

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
ІННІ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ

Завідувач кафедри
інженерії енергосистем
(назва кафедри)
К.Т.Н., доцент _____ Є.О. Антипов
(підпис)
„___” _____ 2026 р.

БАКАЛАВРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему:

**«СИСТЕМА МОНІТОРИНГУ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОМЕРЕЖІ НА
ОСНОВІ МІКРОКОНТРОЛЕРА ARDUINO»**

02.03 – КР. 2606 "С" 2025.10.30 007 ПЗ

Спеціальність: 141 «Електротехніка, електроенергетика та електромеханіка»

Гарант освітньої програми

К.Т.Н., доцент _____
(науковий ступінь та вчене звання) (Підпис)

С.С. Макаревич
(ПІБ)

Керівник бакалаврської кваліфікаційної роботи

К.Т.Н., доцент _____
(науковий ступінь та вчене звання) (Підпис)

В.М. Павленко
(ПІБ)

Виконав

(Підпис)

Д.В. Зеленський
(ПІБ студента)

КИЇВ – 2026

Д.В. Зеленський

ЗМІСТ

ВСТУП	5
РОЗДІЛ 1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ МОНІТОРИНГУ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОМЕРЕЖІ	7
1.1. Електромережа як об'єкт моніторингу: основні параметри та режими роботи	7
1.2. Методи вимірювання електричних величин у мережах змінного струму	12
1.3. Сучасні системи моніторингу електроспоживання та якості електроенергії.....	18
Висновки до розділу 1	23
РОЗДІЛ 2 ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ АПАРАТНИХ ЗАСОБІВ СИСТЕМИ	24
2.1. Мікроконтролер Arduino як центральний елемент системи.....	24
2.2. Датчики та вимірювальні модулі для контролю напруги, струму і потужності.....	26
2.3. Засоби індикації, збереження та передавання даних	28
Висновки до розділу 2	30
РОЗДІЛ 3 РОЗРОБКА АПАРАТНО-ПРОГРАМНОЇ ЧАСТИНИ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ	31
3.1. Структурна та принципова схема системи	31
3.2. Алгоритм роботи та програмне забезпечення Arduino	32
3.3. Оцінка інерційності та перевірка точності вимірювань	38

					02.03 – КР. 2606 "С" 2025.10.30 007 ПЗ			
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дат				
Розроб.		Зеленський Д.В			Система моніторингу параметрів електромережі на основі мікроконтролера ARDUINO	Літ.	Арк.	Аркушів
Перевір.		Павленко В.М					3	
Реценз.						ІЕС-230016СТ		
Н. Контр.		Петренко А.В						
Затверд.		Антипов Є.О						

Висновки до розділу 3	42
РОЗДІЛ 4 ТЕОРЕТИЧНЕ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ, БЕЗПЕКА ТА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМИ	43
4.1. Проведення експериментальних вимірювань параметрів електромережі	43
4.2. Аналіз точності вимірювань системи	47
Висновки до розділу 4	52
ВИСНОВКИ.....	53
СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНИХ ДЖЕРЕЛ	55

					02.03 – КР. 2606 "С" 2025.10.30 007 ПЗ	Арк.
						4
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВСТУП

У сучасних умовах глобальної енергетичної трансформації, спричиненої зростанням попиту на енергоресурси, необхідністю підвищення ефективності їх використання та переходом до сталого розвитку, особливої актуальності набувають системи моніторингу параметрів електромережі для підвищення енергоефективності, контролю якості електроенергії та своєчасного виявлення відхилень напруги, струму, частоти й потужності. В умовах постійного зростання тарифів на електроенергію та воду а також потреби у зменшенні енергетичних витрат у житловому секторі та промисловості впровадження таких систем стає не лише бажаним, а й економічно доцільним.

Актуальність обраної теми зумовлена потребою у розробці доступного, функціонального та гнучкого рішення, яке б дозволяло в реальному часі здійснювати моніторинг параметрів електромережі для підвищення енергоефективності, контролю якості електроенергії та своєчасного виявлення відхилень напруги, струму, частоти й потужності. Існуючі комерційні системи переважно мають обмежений функціонал або високу вартість, що унеможливорює їх масове впровадження. У зв'язку з цим, розробка власної системи моніторингу на базі відкритих технологій та апаратних засобів, зокрема на основі мікроконтролера Arduino, є актуальною задачею.

Мета роботи – розробити систему моніторингу параметрів електромережі на основі мікроконтролера ARDUINO.

Об'єкт - процес вимірювання, збору, цифрової обробки та реєстрації основних електричних параметрів (відхилень напруги, струму, частоти й потужності) в мережах змінного струму.

Предмет – апаратно-програмний комплекс системи моніторингу параметрів електромережі на основі мікроконтролера ARDUINO.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

					02.03 – КР. 2606 "С" 2025.10.30 007 ПЗ	Арк.
						5
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

5. провести аналіз теоретичних основ моніторингу параметрів електромережі;
6. здійснити обґрунтування вибору апаратних засобів системи моніторингу;
7. виконати розробку апаратно-програмної частини системи моніторингу;
8. провести теоретичне та експериментальне дослідження, безпеки та оцінки ефективності пропонованої системи.

Методи дослідження - теорії електричних кіл, математичного моделювання для аналізу похибок, схемотехнічного проектування, системного програмування, а також експериментальні методи дослідження макетних зразків в умовах наближених до реальних умов експлуатації.

Практичне значення роботи полягає у створенні діючого прототипу доступної, енергоефективної та масштабованої системи моніторингу електромережі. Розроблені апаратні схеми та програмний код можуть бути використані як база для побудови систем «розумного будинку», комерційних систем технічного обліку енергії на підприємствах, а також у навчальному процесі при вивченні дисциплін, пов'язаних із мікроконтрольною технікою та автоматизацією вимірювань.

					02.03 – КР. 2606 "С" 2025.10.30 007 ПЗ	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 1

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ МОНІТОРИНГУ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОМЕРЕЖІ

1.1. Електромережа як об'єкт моніторингу: основні параметри та режими роботи

Відповідно до термінології, яка наведена у Кодексі електричних мереж, електрична мережа (електромережі) - сукупність енергетичних установок (підстанцій, розподільних установок та ліній електропередачі, які їх з'єднують) для передачі та розподілу електричної енергії. Електрична мережа ОЕС України складається з магістральних (напругою 220 кВ і вище), міждержавних (усіх класів напруги) та розподільних (напругою до 110 (150) кВ включно) електричних мереж;

- електричні розподільні мережі (розподільні мережі) - місцеві (локальні) електричні мережі напругою до 110 (150) кВ включно, які призначено для розподілу електричної енергії від магістральної мережі та/або електричної станції до споживача;

- якість електричної енергії - сукупність властивостей електричної енергії, які визначають ступінь її придатності для використання за призначенням.

Для означених електромереж та електричних розподільних мереж встановлено основні контрольовані параметри: діюче значення напруги, струм навантаження, частоту, активну, реактивну та повну потужність, коефіцієнт потужності, спожиту електроенергію.

Діюче значення змінної напруги та струму I_{ef} дорівнює силі такого постійного струму, який за той самий проміжок часу виділяє в деякому опорі таку саму кількість тепла, як і даний змінний струм.

Співвідношення між ефективними і амплітудними значеннями сили і напруги змінного струму:

					02.03 – КР. 2606 "С" 2025.10.30 007 ПЗ	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$I_{\text{эф}} = \frac{I_0}{\sqrt{2}}, \quad U_{\text{эф}} = \frac{U_0}{\sqrt{2}}. \quad (1.1)$$

Амперметр і вольтметр у колі змінного струму показують не миттєві й не максимальні значення струму і напруги, а ефективні. Якщо вольтметр у колі змінного струму показує 220В ($U_{\text{эф}} = 220\text{В}$), то $U_0 = \sqrt{2} \cdot 220\text{В} = 311\text{В}$. Отже, напруга змінного струму набуває значень у межах від +311В до 0 і від 0 до -311В.

Струм навантаження $I_{\text{нф}}$ – це фактична сила електричного струму, яка протікає в колі при підключенні до нього споживача енергії, вимірюється в Амперах (А).

Частота в електричній мережі f - означає електричну частоту системи, виражену в герцах, що може вимірюватися в усіх частинах синхронної зони з прийнятим допущенням про узгоджене значення для системи в часовому інтервалі секунд із незначними відхиленнями лише для різних точок вимірювання. Її номінальне значення становить 50 Гц.

Активна потужність P – активний компонент повної потужності на основній частоті, виражений у ватах або кратних вату одиницях, таких як кіловати (кВт) або мегавати (МВт).

Реактивна потужність Q – означає уявний компонент повної потужності на основній частоті, зазвичай виражений у кіловольт-амперах реактивних (кВАр) або мегавольт-амперах реактивних (МВАр).

Повна потужність S – геометрична сума активної та реактивної потужностей. Це загальне навантаження, яке створюється в мережі, вимірюється у вольт-амперах (ВА).

Коефіцієнт потужності $\cos \varphi$ – це безрозмірна фізична величина, яка показує співвідношення між корисною (активною) та повною потужністю. Що ближче значення $\cos \varphi$ до одиниці, то ефективніше використовується електроенергія.

					02.03 – КР. 2606 "С" 2025.10.30 007 ПЗ	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Спожита електроенергія W – це кількість електричної енергії, яку отримав та використав споживач (домогосподарство, бізнес чи підприємство) за певний проміжок часу. Вона вимірюється в кіловат-годинах (кВт·год) і є базою для розрахунку суми до сплати за комунальні послуги.

Разом з тим, фізичний сенс і нормування значення показників якості електроенергії, згідно з ГОСТ 13 109-97.

Нормування значень показників якості електроенергії відноситься до числа головних питань проблеми якості електроенергії. Систему показників якості електроенергії утворюють кількісні характеристики повільних (відхилення) і швидких (коливання) вимірювань діючого значення напруги, його форми і симетрії в трифазній системі, а також змін частоти. Принципи нормування показників якості електроенергії по напрузі ґрунтуються на техніко-економічні передумови та полягають у наступному:

а) показників якості електроенергії по напрузі мають енергетичний сенс, тобто характеризують потужність (енергію) спотворення кривої напруги, ступінь негативного впливу енергії спотворення на електрообладнання і технологічні процеси порівнюються із значенням показників якості електроенергії;

б) гранично допустимі значення показників якості електроенергії вибираються з техніко-економічних міркувань;

в) показники якості електроенергії нормуються протягом певного інтервалу часу із заданою ймовірністю для отримання достовірних і порівнянних значень;

г) допустимі значення показників якості електроенергії вказуються на затискачах в вузлах електромереж.

