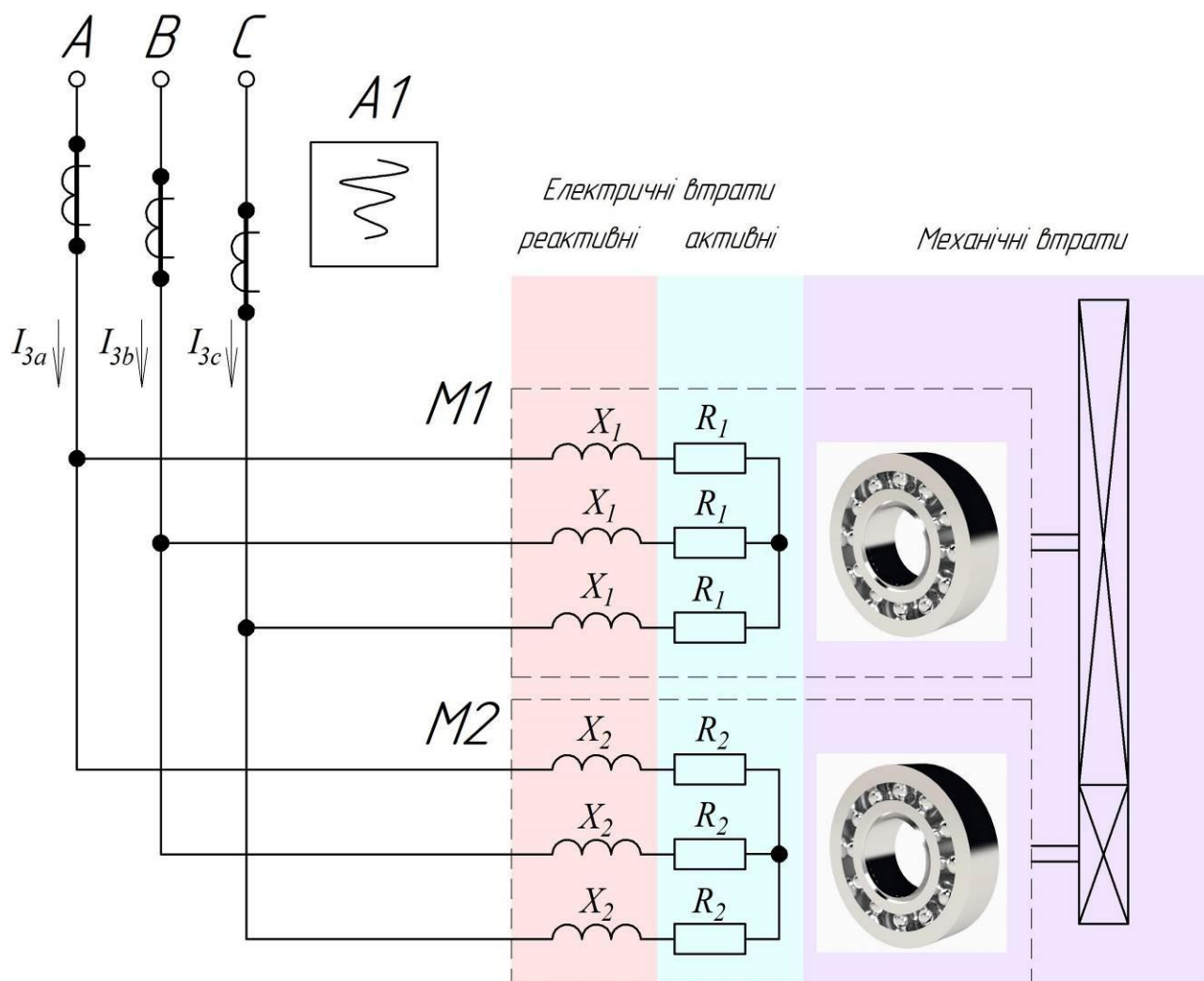


Рисунок 2.4 – Заступна схема випробувального стенда для визначення електричних та механічних втрат

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/programme-zabezpechennya/rpm-416-data-analysis.html>

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

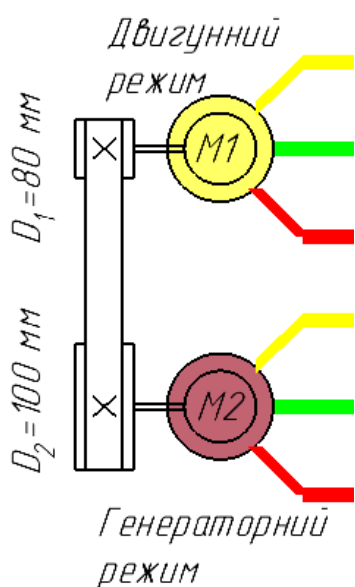


Рисунок 2.5 – Механічне з'єднання асинхронного двигуна та генератора

Таблиця 2.1

Значення параметрів асинхронних машин, що використовуються для 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	A0/2-11-4У3	1500	0,6	10,0	72,0	0,76	2,2	1,8	7,0
M2	A0/2-11-6У3	1000	0,4	9,0	68,0	0,65	2,2	1,8	6,5

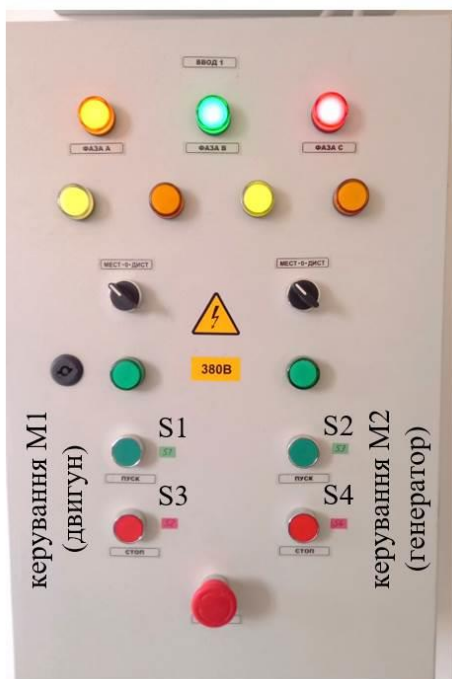


Рисунок 2.6 – Шафа керування двома двигунами

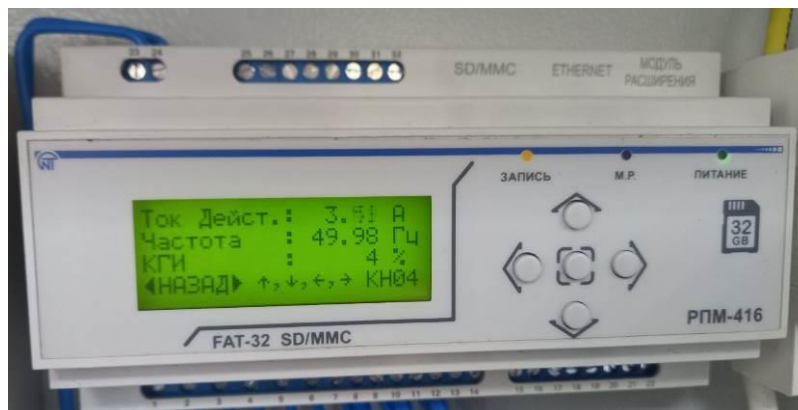


Рисунок 2.7 – Мікропроцесорний реєстратор параметрів РПМ-416

ЗАВДАННЯ

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

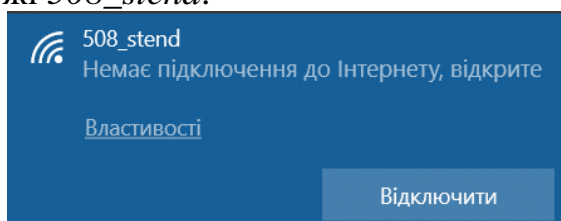
ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

Складання схеми лабораторного стенда

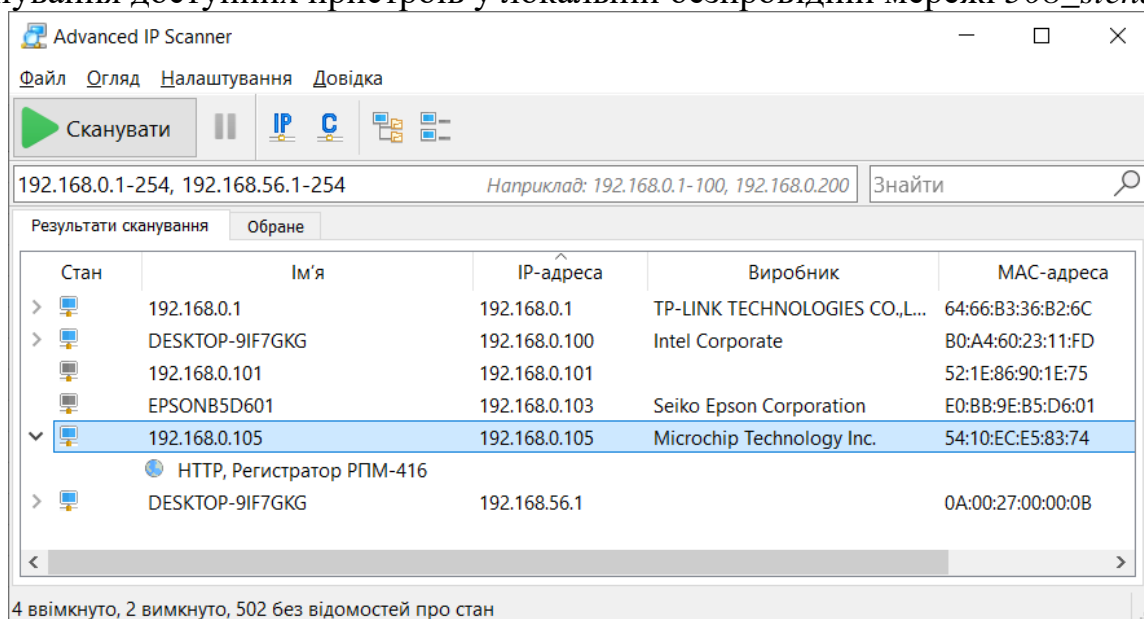
1. Зібрати схему лабораторної установки відповідно до рис. 2.8. Зробити фото лабораторної установки для додавання до звіту.
2. **Показати зібрану схему викладачеві.**

Підключення до реєстратора за безпроводною мережею

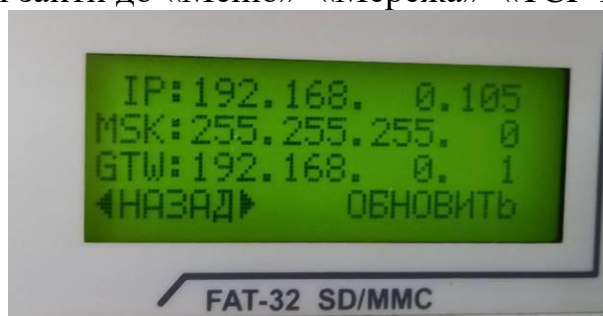
3. **Тільки з дозволу викладача подати напругу на лабораторний стенд:** ввімкнути автоматичний вимикач ЩРН та автоматичний вимикач QF0 у складі ПР-11.
4. На ноутбучі оновити перелік доступних безпроводних мереж, підключитися до мережі *508_stend*.




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.

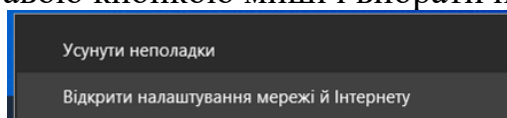


Також IP-адреса та MAC-адреса реєстратора доступні у меню пристрою. Для відображення цих даних на екрані необхідно за допомогою кнопок керування пристроєм зайти до «Меню»—«Мережа»—«TCP-IP»—«Стан»:



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:



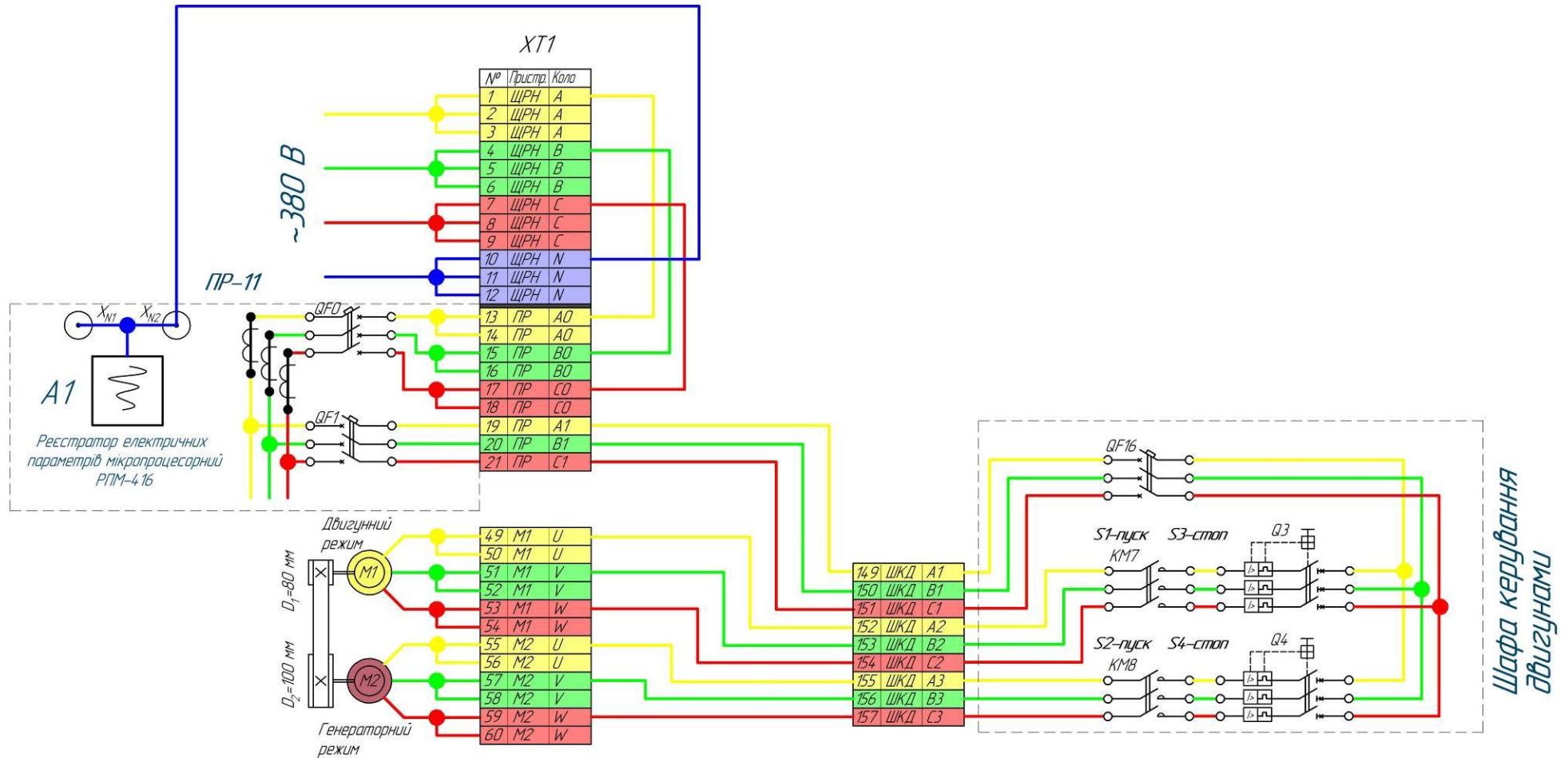
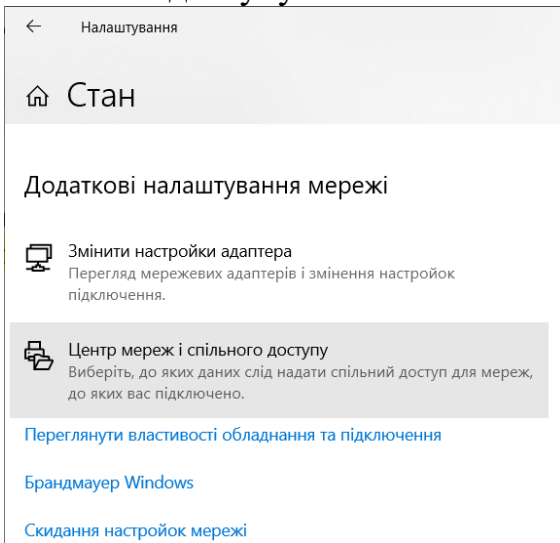
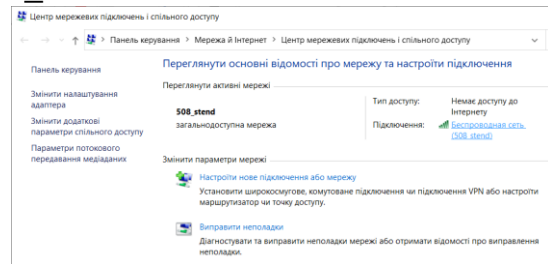