					02.03 – КР. 2606 "С" 2025.10.30 007 ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У більшості країн СНД прийнятий стандарт ГОСТ 13109-97 «Норми якості електричної енергії в системах електропостачання загального призначення», в якому в якості допустимих значень показників якості електроенергії прийняті, в основному, рівні електромагнітної сумісності, наведені в публікаціях МЕК в якості рекомендацій для складання національних стандартів.

Відповідно до стандарту ГОСТ 13109-97, систему Правил користування електроенергією при живленні від електромереж трифазного струму утворюють відхилення напруги, розмах змін напруги (амплітуда), інтенсивність (доза) флікера, коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої лінійної (фазної) напруги, коефіцієнт зворотної та нульової послідовності напруги, імпульс напруги, коефіцієнт тимчасової перенапруги, відхилення частоти.

Стандартом ГОСТ встановлено 2 види норм на якості електроенергії - нормативно допустимі і гранично допустимі величини. Оцінка відповідності показникам якості електроенергії вимогам стандарту проводиться протягом розрахункового часу, рівного 24 год.

Окрім вищезазначеного, нижче наведемо інформацію щодо можливих режимів роботи електричної мережі, оскільки саме вони визначають вимоги до системи моніторингу.

Режим роботи електричної мережі - це стан її елементів у певний момент часу, що характеризується конкретними значеннями струмів, напруг, частоти та активної/реактивної потужності. Основні стани та процеси класифікуються наступним чином:

- **Нормальний режим:** робочий стан, за якого всі параметри (напруга, частота, струм) перебувають у межах допустимих норм, а споживачі отримують електроенергію безперебійно.

					02.03 – КР. 2606 "С" 2025.10.30 007 ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- **Аварійний режим:** стан, що виникає через технологічні порушення (наприклад, коротке замикання або обрив проводу). Параметри виходять за гранично допустимі межі, що може призвести до пошкодження обладнання.
- **Післяаварійний режим:** стан мережі одразу після спрацювання захисту та відключення пошкодженої ділянки, але до моменту відновлення нормальної схеми живлення.
- **Характерний режим:** розрахунковий стан, який враховує планові зміни в мережі, як от введення нового обладнання чи зміну конфігурації в найближчій перспективі.

Вплив того чи іншого режиму роботи електричної мережі вносить вплив на зміну її основних параметрів, зокрема:

- **Сталий режим:** стан мережі, коли її параметри (напруга, струм) змінюються плавно або залишаються незмінними і є сталою реакцією на дію постійних джерел та навантажень.
- **Перехідний режим:** процес переходу від одного сталого режиму до іншого, що супроводжується різкою зміною параметрів струму та напруги (триває частки секунди при комутаціях чи аваріях).
- **Симетричний та несиметричний режими:** характеризують стан трифазної системи. При симетричному режимі напруги й струми рівні у всіх фазах, при несиметричному - спостерігається перекіс фаз.

У підсумку проведеного аналізу ми маємо основу для подальшого опису відомих методів вимірювання фізичних електричних величин у мережах змінного струму.

					02.03 – КР. 2606 "С" 2025.10.30 007 ПЗ	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.2. Методи вимірювання електричних величин у мережах змінного струму

Струм і напруга є найпоширенішими величинами, які необхідно вимірювати в широкому діапазоні. При вимірюванні змінних струмів і напруг вимірюваними величинами можуть бути їх миттєві, амплітудні, середні, середньовипрямлені та середньоквадратичні значення. У практиці електричних вимірювань найчастіше вимірюють параметри струмів і напруг синусоїдної форми, які переважно характеризують середньоквадратичним (діючим) значенням. Тому то переважну більшість засобів вимірювань змінних струмів і напруг градуують у середньоквадратичних діючих значеннях для синусоїдної форми кривої струму або напруги.

Робочими засобами вимірювань змінних струмів і напруг є амперметри (мікро-, мілі-, кілоамперметри) і вольтметри (мікро-, мілі-, кіловольтметри) різних систем, а також компенсатори змінного струму, компаратори напруг, реєструвальні прилади та електронні осцилографи.

Найпоширенішими є засоби вимірювань середньоквадратичних значень сигналів. Вимірюють середньоквадратичні значення (СКЗ) змінних струмів і напруг електродинамічними, електромагнітними, випрямними, аналоговими електронними і цифровими амперметрами і вольтметрами, а також електростатичними вольтметрами.

Для вимірювань СКЗ малих змінних струмів ($I < 1 \text{ мА}$) переважно застосовують цифрові, аналогові електронні і випрямні амперметри, а малих змінних напруг ($U < 10 \text{ мВ}$) – аналогові електронні вольтметри.

Найкращі метрологічні характеристики, а саме, найвищу точність і найменше власне споживання потужності, при вимірюванні СКЗ змінних струмів і напруг в діапазоні середніх значень (для струму – від одиниць міліампер до десятків ампер; для напруги – від десятків мілівольт до 1 кВ) мають цифрові та електродинамічні прилади.

					02.03 – КР. 2606 "С" 2025.10.30 007 ПЗ	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Вимірюють великі змінні струми ($I > 30 \text{ A}$) і напруги ($U > 1000 \text{ В}$) переважно електродинамічними, електромагнітними приладами із зовнішніми вимірювальними трансформаторами струму і напруги. Прямі вимірювання великих змінних напруг (до 75 кВ) здійснюють електростатичними вольтметрами.

Миттєві значення змінних струмів і напруг вимірюють реєструвальними приладами, електронними та електромеханічними осцилографами.

Середнє значення та амплітудне значення вимірюють випрямними й електронними приладами.

Вимірювання змінного струму. Як і при вимірюванні постійного струму, найпоширенішими є прямі вимірювання однофазного змінного струму, коли аналоговий чи цифровий амперметр вмикають послідовно із споживачем ЗН, струм I_X в якому необхідно виміряти – рис. 1.1 а.

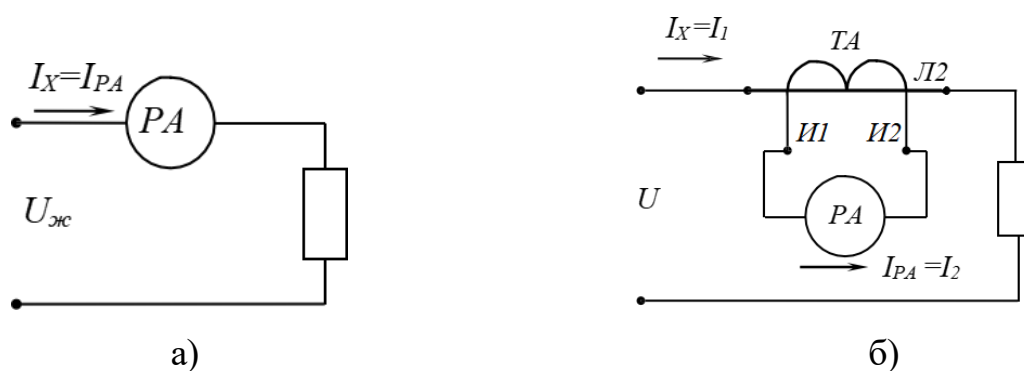


Рис. 1.1 – Схема вимірювання однофазного змінного струму: а – схема прямого вимірювання амперметром; б – схема вимірювання амперметром із вимірювальним трансформатором струму.

Результат вимірювання у такому разі, як і при вимірюванні постійного струму, визначають за формулою відповідно до показу амперметра.

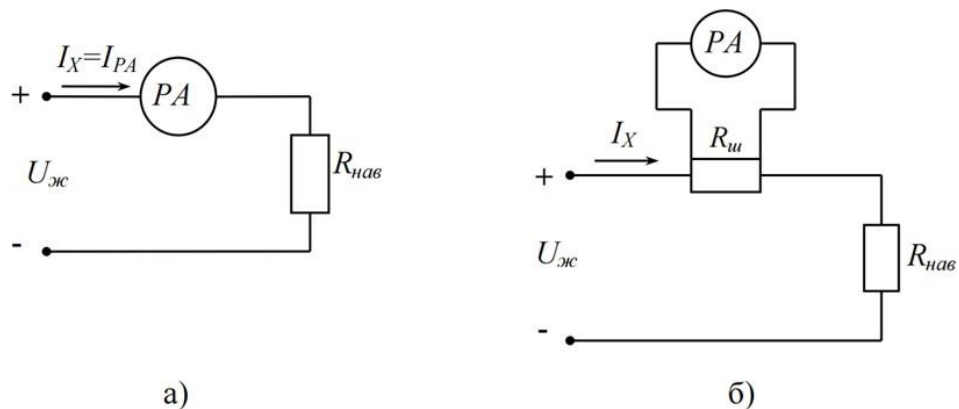


Рис. 1.2 – Схема вимірювання однофазного постійного струму: а – схема прямого вимірювання амперметром; б – схема вимірювання амперметром із змінним шунтом.

Аналогічно, як і у схемі на рисунку 1.2, увімкнення в коло споживача $Z_{нав}$ амперметра з певним внутрішнім опором R_{PA} змінює струм споживача до його увімкнення, що призводить до виникнення методичної похибки вимірювання струму, відносно значення якої дорівнює

$$\delta_{I..м} = \frac{\Delta_{I..м}}{I_X} \cdot 100\% = \frac{I_{PA} - I_X}{I_X} \cdot 100\% = -\frac{R_{PA}}{R_{PA} + Z_{нав} + R_{ДЖ}} \cdot 100\%, \quad (1.1)$$

де $Z_{нав}$ – модуль комплексного опору споживача, в якому вимірюють струм

Для зменшення методичної похибки необхідно, щоб $R_{PA} \ll Z_{нав}$, тому то слід використовувати амперметр з якомога меншим внутрішнім опором порівняно з опором об'єкта, струм в якому вимірюється.

Розширюють діапазон вимірювання амперметрів змінного струму за допомогою вимірювальних трансформаторів струму. Вимірювання здійснюється за схемою, яка наведена на рисунку 1.1.б. Споживач, струм I_X в якому необхідно виміряти, при цьому підключається послідовно з первиною обмоткою «Л1» - «Л2» трансформатора струму ТА, а амперметр РА під'єднують до вторинної обмотки «И1» - «И2» трансформатора струму ТА.