Рисунок 2.8 – Схема з'єднань лабораторного обладнання в ауд. 508 для дослідження функціонування двигунного навантаження

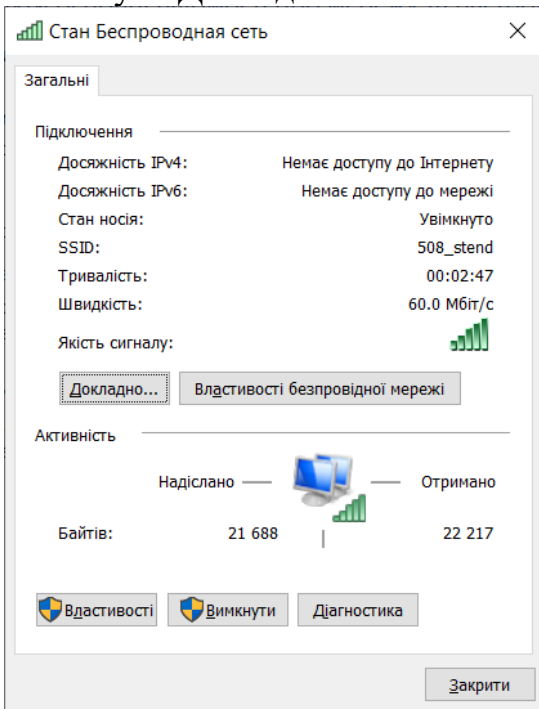
Відкрити Центр мереж і спільного доступу:



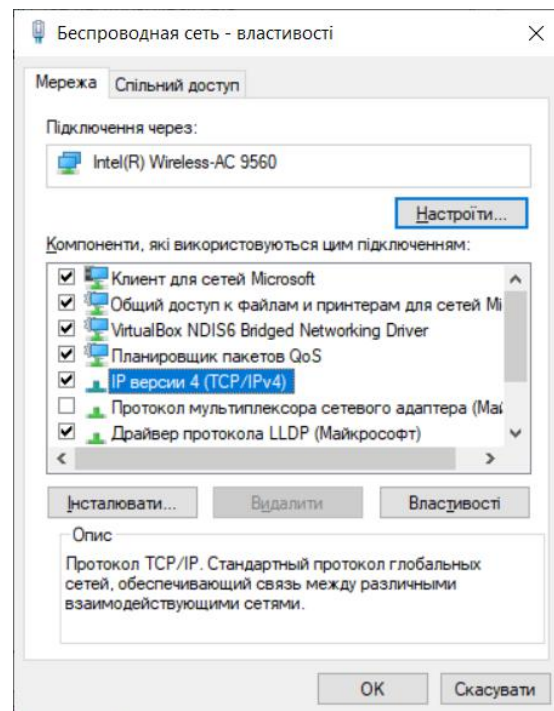
Натиснути на назві мережі 508_stend:



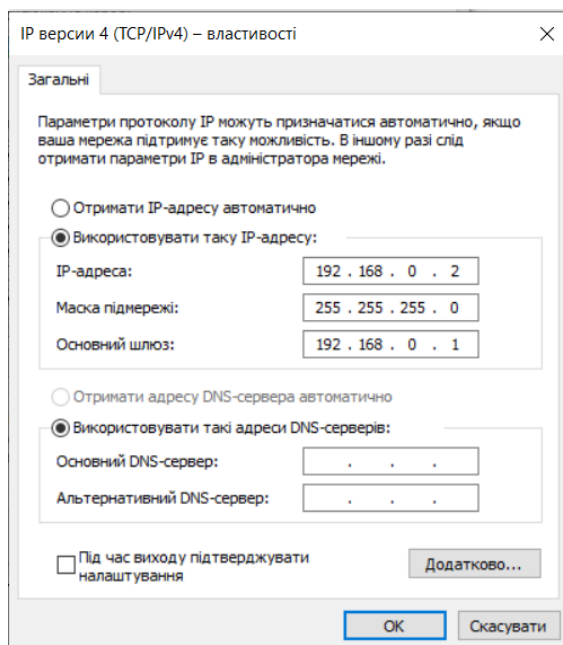
У вікні стану підключення натиснути Докладно:



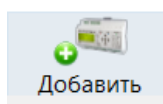
Обрати TCP/IPv4 і натиснути Властивості:



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):

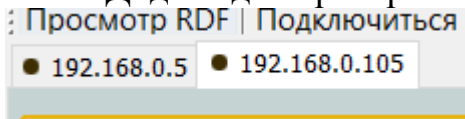


7. Запустити програму «РПМ-416 Аналізатор даних». Натиснути кнопку додавання нового пристрою

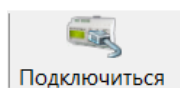


8. Ввести IP-адресу реєстратора. Номер порта змінювати не треба. Можна ввести власну назву пристрою. Заводський пароль admin

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, приклад – на рис. 2.10.

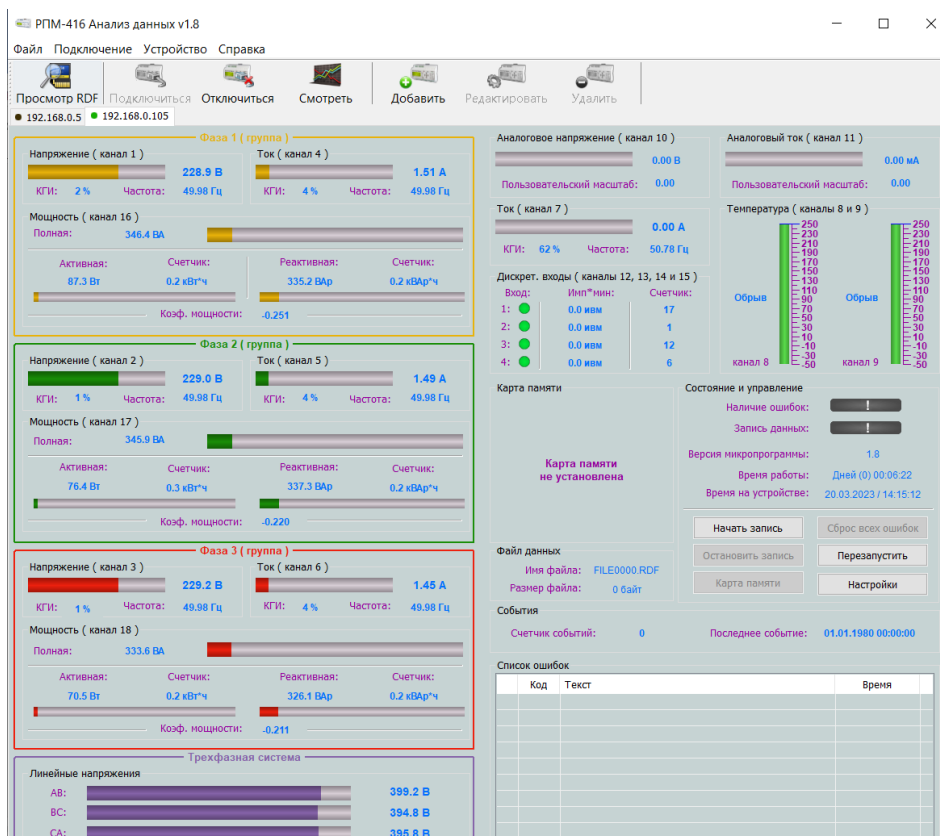


Рисунок 2.10 – Вимірювання значень робочих параметрів в програмі «РПМ-416 Аналізатор даних»

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

10. На шафі керування двигунами (рис. 2.11) 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.

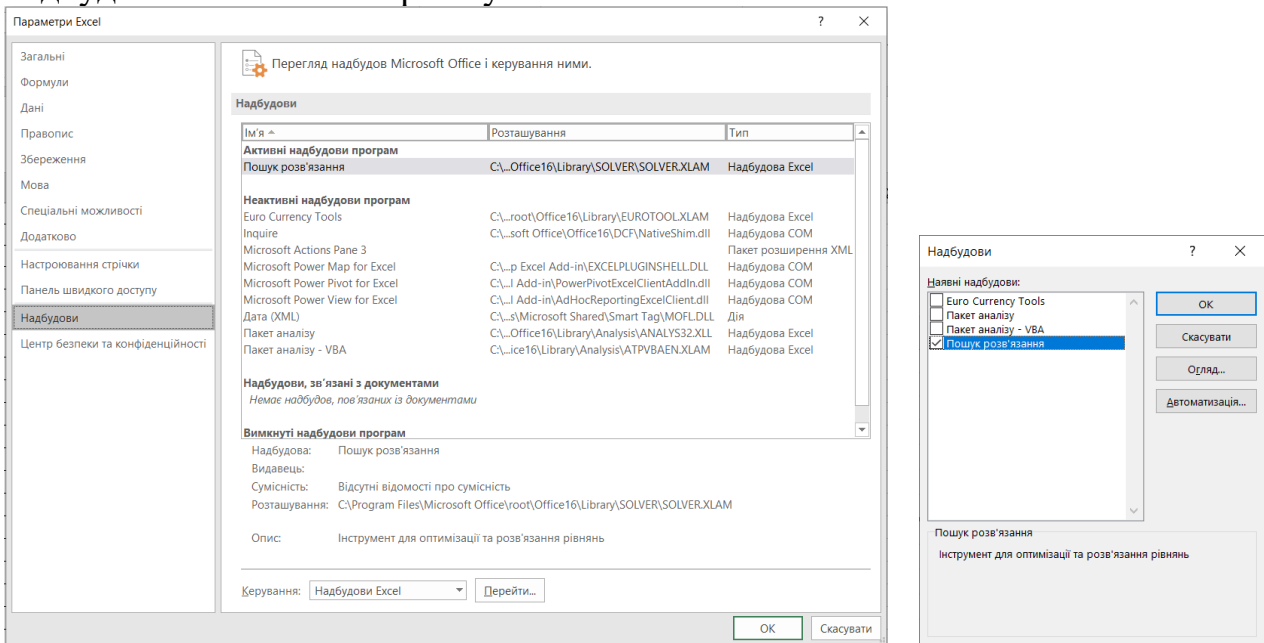
20. Закрити програму «Аналізатор даних».

21. Відповідно до п. 2.6 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.

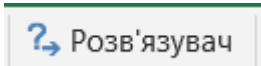
25. До комірок C23–G23 занести початкові значення для втрат механічної потужності. Наприклад, 100.

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

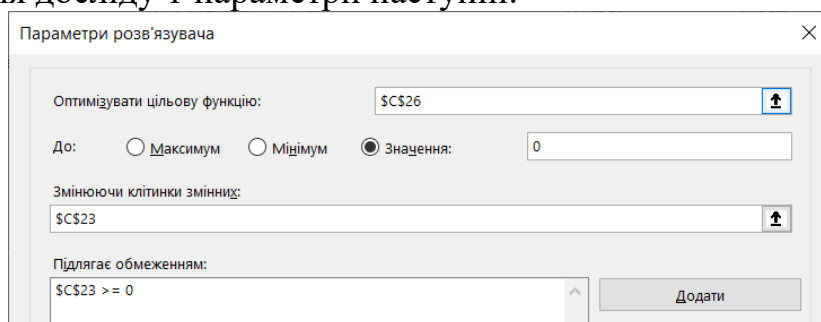
27. До комірок C25–G25 внести формули відповідно до виразу (2.12).

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.

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		$P_{1a}, Вт$					
8		$P_{1b}, Вт$					
9		$P_{1c}, Вт$					
10	M2	I_{2a}, A					
11		I_{2b}, A					
12		I_{2c}, A					
13		$P_{2a}, Вт$					
14		$P_{2b}, Вт$					
15		$P_{2c}, Вт$					
16	M1+M2	I_{3a}, A					
17		I_{3b}, A					
18		I_{3c}, A					
19		$P_{3a}, Вт$					
20		$P_{3b}, Вт$					
21		$P_{3c}, Вт$					
22			Розраховано				
23	$P_m, Вт$		100	100	100	100	100
24	$R_1, Ом$						
25	$R_2, Ом$						
26	$F(P_m)=$						
27	$m[P_m], Вт$						
28	$s[P_m], Вт$						
29	$m[R_1], Ом$						
30	$s[R_1], Ом$						
31	$m[R_2], Ом$						
32	$s[R_2], Ом$						

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).

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 режиму (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.

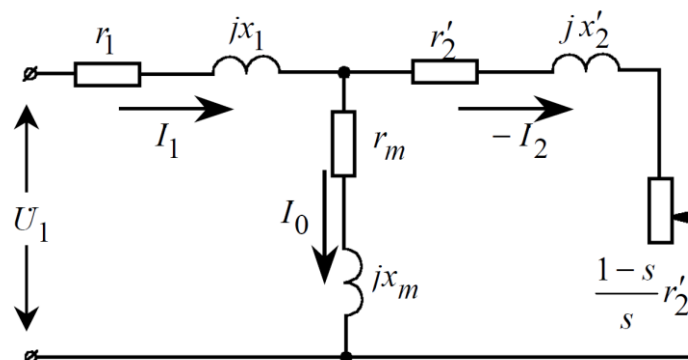


Рисунок 3.1 – Заступна схема асинхронної машини

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.