Значення вимірюваного струму I_X знаходять за формулою

$$I_X = I_{PA} \cdot k_{IH} = I_{PA} \cdot \frac{I_{1H}}{I_{2H}}, \quad (1.2)$$

де k_{IH} – номінальний коефіцієнт трансформації вимірювального трансформатора струму; I_{1H} , I_{2H} – номінальні значення первинного та вторинного струмів вимірювального трансформатора струму відповідно.

Границю вимірювання амперметра I_K при вимірюванні струму I_X за схемою вибирають за умовою

$$I_K \geq I_{PA} = I_2, \quad (1.3)$$

при цьому

$$I_{PA} = I_2 = \frac{I_X}{k_{IH}}. \quad (1.4)$$

Вимірювання змінної напруги. Як і при вимірюванні напруги постійного струму, найпоширенішими є прямі вимірювання напруги однофазного змінного струму, коли аналоговий чи цифровий вольтметр вмикають паралельно із споживачем Z_H чи ділянкою кола, напругу U_X на якому необхідно виміряти – рисунок 1.3.а.

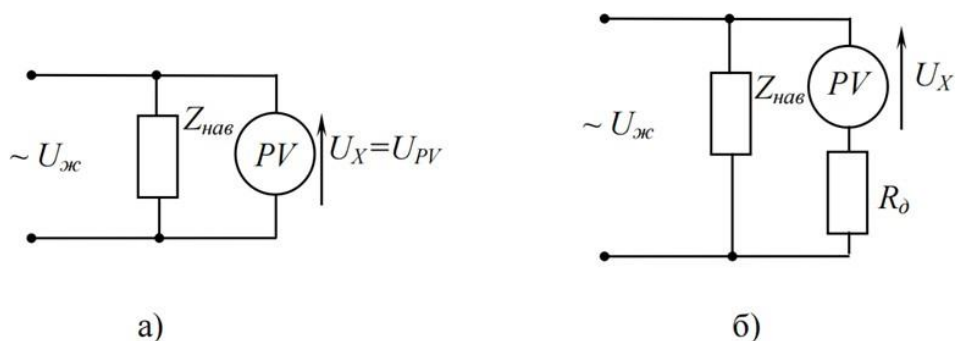


Рис. 1.3 - Схема вимірювання напруги в однофазному колі змінного струму: а - схема прямого вимірювання напруги; б - схема вимірювання напруги вольтметром із додатковим резистором

Аналогічно, як і в схемі на рисунку 1.2.а, увімкнення паралельно до споживача $Z_{нав}$ вольтметра з внутрішнім опором R_{PV} змінює спад напруги U_X на ньому, що призводить до виникнення методичної похибки вимірювання напруги, відносне значення якої $\delta_{U..м}$, дорівнює

$$\delta_{U..м} = - \frac{Z_{нав} / R_{PV}}{Z_{нав} / R_{PV} + Z_{нав} / R_{ДК} + 1} \cdot 100\%, \quad (1.5)$$

де $Z_{нав}$ – модуль комплексного опору споживача, спад напруги на якому вимірюють.

Як видно з формули (1.5) для зменшення методичної похибки необхідно використовувати вольтметр з якомога більшим внутрішнім опором порівняно з опором об'єкта, на якому вимірюється напруга, так як $R_{PV} \gg Z_{нав}$.

Схема вимірювання напруги змінного струму вольтметром із зовнішнім додатковим резистором наведена на рисунку 1.3.б. Вибір додаткового резистора і визначення результату вимірювання здійснюється аналогічно, як під час вимірювання напруги у колах постійного струму. Зовнішні додаткові резистори у вимірювальній практиці застосовуються рідко, оскільки сучасні аналогові і цифрові вольтметри змінного струму мають границі вимірювання від 600 В до 1000 В, що перекриває діапазон напруг під час масових технічних вимірювань.

В електроенергетиці здійснюються вимірювання напруги при вищих напругах ($U > 1000 \text{ В}$), тому то для розширення діапазону вимірювання вольтметрів змінного струму використовують вимірювальні трансформатори напруги TV – рисунок 1.4.

					02.03 – КР. 2606 "С" 2025.10.30 007 ПЗ	Арк.
						16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

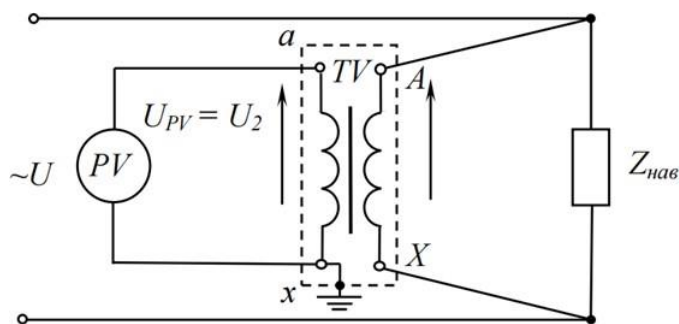


Рис. 1.4 – Схема вимірювання напруги в однофазному колі змінного струму вольтметром із вимірювальним трансформатором напруги

До споживача $Z_{нав}$, спад напруги U_X , на якому необхідно виміряти, паралельно підключається первинна обмотка «А» - «Х» вимірювального трансформатора напруги TV , а вольтметр під'єднують до вторинної обмотки «а» - «х» трансформатора. Корпус та затискач «х» вторинної обмотки заземлюють.

Значення вимірюваної напруги U_X знаходять за формулою

$$U_X = U_{PV} \cdot k_{UH} = U_{PV} \cdot \frac{U_{1H}}{U_{2H}}, \quad (1.6)$$

де k_{UH} – номінальний коефіцієнт трансформації вимірювального трансформатора напруги; U_{1H} , U_{2H} – номінальні значення первинної та вторинної напруги вимірювального трансформатора напруги відповідно.

Границю вимірювання вольтметра U_K при вимірюванні напруги U_X за схемою (див. рисунок 1.4) вибирають за умовою

$$U_K \geq U_{PV} = U_2, \quad (1.7)$$

при цьому

$$U_{PV} = U_2 = \frac{U_X}{k_{UH}}. \quad (1.8)$$

На похибку вимірювання напруги впливає похибка трансформатора напруги, тому то його клас точності повинен бути вищим, ніж клас точності вольтметра.

1.3. Сучасні системи моніторингу електроспоживання та якості електроенергії

Останнє десятиліття характеризується активними науковими розробками у сфері інтелектуального енергообліку [11]. В українських і європейських роботах значна увага приділяється архітектурі АСКОЕ, методам їх інтеграції з корпоративними системами управління, а також економічному ефекту від впровадження таких рішень. У працях [12, 13] висвітлено методи підвищення енергоефективності за допомогою автоматизованих систем контролю, а також можливості інтеграції таких систем у загальну інфраструктуру енергоменеджменту підприємства. Автори [14, 15] розкривають сучасні підходи до систем енергоменеджменту, класифікацію SCADA-систем, архітектуру та функціональні можливості. Це становить базу для розуміння того, як SCADA інтегрується у виробниче середовище та які рішення підтримують енергетичний моніторинг.

У працях [16, 17] розглядає аналіз комунікаційних технологій для Smart Metering у міських агломераціях. Вона підкреслює роль надійних комунікаційних систем для збору даних з численних вузлів обліку. У дослідженнях [18, 19] надається огляд штучного інтелекту, що є ключовим для підвищення динамічності та адаптивності систем управління енергією за допомогою AI-технологій.

Таким чином, сучасні системи моніторингу - це програмно-апаратні комплекси, що об'єднують технології Smart Metering (рис. 1.5) та аналізатори якості мережі для запобігання аваріям та зниження витрат. Вони збирають дані з цифрових лічильників та датчиків у реальному часі, оптимізуючи енергоспоживання та захищаючи обладнання від перепадів напруги.

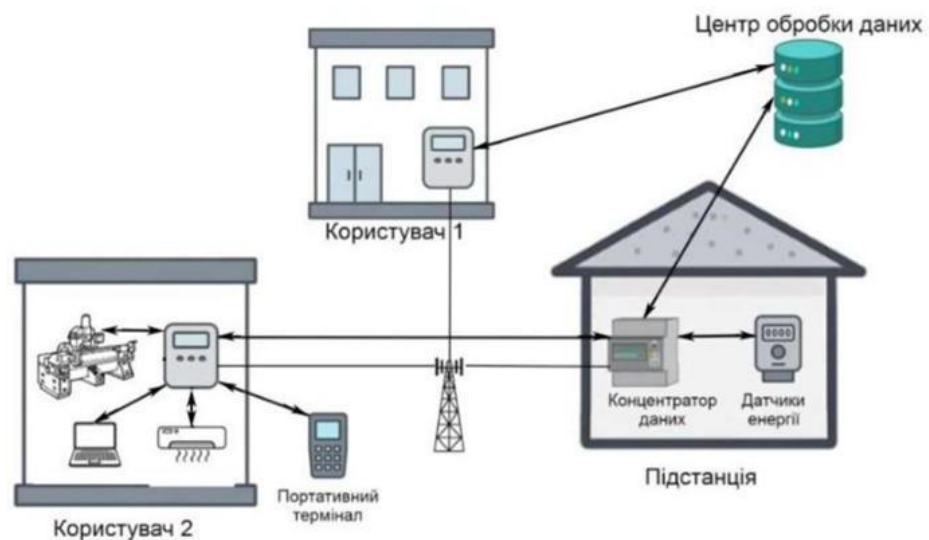


Рис. 1.5 - Система Smart Metering та її компоненти

Надійна робота Smart Metering безпосередньо залежить від вибору телекомунікаційної інфраструктури. Наданий час застосовуються такі технології:

- бездротові – GSM/GPRS/EDGE, LTE, 5G – забезпечують високу швидкість передачі даних і охоплюють значні території. ZigBee та 6LoWPAN орієнтовані на локальні енергоефективні мережі з низьким енергоспоживанням. WiMAX та Wi-Fi застосовуються у корпоративних мережах;

- дротові – PLC (Power Line Communication) із стандартами PRIME і SITRED, що використовують наявні електричні мережі як канал зв'язку; M-Bus для теплових, газових і водяних лічильників; DLMS/COSEM та IEC61850 як протоколи стандартизації. Гібридні рішення поєднують дротові та бездротові технології, що підвищує надійність і дає змоги балансувати навантаження на комунікаційну мережу [11].