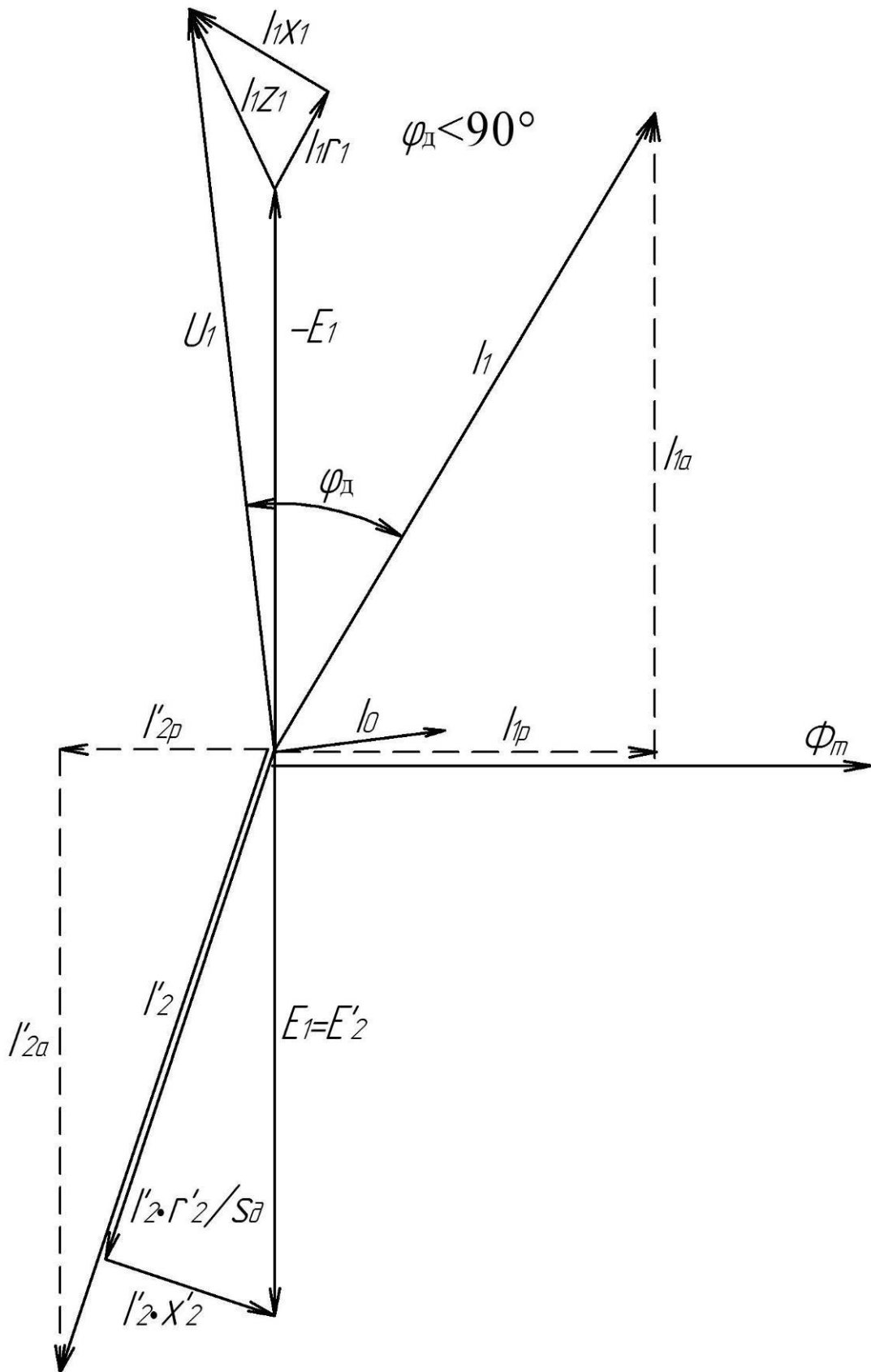


Рисунок 3.2 – Векторна діаграма асинхронного двигуна

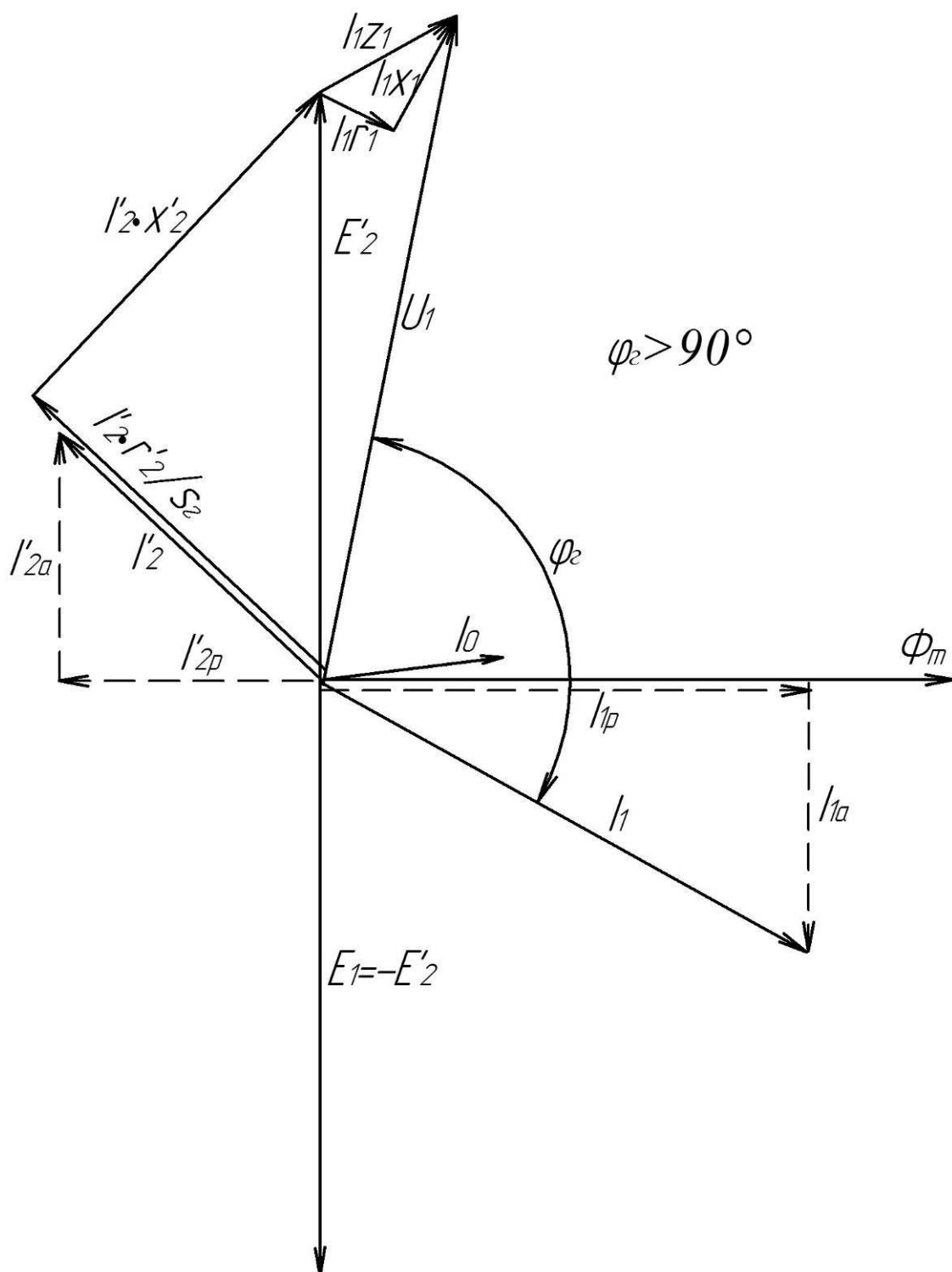


Рисунок 3.3 – Векторна діаграма асинхронного генератора

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).

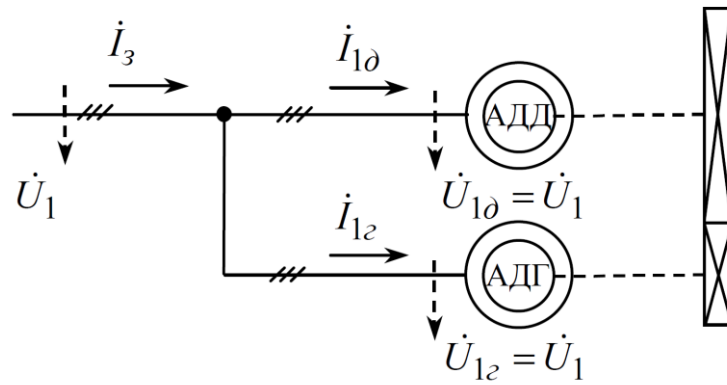


Рисунок 3.5 – Спрощена схема стенду, прийнята для побудови векторної діаграми

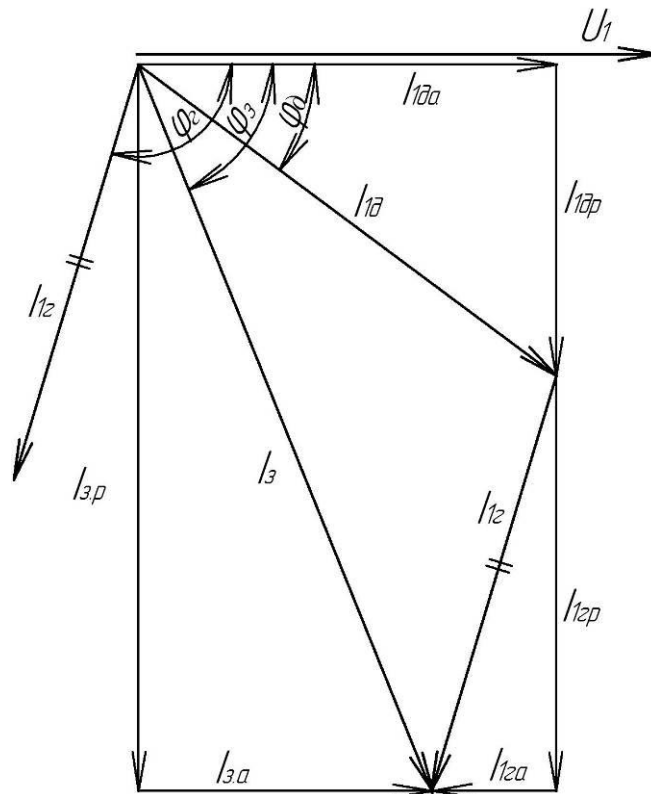


Рисунок 3.6 – Фрагмент узагальненої векторної діаграми системи

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.

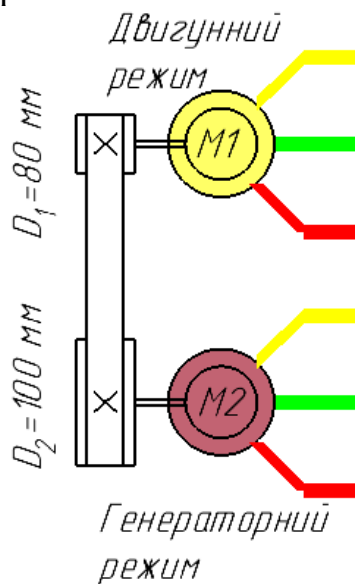


Рисунок 3.7 – Механічне з'єднання асинхронного двигуна та генератора

Таблиця 3.1

Значення параметрів асинхронних машин, що використовуються для дослідів

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	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

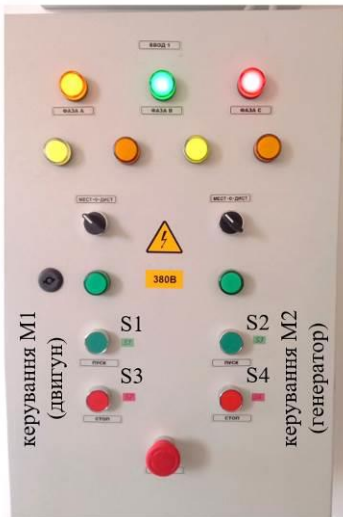


Рисунок 3.8 – Шафа керування двома двигунами

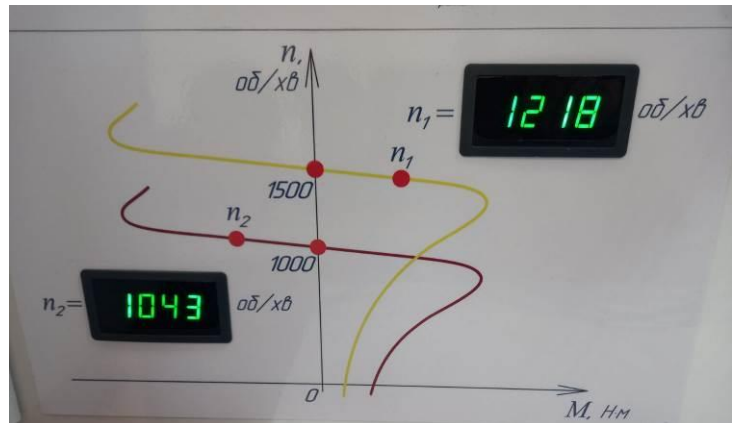


Рисунок 3.9 – Цифрові індикатори тахометрів

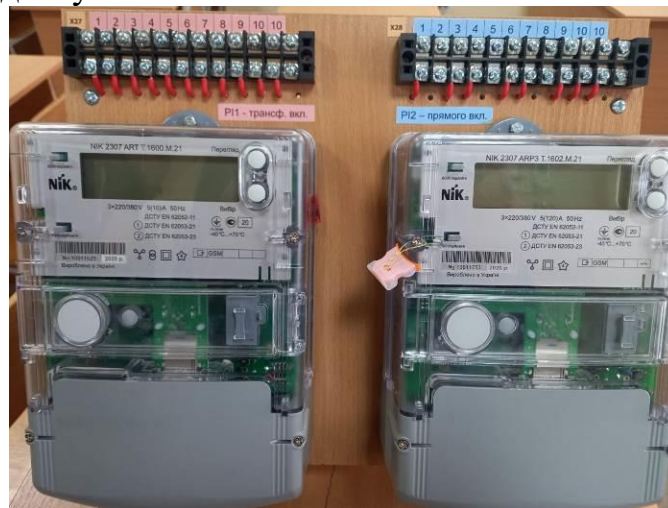


Рисунок 3.10 – Панель з цифровими лічильниками електроенергії, що використовується для вимірювань

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».