Для глибшого розуміння, які завдання вирішують ці комплекси, розглянемо їх окремо.

1. Моніторинг електроспоживання (Smart Metering). Ці системи фіксують точні обсяги споживання енергії за годиною, дозволяючи уникнути переплат та оптимізувати навантаження на мережу:

- АСКОЕ (Автоматизована система комерційного обліку): уніфікована система збирання даних для побутових, комерційних та промислових об'єктів. Автоматично знімає покази з лічильників та передає їх постачальникам послуг, виключаючи людський фактор;

- IoT (Інтернет промов) та хмарні платформи: датчики споживання монтуються на окремі лінії або електроприлади та передають статистику на смартфон чи ПК. Це дозволяє користувачам із середнім доходом контролювати енерговитрати без встановлення дорогих систем "розумного будинку".

- Аналітика на базі ШІ: сучасні хмарні платформи здатні розпізнавати, які саме прилади (кондиціонери, обігрівачі, насоси) працюють неефективно або споживають багато енергії.

2. Моніторинг якості електроенергії (Power Quality). Відстеження стану мережі захищає чутливу техніку від передчасного виходу з ладу та дозволяє діагностувати сховані проблеми електромереж. Головні параметри, які аналізують системи:

- Відхилення напруги та частоти: контроль провалів, стрибків напруги та стабільності частоти (усталень стандарт - 50 Гц);

					02.03 – КР. 2606 "С" 2025.10.30 007 ПЗ	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Коефіцієнт гармонік (THD): аналіз найвищих гармонік, що виникають через роботу імпульсних блоків живлення, зварювальних апаратів чи частотних перетворювачів. Вони можуть призводити до перегріву кабелів та трансформаторів;

- Несиметрія напруг: відстеження перекосів фаз, що критично для трифазних двигунів;

- Флікер та коливання напруги: виявлення мерехтіння світла, викликаного різкими змінами навантаження.

Нижче наведемо приклади технічної реалізації апаратної частини пропонованої системи моніторингу параметрів електромережі на основі мікроконтролера Arduino.

1. Вимірювальні пристрої (апаратний рівень). Ці прилади встановлюються в електричні щити для збирання первинних даних:

- NiK 2303 ARTP, Matrix AMM, Елвін. Відповідають стандарту ДСТУ EN 61000-4-30 (Клас А або S);

- Schneider Electric PowerLogic PM8000, Siemens SENTRON PAC4200, Janitza UMG 96;

- Fluke 1777, Sonel PQM-707, Chauvin Arnoux CA 8336;

- Shelly Pro 3EM, Sonnof POW, Smarpee Infinity.

2. Комунікаційне обладнання. Ці пристрої зчитують дані з вимірювачів через локальні протоколи та передають їх у хмару або на сервер.

- Конвертери інтерфейсів: перетворюють промисловий протокол Modbus RTU (інтерфейс RS-485) у Modbus TCP (Ethernet/ Wi-Fi).

- Промислові шлюзи: збирають дані з десятків лічильників, архівують їх у внутрішню пам'ять (на випадок зникнення зв'язку) і передають каналами 4G/5G, NB-IoT або LoRaWAN.

3. Програмне забезпечення. Локальні SCADA-системи: програми, що розгортаються на сервері підприємства для моніторингу в реальному часі.

					02.03 – КР. 2606 "С" 2025.10.30 007 ПЗ	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Порівняльна таблиця рішень

Критерій	Побутовий / Офісний рівень	Промисловий рівень (Заводи, ТЦ, ЦОД)
Основна мета	Контроль витрат, автоматизація	Енергоменеджмент, захист обладнання, ГОСТ/ДСТУ
Тип пристроїв	ІоТ-монітори, смарт-лічильники	Стаціонарні аналізатори Класу А / S
Параметри	кВт·год, струм, напруга	Гармоніки (до 63-ї), флікер, осцилограми аварій
Монтаж	Легкий (часто без розриву ліній)	Професійний (трансформатори струму та напруги)

Окремої уваги заслуговує комп'ютерна система моніторингу параметрів електромережі на основі мікроконтролера Arduino – це інтегрована система, яка забезпечує збір, обробку та аналіз даних про параметрів електромережі та інші важливі показники. Ця система повинна бути надійною та точною, щоб забезпечити достовірність інформації про вимірювані струм, напругу та споживану потужність споживачем.

Для подальшого опрацювання пропонується опис системи моніторингу параметрів електромережі для вимірювання напруги, струму та потужності в електричній мережі 220В для споживачів зі струмом споживання не більше 30А з подальшим відображенням результатів вимірювання у вигляді графіків на WEB сторінці через комп'ютерну мережу на базі мікроконтролера ARDUINO UNO.

З розширенням використання технологій Internet of Things (IoT) система моніторингу параметрів електромережі на основі мікроконтролера Arduino може стати важливим елементом у глобальній інфраструктурі, що забезпечує доступ до енергетичних даних у реальному часі з будь-якої точки світу. У сучасному світі, де питання енергозбереження стає дедалі актуальнішим, розробка та впровадження таких систем є важливим кроком до сталого розвитку, про що буде описано далі.

Висновки до розділу 1

Проведено дослідження та показано, що впровадження автоматизованих систем контролю та обліку енергоресурсів у поєднанні з технологіями Smart Metering є необхідною умовою сучасної цифрової трансформації енергетики.

Важливим аспектом розвитку Smart Metering є створення надійної комунікаційної інфраструктури. Інтеграція Smart Metering з корпоративними інформаційними системами, такими як SCADA, ERP та EMS, розширює його функціональні можливості, перетворюючи традиційну систему обліку на інтелектуальну аналітичну платформу.

На основі проведеного аналізу, для подальшого опрацювання прийнято систему моніторингу параметрів електромережі для вимірювання напруги, струму та потужності в електричній мережі 220В для споживачів зі струмом споживання не більше 30А з подальшим відображенням результатів вимірювання у вигляді графіків на WEB сторінці через комп'ютерну мережу на базі мікроконтролера ARDUINO UNO.

Показано, що з розширенням використання технологій Internet of Things (IoT) система моніторингу параметрів електромережі на основі мікроконтролера Arduino може стати важливим елементом у глобальній інфраструктурі, що забезпечує доступ до енергетичних даних у реальному часі з будь-якої точки світу. У сучасному світі, де питання енергозбереження стає дедалі актуальнішим, розробка та впровадження таких систем є важливим кроком до сталого розвитку, про що буде описано далі.

					02.03 – КР. 2606 "С" 2025.10.30 007 ПЗ	Арк.
						23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 2

ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ АПАРАТНИХ ЗАСОБІВ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ

2.1. Мікроконтролер Arduino як центральний елемент системи

Для системи моніторингу параметрів електромережі, як керуючий елемент, обрано мікроконтролер ATmega2560, що виконаний на базі платформи Arduino, а саме моделі Arduino UNO.

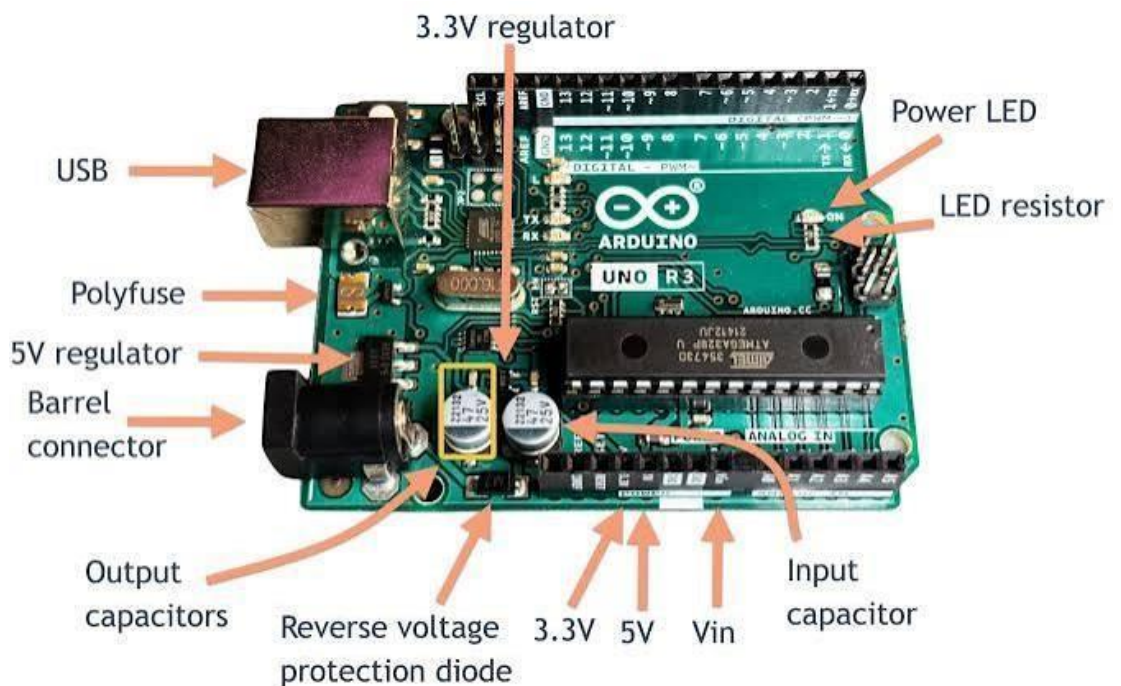


Рис. 2.1 - Arduino UNO

Даний контролер має 54 цифрових входів/виходів (14 з яких можуть використовуватися як виходи широтно-імпульсної модуляції), 16 аналогових входів, 4 послідовні порти протоколу UART, кварцовий генератор 16 МГц, USB (тип b) конектор, роз'єм живлення, роз'єм ICSP і кнопка перезавантаження. Для роботи необхідно підключити платформу до комп'ютера за допомогою кабелю USB(b) або подати живлення за допомогою адаптера; (AC/DC), або акумуляторною батареєю. Arduino UNO сумісна з

усіма платами розширення, розробленими для платформ Uno або Duemilanove.

До контролера входить мікросхема ATmega2560, для якої робоча напруга рівна 5В (рекомендована) та 7-12В вхідна напруга (гранична). Електричні схеми апаратної платформи показано в додатках. Постійний струм для виведення контакту 3.3 рівний 50 mA. Флеш-пам'ять контролера рівна 256 KB (з яких 8 KB використовуються для завантажувача), при цьому ОЗУ - 8 KB та енергонезалежна пам'ять 4 KB.

Arduino UNO може отримувати живлення як через підключення по USB (b), так і від зовнішнього джерела живлення, при цьому джерело живлення вибирається автоматично. Зовнішнє живлення (не USB) може подаватися через перетворювач напруги AC/DC (блок живлення) або акумуляторною батареєю. Перетворювач напруги підключається за допомогою роз'єму 2.1 мм з позитивним полюсом на центральному контакті. Дроти від батареї підключаються до пінів (контактів) Gnd і Vin, роз'єму живлення (POWER). Платформа може працювати при зовнішньому живленні від 6 до 20 В. При напрузі живлення нижче 7, пін 5V може видавати менше 5 В, при цьому платформа може працювати нестабільно. При використанні напруги не вище 12 В регулятор напруги може перегрітися і пошкодити плату. Рекомендований діапазон від 7 до 12 В. Плата Mega2560, на відміну від попередніх версій плат, не використовує FTDI USB мікроконтролер. Для обміну даними з USB використовується мікроконтролер, запрограмований як конвертер USB-to-serial (універсальний приймач-передавач даних).

Блок-схема роботи КІС керування температурою повітря наведена в додатках. В блок-схемі передбачено вимірювання, порівняння вимірюного значення з заданим значенням і, відповідно, до цього формування керуючої дії. Процес керування діятиме до тих пір поки час керування не буде рівний заданому часу.

					02.03 – КР. 2606 "С" 2025.10.30 007 ПЗ	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.2. Датчики та вимірювальні модулі для контролю напруги, струму і потужності

У цьому підрозділі розглянуто вибір вимірювальних модулів: датчиків струму ACS712 30A GY-712, Ethernet модуль ENC28J60, модуль живлення TSP-05 220В - 5В 3Вт, трансформатор ТМ40/12.

Датчик струму ACS712 30A GY-712. Для вимірювання струму в електричній мережі використовується датчик ACS712 30A GY-712, який побудований на однойменній мікросхемі ACS712ELCTR-30A-T фірми Allegro. Ця мікросхема забезпечує точне вимірювання постійного та змінного електричного струму за рахунок використання ефекту Холла і забезпечує гальванічну розв'язку високовольтної та вимірювальної частини кола. Нижче на рис. 2.2 показано важливу схему включення мікросхеми.

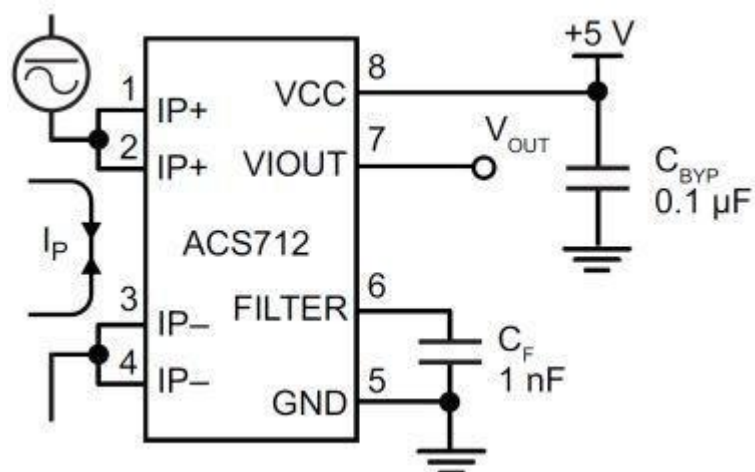


Рис. 2.2 - Схема включення мікросхеми

Вимірюваний струм, I_P , протікає від контактів 1, 2 до контактів 3, 4. На виході мікросхеми (контакт 7) при $I_P = 0$, напруга дорівнює половині напруги живлення мікросхеми

$$V_{out} = 5/2 = 2.5 \text{ В} \quad (2.1)$$

При $I_p = +30$ А (струм протікає у напрямку від контактів 1, 2 до контактів 3,4) на виході мікросхеми (контакт 7) буде напруга

$$V_{out} = 2.5 + 30 \cdot 0.066 = 4.48 \text{ В.} \quad (2.2)$$

При $I_p = -30$ А (струм протікає у напрямку від контактів 3, 4 до контактів 1,4) на виході мікросхеми (контакт 7) буде напруга

$$V_{out} = 2.5 - 30 \cdot 0.066 = 0.52 \text{ В.} \quad (2.3)$$

Трансформатор ТМ40/12. Для вимірювання напруги в електричній мережі використовується звичайний трансформатор 220/12В, який підключений через чотири резистори та конденсатор до аналогового входу А1 мікроконтролера ARDUINO UNO. Ці чотири резистори та конденсатор забезпечують зменшення амплітуди коливань напруги зі зміщенням до напруги, рівному половині напруги живлення на вході мікроконтролера.

У результаті на вході А1 при напрузі в електричній мережі рівній нулю буде напруга 2.5В. У точці максимуму амплітуди напруги 220В, напруга на А1 складатиме приблизно 3.6В. У точці мінімуму амплітуди напруги, напруга на А1 буде приблизно 1.44В. Цю напругу можна підігнати до потрібного діапазону шляхом підбору пари резисторів 100кОм та 5.6кОм.

У результаті на вході А1 має бути синусоїда, як показано на графіку внизу.

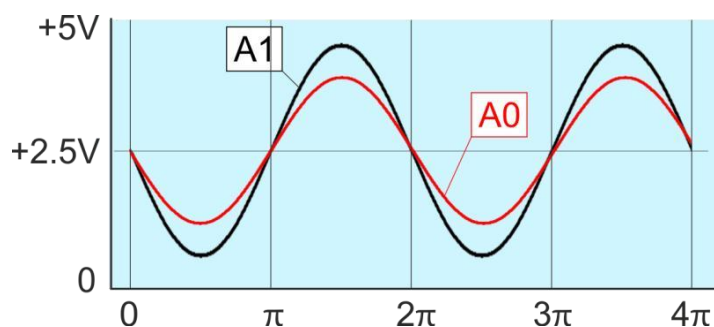


Рис. 2.3 – Графік амплітуд напруги

Таким чином, при протіканні змінного струму в контрольованій електричній мережі, на аналоговому вході А0 мікроконтролера ARDUINO UNO буде напруга, яка змінюється за синусоїдою з частотою, що дорівнює частоті в електричній мережі. Амплітуда напруги на вході А0 буде пропорційна електричного струму (лінія А0 на графіку зверху).

2.3. Засоби індикації, збереження та передавання даних

Невід’ємною і можливо найважливішою складовою системи моніторингу є спеціалізоване програмне забезпечення. Окрім виконання класичних функцій, які потрібні для забезпечення узгодженої роботи усіх складових, спеціалізоване програмне забезпечення повинно формувати специфічний інтерфейс, який і створюватиме інтерактивну взаємодію користувача із програмою. Програма «Вимірювальний комплекс» для виробництва побудована на основі веб-технологій – веб-серверу.

Веб-сервер представляє собою клієнт-серверний додаток, в якому клієнтом виступає браузер, а сервером – веб-сервер. Робота веб-серверу розподіляється між сервером і клієнтом, дані зберігаються, переважно, на сервері, а обмін інформацією між клієнтом і сервером відбувається через мережу. Веб-сервер складається з трьох основних складових: клієнтської і серверної частин та бази даних. Клієнтська частина веб-браузер представляє собою графічний інтерфейс користувача, який відображається в браузері і дозволяє користувачеві взаємодіяти з серверною частиною веб-серверу. Серверна частина веб-сервер – це програма на сервері, що відповідає за обробку запитів від браузерів користувачів. Сервер опрацьовує відповідні запити, викликаючи скрипти, що відповідають за формування веб-сторінки, і результати відсилає клієнтам через мережу. База даних використовується для зберігання даних. Браузер через комп’ютерну мережу відправляє HTTP-запити до веб-сервера. Веб-сервер в свою чергу викликає скрипти, які, в разі

потреби, звертаються до бази даних та повертають клієнтам відповідні оновлені веб-сторінки.

Проектування веб-серверу передбачає використання «тонкого клієнту». Тобто на боці користувача не може бути використано спеціалізоване програмне забезпечення. Взаємодія із користувачем на фізичному рівні може відбуватися тільки за допомогою загального протоколу HTTP. Отже рівень представлення відповідає, в першу чергу, саме за організацію взаємодії із «тонким клієнтом» (тобто браузером).

Для послідувочої розробки програми на основі веб-додатку для організації виробництва в Україні були використані наступні інструменти: мова програмування C, компілятор, PHP.

Для відображення вимірної інформації користувачу необхідно ввести у веб-браузері необхідний ір-адресу. Після чого у веб-браузері буде відображено виміряні параметри з давачів інформації.

Іншим варіантом відображення інформації – є використання OLED дисплей 0.96" 128×64 для Arduino esp32 stm32 (рис. 2.4).



Рис. 2.4 – Зовнішній вигляд OLED дисплею 0.96" 128×64 для Arduino

Компактний OLED дисплей діагоналлю 0.96" з роздільною здатністю 128×64 пікселі - ідеальне рішення для створення міні-інтерфейсів, графіків, датчиків та годинників. Завдяки технології OLED він забезпечує високу контрастність, глибокий чорний колір та широкий кут огляду понад 160°.

Модуль легко підключається до Arduino, ESP32, STM32 та інших мікроконтролерів через інтерфейс I2C або SPI. Працює від 3–5 В, споживає мінімум енергії (~0.08 Вт), що робить його оптимальним для портативних пристроїв.

Висновки до розділу 2

Обґрунтовано та здійснено вибір конкретної апаратної конфігурації: Arduino як контролера, датчиків напруги й струму як первинних перетворювачів, дисплея/модуля зв'язку як засобів виведення інформації. Так, для вимірювання струму в електричній мережі використовується датчик ACS712 30A GY-712, який побудований на однойменній мікросхемі ACS712ELCTR-30A-T фірми Allegro.

Для вимірювання напруги в електричній мережі використовується звичайний трансформатор 220/12В, який підключений через чотири резистори та конденсатор до аналогового входу A1 мікроконтролера ARDUINO UNO.