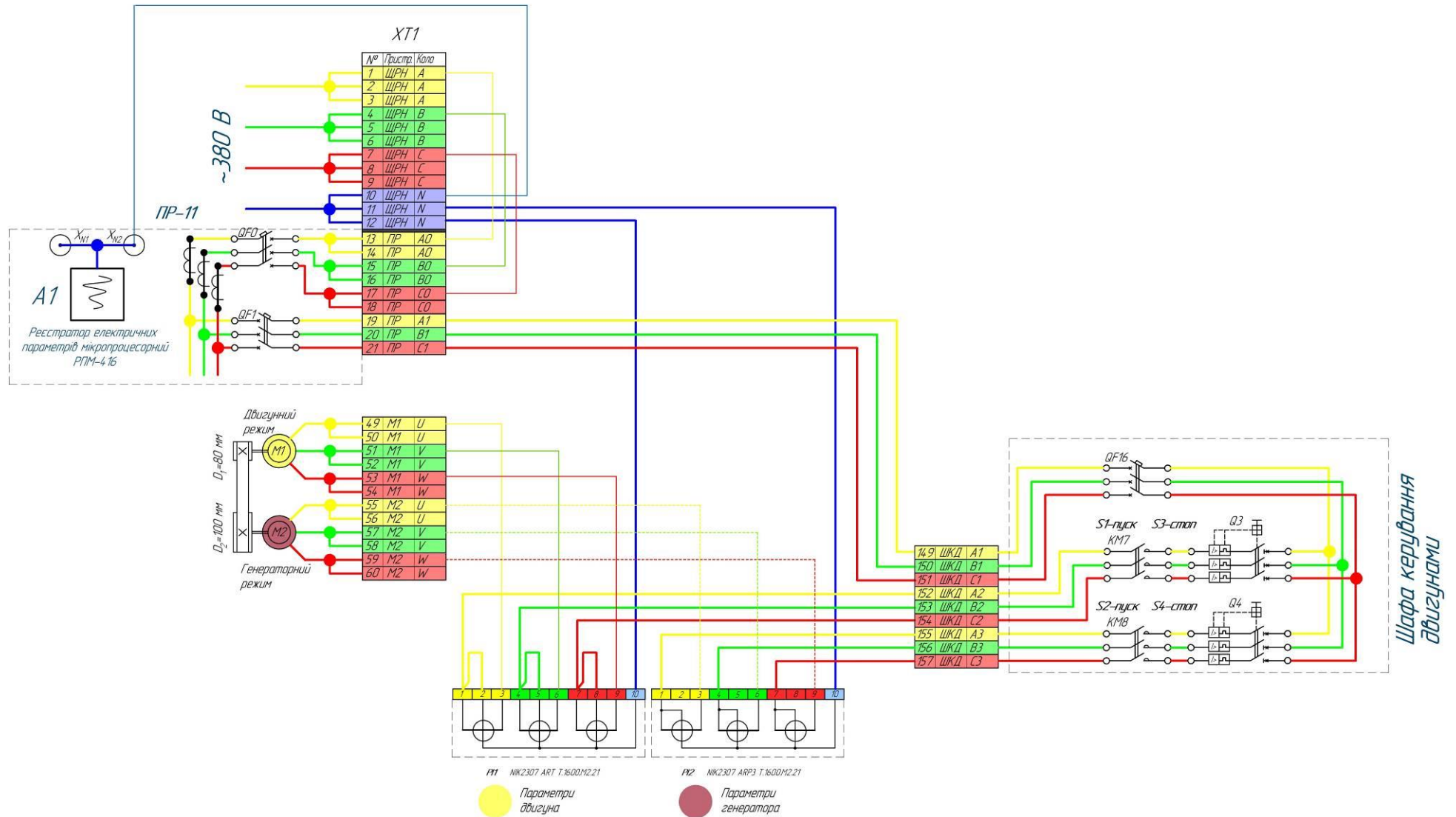


Рисунок 3.11 – Схема з'єднань лабораторного обладнання в ауд. 508 для проведення дослідів

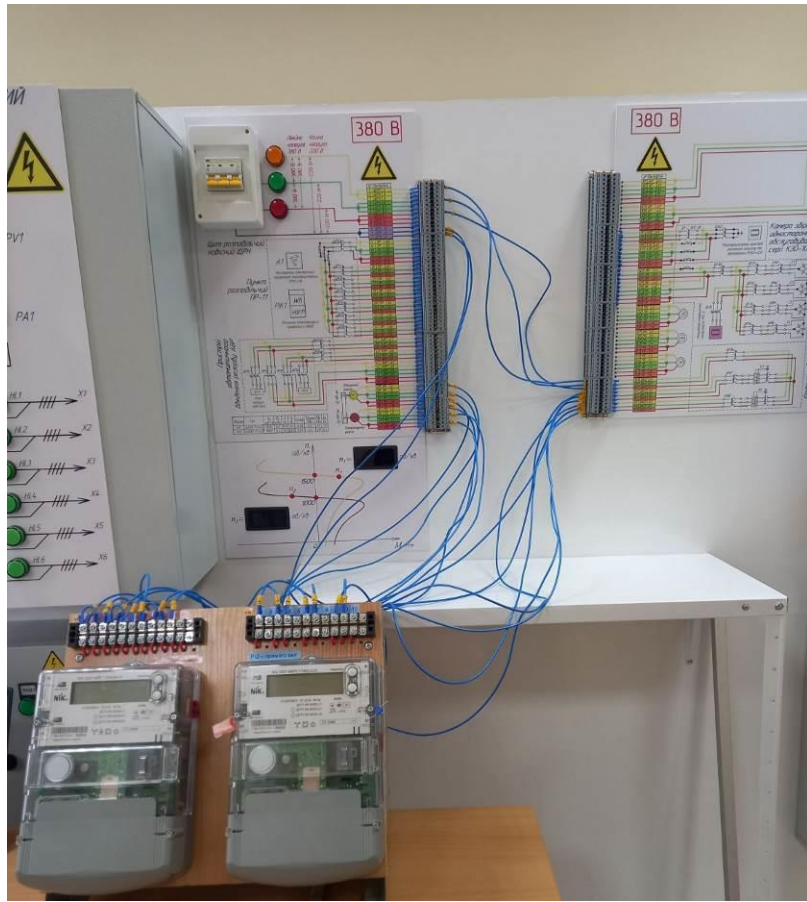


Рисунок 3.12 – Підключення панелі цифрових лічильників електроенергії до лабораторного стенда

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

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 $P'_{вт} = P_{M1} - P_{M2}$	Виміряно реєстратором $P_{вт}$	Відносна похибка $\delta = \frac{P_{вт} - P'_{вт}}{P_{вт}} \cdot 100\%$

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 реєстратором 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. 1. Які величини позначені на схемі? Яка їх фізична сутність?

2. Проаналізуйте векторну діаграма асинхронного двигуна, рис. 2. Поясніть порядок її побудови. Які величини показані на діаграмі? Поясніть положення векторів.

3. Проаналізуйте векторну діаграма асинхронного генератора, рис. 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. 4. Поясніть порядок її побудови. Які величини показані на діаграмі? Поясніть положення векторів.