Для відображення інформації пропонується використати компактний OLED дисплей діагоналлю 0.96" з роздільною здатністю 128×64 пікселі - ідеальне рішення для створення міні-інтерфейсів, графіків, датчиків та годинників. Завдяки технології OLED він забезпечує високу контрастність, глибокий чорний колір та широкий кут огляду понад 160°.

					02.03 – КР. 2606 "С" 2025.10.30 007 ПЗ	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБКА АПАРАТНО-ПРОГРАМНОЇ ЧАСТИНИ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ

3.1. Структурна та принципова схема системи

У підрозділі подано структурну схему системи (рис. 3.1): електромережа - датчики напруги й струму - узгоджувальні кола - Arduino - блок індикації/передавання даних - джерело живлення.

Нижче (рис. 3.2) наведена принципова електрична схема стосовно мережі змінного струму 220В до 30А, 6 кВт повного навантаження. Цей набір обладнання також дозволяє моніторити коло постійного струму до 30А з доопрацюванням схеми вимірювання напруги. У колах постійного струму трансформатор не використовуємо, достатньо підібрати параметри дільника напруги та пам'ятати, що при цьому не буде гальванічної розв'язки між силовим та вимірювальним колом, що може становити небезпеку.

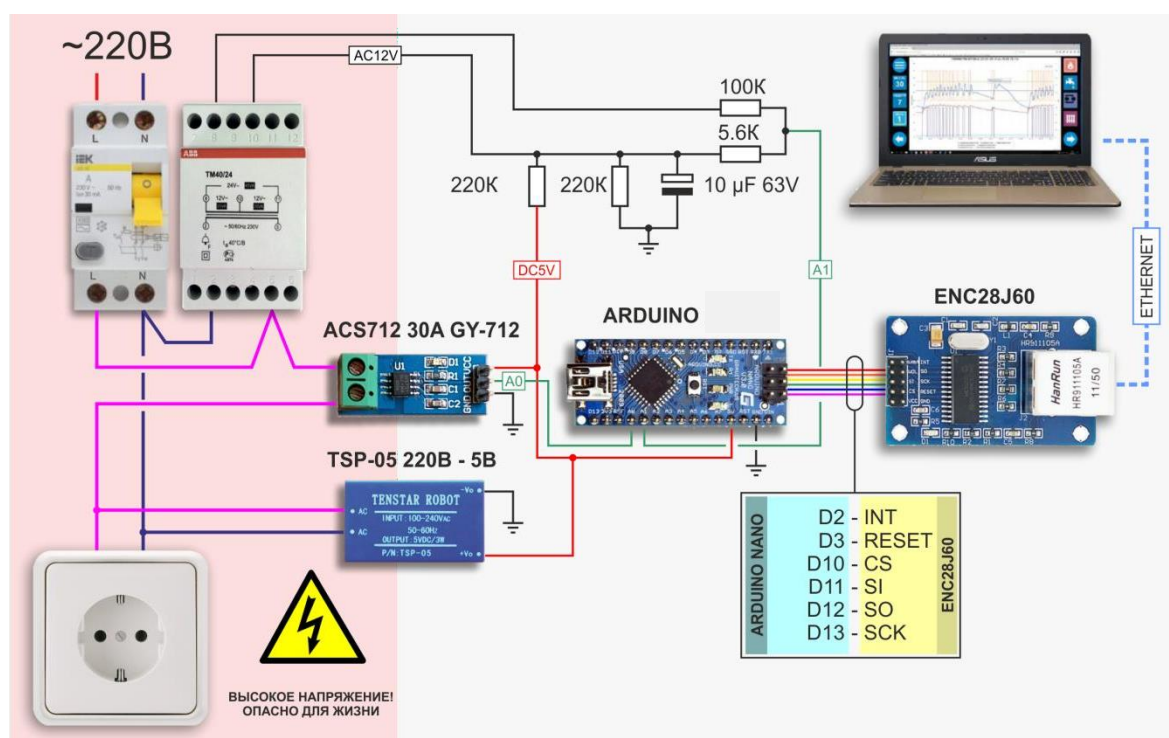


Рис. 3.1 - Структурна схема системи моніторингу

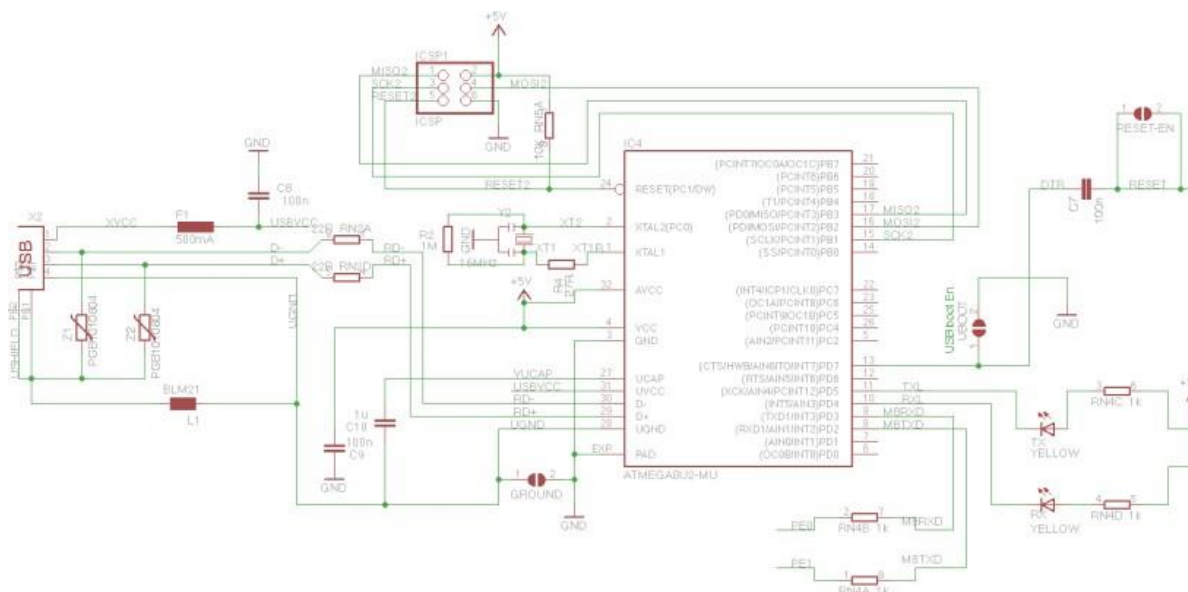


Рис. 3.2 – Принципова електрична схема системи моніторингу

Для більш потужних електричних споживачів, в кола яких струми перевищують 30А ми пропонуємо універсальний струмовий WEB-монітор TSD i105 на контролері STM32 та мікрокомп'ютері Orange PI Zero з струмовими датчиками ACS722. Цей пристрій підключається до електричної мережі через стандартні трансформатори струму та забезпечує паралельний моніторинг 7 струмових ліній та напруг за трьома фазами в електричній мережі будь-якої потужності.

Вимірювання миттєвих значень струму та напруги забезпечує контролер STM32. Це дає високу частоту опитування (16кГц) з роздільною здатністю 12 біт. Мікрокомп'ютер Orange PI Zero забезпечує WEB інтерфейс та архівування даних з подальшим відображенням їх через WEB браузер.

3.2. Алгоритм роботи та програмне забезпечення Arduino

Алгоритм обчислення наступний. Через аналогові входи A0 і A1 постійно зчитуємо поточні значення напруги та струму, підносимо їх у квадрат і підсумовуємо. З періодичністю в одну секунду обчислюємо середньоквадратичне значення для напруги та струму. Добуток

середньоквадратичного значення напруги і струму дає величину повної потужності. Нижче наведено лістинг програми.

Контролер - Arduino UNO

Ethernet модуль - ENC28J60

Датчик струму - ACS712 30A GY-712

Трансформатор для вимірювання напруги - 220/12В

З'єднування Arduino UNO <-> ENC28J60

D2 - INT

D3 - RESET

D10 - CS

D11 - SI (ST)

D12 - SO

D13 - SCK

З'єднайте Arduino UNO и ENC28J60 по цій схемі.

Підключить Ethernet модуль в локальну комп'ютерну мережу.

Завантажте програму в контролер та в пошуковому полі браузера.

Після цього можна підключити датчик струму - ACS712 30A GY-712 і трансформатор і підібрати коефіцієнти kI, kV для отримання правильних даних.

```
#include <UIPEthernet.h>

#define DEMO true //втсновить false для реального вимірювання

const char page1[] PROGMEM =

"<!DOCTYPE html>\n"

"<html>\n"

"<meta charset='UTF-8'>\n"

"<title>WEB MONITOR</title>\n"

"<link href='http://liccontrol.com/web/gauge.ico' rel='icon' type='image/x-
icon'/>\n"

"<link          rel='stylesheet'          href='http://liccontrol.com/web/style.css'
type='text/css'>\n"
```

					02.03 – КР. 2606 "С" 2025.10.30 007 ПЗ	Арк.
						33
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

```

"<script src='http://code.jquery.com/jquery-3.1.1.min.js'></script>\n"
"<script src='http://code.highcharts.com/highcharts.js'></script>\n"
"</head>\n";
const char page2[] PROGMEM =
"<body>\n"
"<table id='MainTab' border='0' cellpadding='0' cellspacing='0'>\n"
"<tbody><tr><td><div id='trend'></div></td></tr></tbody>\n"
"</table>\n"
"<script src='http://liccontrol.com/web/trend.js'></script>\n"
"</body></html>\n";
const char page3[] PROGMEM =
"HTTP/1.1 200 OK\n"
"Content-Type: text/html\n"
"Pragma: no-cache\n"
"Connection: close\r\n\r\n";
int IPin = A1;           //Аналоговий вхід для вимірювання струму
int VPin = A0;           //Аналоговий вхід для вимірювання напруги
double I=0.0, I1 = 0.0, I2 = 0.0;   //Поточне та сумарне значення струму
double V=0.0, V1 = 0.0, V2 = 0.0;   //Поточне та сумарне значення
напруги
float S = 0.0;           //Повна потужність
float P = 0.0;           //Активна потужність
float Q = 0.0;           //Реактивна потужність
float P1 = 0.0;          //Миттєва потужність
float kI = 0.07398;       //Коефіцієнт вимірювання струму, слід
підібрати експериментально
float kV = 0.97656;       //Коефіцієнт вимірювання напруги, слід
підібрати експериментально
//Унікальна mac-адреса Ethernet модуля
byte mac[] = {0xDE, 0xAD, 0xBE, 0xEF, 0xFE, 0xED};