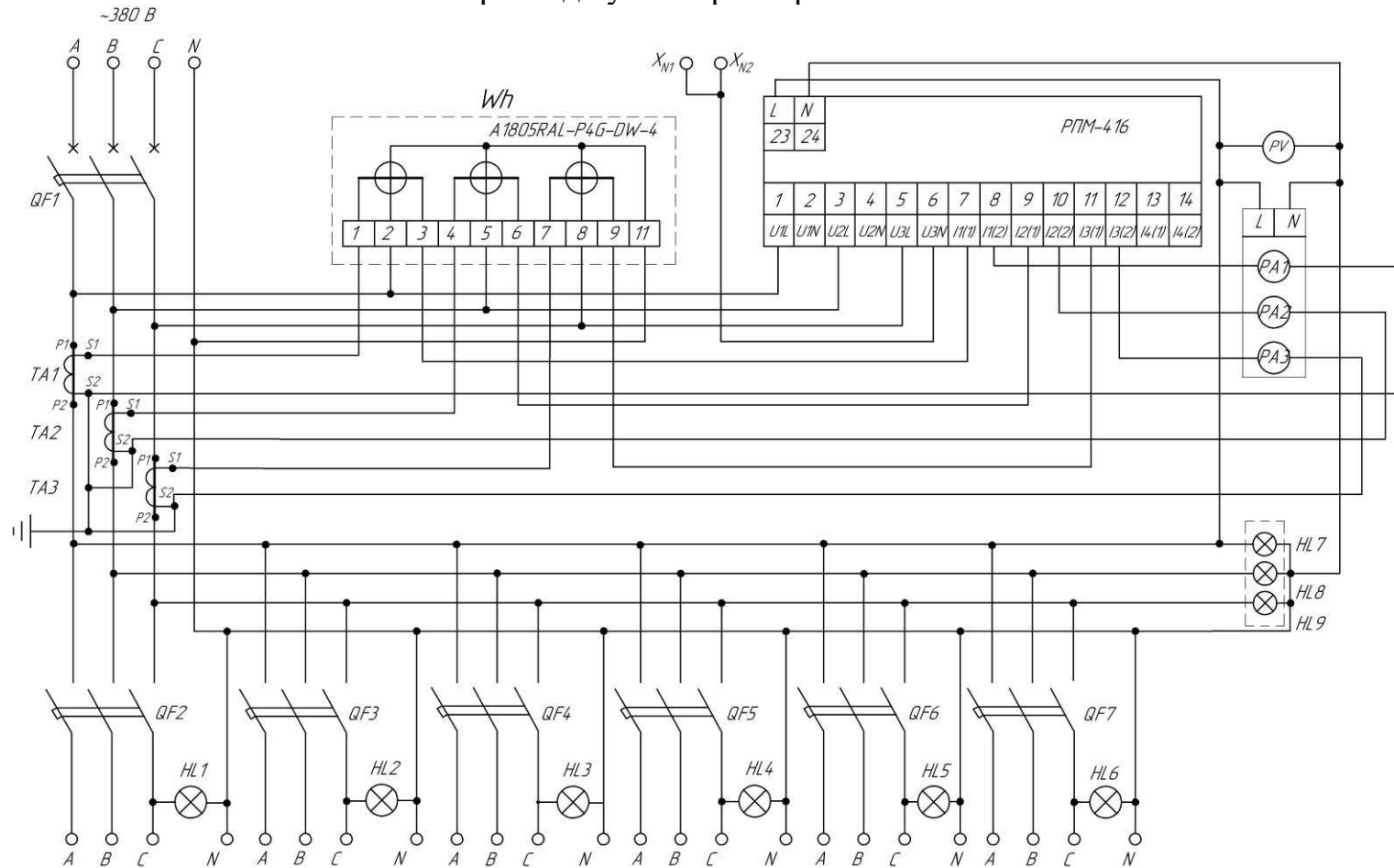
5. Проаналізуйте фрагмент узагальненої векторної діаграми випробувального стенда, рис. 6. Поясніть, яким чином положення векторів струму відносно вектора напруги визначає напрямки активної та реактивної потужностей кожної електричної машини у схемі стенда.

6. Накресліть комплексну площину, позначте квадранти та проаналізуйте умови функціонування активно-реактивного навантаження при розташуванні вектора повної потужності в кожному квадранті.

ЛІТЕРАТУРА

- 1 Інтелектуальні електричні мережі: елементи та режими: За заг. ред. акад. НАН України О. В. Кириленка / Інститут електродинаміки НАН України. К.: Ін-т електродинаміки НАН України, 2016. 400 с.
- 2 Зайцев Є. О., Кучанський В. В., Гунько І. О. Підвищення експлуатаційної надійності та ефективності роботи електричних мереж та електроустановок : монографія. Вінниця : ГО «Європейська наукова платформа», 2021. 156 с.
- 3 Оптимізація режимів електричних мереж з відновлюваними джерелами електроенергії / П. Д. Лежнюк, О. Є. Рубаненко, І. О. Гунько. Вінниця : ВНТУ, 2018. 174 с.
- 4 José M. Maza-Ortega, Antonio Gómez-Expósito (Eds.) HVDC/FACTS for Grid Services in Electric Power Systems. 2020. 276 p. <https://doi.org/10.3390/books978-3-03928-377-4>
- 5 Narain G. Hingorani, Laszlo Gyugyi Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems. Wiley-IEEE Press: 2000. 452 p.
- 6 Suman Bhowmick Flexible AC Transmission Systems (FACTS). Newton Power-Flow Modeling of Voltage-Sourced Converter-Based Controllers. CRC Press, 2016. 319 p.
- 7 Мікропроцесорна техніка : підручник / Ю. І. Якименко, Т. О. Терещенко та ін., за ред. Т. О. Терещенко . 2-ге вид., перероб. та доповн. К. : ІВЦ «Видавництво «Політехніка»; «Кондор», 2004. 440 с.
- 8 Пупена О. М., Ельперін І. В., Луцька Н. М., Ладанюк А. П. Промислові мережі та інтеграційні технології в автоматизованих системах : навч. посібник. К. : Вид-во «Ліра-К», 2011. 552 с.

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



ДОДАТОК Б
Перелік вимірювальних каналів реєстратора РПМ-416

Канал	Номер значення					
	1	2	3	4	5	6
1	Діюча напруга, В	Частота, Гц	Коефіцієнт гармонік, %	Пік + напруга, В	Пік - напруга, В	Миттєва напруга, В
2	Діюча напруга, В	Частота, Гц	Коефіцієнт гармонік, %	Пік + напруга, В	Пік - напруга, В	Миттєва напруга, В
3	Діюча напруга, В	Частота, Гц	Коефіцієнт гармонік, %	Пік + напруга, В	Пік - напруга, В	Миттєва напруга, В
4	Діючий струм, В	Частота, Гц	Коефіцієнт гармонік, %	Пік + струму, А	Пік - струму, А	Миттєвий струм, А
5	Діючий струм, В	Частота, Гц	Коефіцієнт гармонік, %	Пік + струму, А	Пік - струму, А	Миттєвий струм, А
6	Діючий струм, В	Частота, Гц	Коефіцієнт гармонік, %	Пік + струму, А	Пік - струму, А	Миттєвий струм, А
7	Діючий струм, В	Частота, Гц	Коефіцієнт гармонік, %	Пік + струму, А	Пік - струму, А	Миттєвий струм, А
8	Температура, °С	----	----	----	----	
9	Температура, °С	----	----	----	----	
10	Аналогова напруга, В	Значення для користування	----	----	----	
11	Аналоговий струм, мА	Значення для користування	----	----	----	
12	Дискретний вхід	Частота, Імп*хв	Лічильник імпульсів	----	----	
13	Дискретний вхід	Частота, Імп*хв	Лічильник імпульсів	----	----	
14	Дискретний вхід	Частота, Імп*хв	Лічильник імпульсів	----	----	
15	Дискретний вхід	Частота, Імп*хв	Лічильник імпульсів	----	----	
16	Потужність активна, Вт	Потужність реактивна, ВАр	Потужність повна, ВА	Коефіцієнт потужності, cos φ	Лічильник активної енергії, кВт*год	Лічильник реактивної енергії, кВАр*год
17	Потужність активна, Вт	Потужність реактивна, ВАр	Потужність повна, ВА	Коефіцієнт потужності, cos φ	Лічильник активної енергії, кВт*год	Лічильник реактивної енергії, кВАр*год
18	Потужність активна, Вт	Потужність реактивна, ВАр	Потужність повна, ВА	Коефіцієнт потужності, cos φ	Лічильник активної енергії, кВт*год	Лічильник реактивної енергії, кВАр*год
19	Лінійна напруга АВ, В	Лінійна напруга ВС, В	Лінійна напруга СА, В	Напруга зворотної послід-ті, В	Напруга прямої послід-ті, В	Напруга нульової послід-ті, В
20 – 40	Назви вимірюваних значень залежать від підключених модулів розширення					
Примітка – канали 16, 17, 18 та 19 не мають фізичних клем підключення, їх значення розраховуються виходячи з вимірюваних відповідних значень струму і напруги:						
<ul style="list-style-type: none"> – Канал 16 = Канал 1 і Канал 4; – Канал 17 = Канал 2 і Канал 5; – Канал 18 = Канал 3 і Канал 6; – Канал 19 = Кана 1, Канал 2 та Канал 3. 						