```

//Встановіть зручну для вас адресу яка зараз вільна в вашій локальній мережі;

EthernetServer server(80);

String result="";

unsigned long time1 = 0, count=0, count1=0;

unsigned long t1 = 0;

boolean Restart = true;

//Перезапуск мікросхеми ENC28J60

void resetENC28J60() {

digitalWrite(3, LOW);

delay(200);

digitalWrite(3, HIGH);

delay(100); }

//Процедура вимірювання струму та напруги

void MesureData() {

float angle = 2*M_PI*count/100.0;

if (!DEMO) {

I1 = kI*(analogRead(IPin) - 512); //миттєве значення струму,А }

else {

I1 = sqrt(2.0)*100.0*sin(angle); //миттєве значення струму,А (в DEMO режимі) }

if (!DEMO) {

V1 = kV*(analogRead(VPin) - 512); //миттєве значення напруги,В }

else {

float d = 30.0; //зміщення синусоїди струму в градусах

angle += 2.0*M_PI * d/360.0;

V1 = sqrt(2.0)*220.0*sin(angle); //миттєве значення напруги,В (в DEMO режимі) }

I2 += pow(I1,2);

V2 += pow(V1,2);

					02.03 – КР. 2606 "С" 2025.10.30 007 ПЗ	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

```

P1 += I1 * V1;
count++;
if (count > 1000) {
    I = sqrt(I2/count); //середньоквадратична величина
струму, A
    V = sqrt(V2/count); //середньоквадратична
величина напруги,В
    S = I * V; //повна потужність, ВА
    P = P1/count; //активна потужність, Вт
    float _Q = pow(S,2)-pow(P,2);
    if (_Q>0.0) Q = sqrt(_Q); //реактивна потужність, вар
    else Q = 0.0;
    P1 = 0.0;
    V2 = 0.0;
    I2 = 0.0;
    count = 1;
    t1 = millis(); }
if (DEMO) {
    //Виводимо результати на графік. Значення потужності, для зручності
відображення виводиться поділенням на 100.
    if ((count % 5)==0) Serial.println("U:"+String(V1)+"", I:"+String(I1)+"",
Urms:"+String(V)+"", Irms:"+String(I)+"", P/100:"+String(P/100.0)+"",
S/100:"+String(S/100.0)); }}
//Процедура відправки в мережу даних, що зберігаються в PROGMEM
void printProgStr (EthernetClient client, const char * str){
char c;
if (!str) return;
while ((c = pgm_read_byte(str++))) client.print (c); }
//Формуємо JSON рядок даних для відправки його через мережу в
браузер

```

					02.03 – КР. 2606 "С" 2025.10.30 007 ПЗ	Арк.
						36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

```

String DataToBrowser() {
    int t = int((millis()-time1)/1000);
    String s = String(t)+", "+String(V,1)+", "+
    String(I,1)+", "+String(S/1000.0,2)+", "+
    String(P/1000.0,2);
    return s; }

//Початкові установки та ініціалізація
void setup() {
    Serial.begin(9600);
    resetENC28J60();
    Ethernet.begin(mac, ip);
    server.begin();
    Serial.print("START SERVER AT:");
    Serial.println(Ethernet.localIP()); }

//ГОЛОВНИЙ ЦИКЛ ВИКОНАННЯ ПРОГРАМИ
void loop() {
    MeasureData();
    EthernetClient client = server.available();
    if (client) {
        result="";
        while (client.connected()) {
            if (client.available()) {
                char c = client.read();
                result+=c;
                if (c == '\n') {
                    int y=result.indexOf("dat");
                    if ((y>0) and (!Restart)) {
                        printProgStr(client, page3);
                        String s = DataToBrowser();
                        client.println(s);
                    }
                }
            }
        }
    }
}

```

```

    } else {
        printProgStr(client, page1);
        printProgStr(client, page2);
        Restart = false;
        time1 = millis(); }
    break; } } }
    delay(1);
    client.stop(); }
    if (DEMO) delay(10); }

```

Таким чином, наведений фрагмент програмного коду дозволяє здійснювати збір, обробку передавання та візуалізацію даних електричної мережі, зокрема струму навантаження, напруги та споживаної потужності.

3.3. Оцінка інерційності та перевірка точності вимірювань

До датчиків автоматизованих систем, як правило, представляють наступні умови: лінійність і однозначність статичної характеристики (допустима нелінійність не повинна перевищувати 0,1-0,3 %); високу чутливість і розрішачу здатність, стабільність характеристик швидкодія, стійкість до хімічного впливу керованого та оточуючого середовища (первинні перетворювачі розміщені в захисній оболонці), високу перевантажувальну здатність; бути взаємно замінними однотипних пристроями; мінімальну обернену дію на керований параметр; легкість монтажу обладнання.

Як правило, датчик вибирають в два етапи. На першому по роду керованого параметра і умовами роботи визначають різновид датчика, на другому, коли вибирають всі елементи САУ, по каталогу знаходять його типорозмір. При цьому датчик рекомендується підбирати таким чином, щоб вимірювальна величина знаходилась в межах $\frac{1}{3}$ $\frac{2}{3}$ діапазону його виміру.

					02.03 – КР. 2606 "С" 2025.10.30 007 ПЗ	Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Інерційність датчика повинна бути у 10.....100 разів менш інерційності об'єкта регулювання. За керованою величиною підбираємо первинний перетворювач.

Первинний перетворювач вибирають згідно необхідної точності при вимірюванні та діапазону вимірювання.

Датчик може бути з'єднаний в коло вимірювання як в режимі паразитного живлення так і в режимі зовнішнього живлення (рис. 3.3).

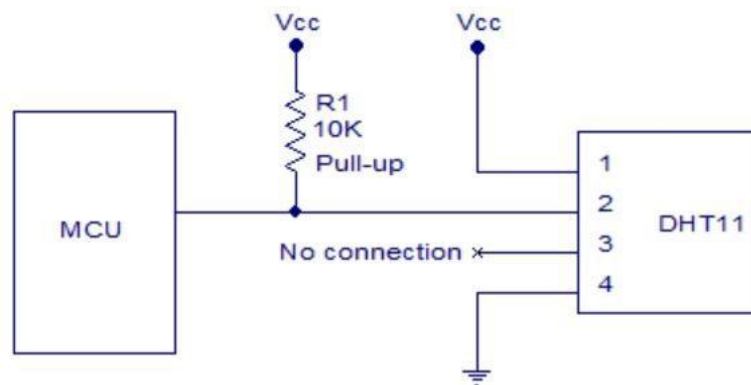


Рис. 3.3 – Схеми підключення датчика Визначимо

передаточну функцію датчика:

$$T_D \frac{dU_D}{dt} + U_D = k_D \theta_c$$

$$S \square \frac{d}{dt}$$

$$T_D S U_D + U_D = k_D \theta_c$$

$$U_D (T_D S + 1) = k_D \theta_c$$

$$W_D = \frac{U_D(S)}{\theta_c(S)} = \frac{k_D}{T_D S + 1}$$

Передаточна функція сприймаючого елемента (датчика):

$$W_D(s) = \frac{k_D}{T_D \cdot s + 1}, \quad (3.1)$$

					02.03 – КР. 2606 "С" 2025.10.30 007 ПЗ	Арк.
						39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

де $k_{CE} = 0,2$ (коефіцієнт передачі вимірюваного значення); $T_{CE} = 1$ с (інерційність вимірювання).

Отже, передаточна функція сприймаючого елемента має вигляд:

$$W_D(s) = \frac{0,5}{s+1} \quad (3.2)$$

АФЧХ сприймаючого елемента зображено на рис. 3.4.

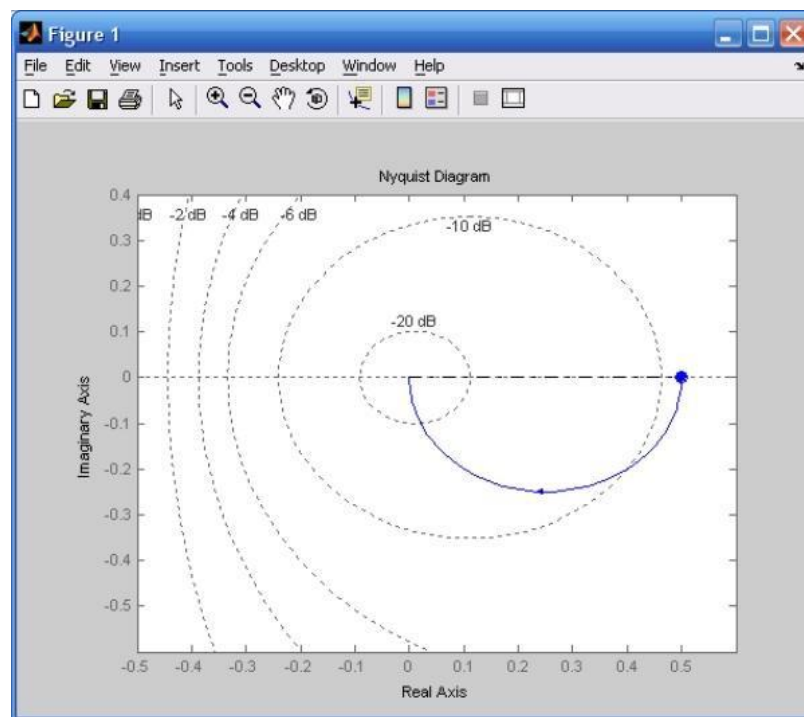


Рис. 3.4 – АФЧХ сприймаючого елемента

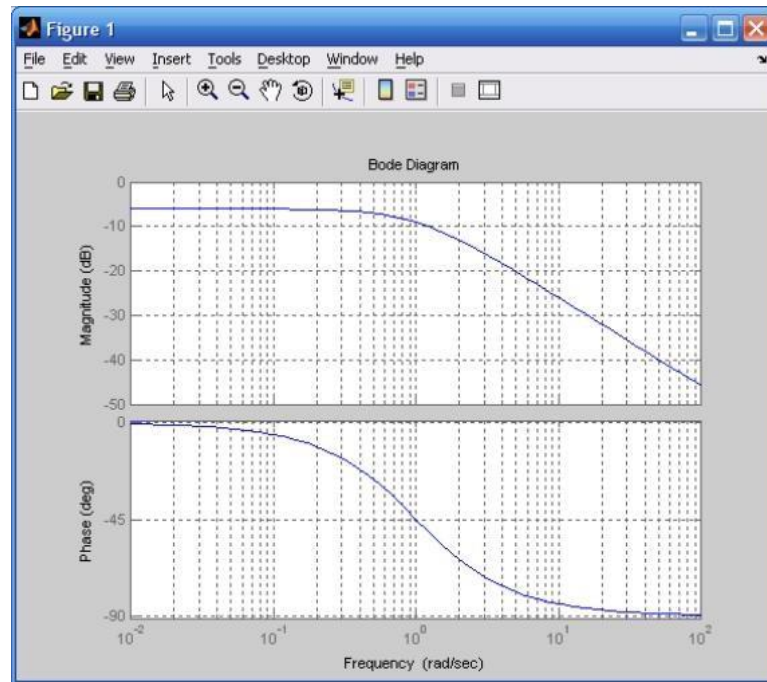


Рис. 3.5 – АЧХ і ФЧХ сприймаючого елемента

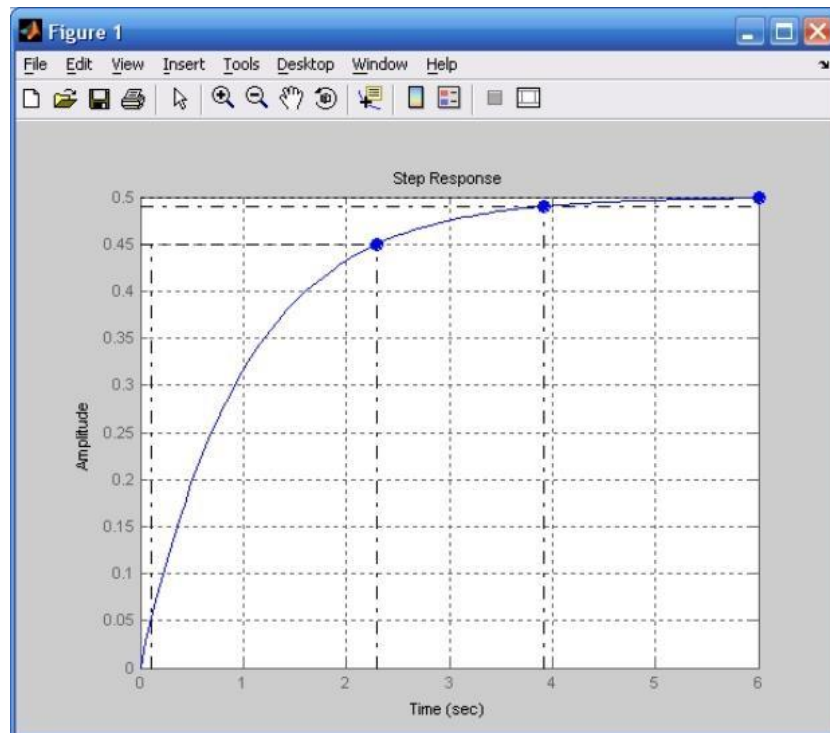


Рис. 3.6 – Перехідний процес датчика

$$\frac{T_d}{T_O} = \frac{30}{868} = 0.052 \leq 0.1 \quad (3.3)$$

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Отже, прийняті датчики можна вважати без інерційним, якщо по швидкодії він задовольняє вимоги об'єкта управління.

Висновки до розділу 3

Розроблено структуру системи, визначено принцип підключення датчиків, сформовано алгоритм роботи програми та описано методику оцінювання інерційності прийнятих датчиків для підвищення точності вимірювань.

Показано, що запропонована принципова електрична схема стосовно мережі змінного струму 220В до 30А, 6 кВт повного навантаження. Цей набір обладнання також дозволяє моніторити коло постійного струму до 30А з доопрацюванням схеми вимірювання напруги.

Наголошено, що у колах постійного струму трансформатор не використовуємо, достатньо підібрати параметри дільника напруги та пам'ятати, що при цьому не буде гальванічної розв'язки між силовим та вимірювальним колом, що може становити небезпеку.

Запропоновано для більш потужних електричних споживачів, в кола яких струми перевищують 30А, використовувати універсальний струмовий WEB-монітор TSD i105 на контролері STM32 та мікрокомп'ютері Orange PI Zero з струмовими датчиками ACS722. Цей пристрій підключається до електричної мережі через стандартні трансформатори струму та забезпечує паралельний моніторинг 7 струмових ліній та напруг за трьома фазами в електричній мережі будь-якої потужності.

					02.03 – КР. 2606 "С" 2025.10.30 007 ПЗ	Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 4

ТЕОРЕТИЧНЕ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ, БЕЗПЕКА ТА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМИ

4.1. Проведення експериментальних вимірювань параметрів електромережі

У підрозділі описано умови експерименту: схема підключення, типи навантажень, кількість вимірювань, інтервали збору даних, вимірювані параметри.

В якості прикладу, досліджуваним елементом системи моніторингу в частині енергоспоживання є електродвигун приводу вентилятора CN-150 55" потужністю 1,1 кВт.

Найбільш раціональним способом плавного регулювання швидкості обертання є частотний. Можливість зміни швидкості цим способом впливає із виразу для синхронної швидкості обертового магнітного поля статора

$$\omega_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{p}, \quad (4.1)$$

з якого видно, що швидкість ω_0 є прямо пропорційною частоті f напруги, що підводиться до обмоток статора.

Виведемо передатну функцію асинхронного електродвигуна при частотному керуванні. Позначимо через ω_{1V} швидкість обертання поля статора при частоті f_V .

Тоді відносна швидкість поля

$$v = \frac{f_V}{f_H} = \frac{\omega_{1V}}{\omega_0}, \quad (4.2)$$

					02.03 – КР. 2606 "С" 2025.10.30 007 ПЗ	Арк.
						43
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

де швидкість ω_0 пов'язана з номінальною частотою мережі виразом (4.1).

Введемо поняття фіктивного ковзання

$$s_{\Phi} = \left(\frac{\omega_{1V}}{\omega_0} \right) \cdot s = v \cdot s \quad (4.3)$$

Дійсна швидкість обертання при частоті f_V

$$\omega = \omega_{1V} \cdot (1 - s) \quad (4.4)$$

Підставляючи у (4.4) значення ω_{1V} із (4.2) з урахуванням (4.3), визначимо

$$\omega = \omega_0 \cdot (v - s_{\Phi}) \quad (4.5)$$

Для малих значень ковзання обертаючий момент двигуна пропорційний ковзанню

$$M = \left(\frac{M_H}{s_H} \right) \cdot s_{\Phi} \quad (4.6)$$

Підставляючи (4.5) та (4.6) у вихідне рівняння

$$M - M_c = J \cdot \frac{d\omega}{dt} \quad (4.7)$$

(вважаючи при цьому $M_c = 0$) $J \cdot s \cdot \omega = M$, отримаємо

					02.03 – КР. 2606 "С" 2025.10.30 007 ПЗ	Арк.
						44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$J \cdot s \cdot \omega_0 \cdot (v - s_{\Phi}) = \left(\frac{M_H}{s_H} \right) \cdot s_{\Phi} \quad (4.8)$$

Цей вираз можна представити як

$$\frac{J \cdot \omega_0 \cdot s_H}{M_H} \cdot s \cdot \frac{s_{\Phi}}{s_H} + \frac{s_{\Phi}}{s_H} = \frac{J \cdot \omega_0}{M_H} \cdot s \cdot v \quad (4.9)$$

Якщо за вхідну величину прийняти відносну швидкість поля v , а за вихідну – відносне ковзання $\sigma = \frac{s_{\Phi}}{s_H}$, то вираз (4.9) матиме вигляд

$$T_{M1} \cdot s \cdot \sigma + \sigma = T_{M2} \cdot s \cdot v, \quad (4.10)$$

де $T_{M1} = \frac{J \cdot \omega_0 \cdot s_H}{M_H}$ та $T_{M2} = \frac{J \cdot \omega_0}{M_H}$.

Тоді передатна функція асинхронного електродвигуна при частотному керуванні

$$W(s) = \frac{\sigma(s)}{v(s)} = \frac{T_{M2} \cdot s}{T_{M1} \cdot s + 1} \quad (4.11)$$

На практиці при частотному керуванні часто використовують іншу методику визначення передатної функції.

Передатна функція асинхронного електродвигуна у цьому випадку

$$W_{BM}(s) = \frac{k_{BM}}{T_{BM} \cdot s + 1}, \quad (4.12)$$

$$k_{EM} = \frac{\omega_H}{f}; \quad (4.13)$$

$$T_{EM} = \frac{J_{зв}}{\beta}, \quad (4.14)$$

де $J_{зв}$ - зведений момент інерції електродвигуна та робочої машини (в даному випадку – вентилятора); β - жорсткість механічної характеристики;

$$\beta = \frac{2 \cdot M_{кр}}{\omega_0 \cdot s_{кр}}, \quad (4.15)$$

де $M_{кр}$ - критичний момент електродвигуна; $s_{кр}$ - критичне ковзання електродвигуна.

Розрахуємо необхідні величини для визначення передатної функції за виразами (4.12) - (4.15). Вихідні дані – каталожні значення для електродвигуна.

$$M_H = 9550 \cdot \frac{P_H}{n_H} = 9550 \cdot \frac{0,37}{840} = 4,21 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (4.16)$$

$$M_{кр} = M_H \cdot \mu_{кр} = 4,21 \cdot 1,6 = 6,74 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (4.17)$$

$$S_H = \frac{n_0 - n_H}{n_0} = \frac{900 - 840}{900} = 0,07 \quad (4.18)$$

$$\mu_1 = \frac{\mu_{кр}}{\mu_{ПВСК}} = \frac{1,6}{1,4} = 1,14 \quad (4.19)$$

					02.03 – КР. 2606 "С" 2025.10.30 007 ПЗ	Арк.
						46
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$S_{KP} = \frac{S_H + \sqrt{S_H \cdot \frac{\mu_{KP} - 1}{\mu_1 - 1}}}{1 + \sqrt{S_H \cdot \frac{\mu_{KP} - 1}{\mu_1 - 1}}} = \frac{0,07 + \sqrt{0,07 \cdot \frac{1,6 - 1}{1,14 - 1}}}{1 + \sqrt{0,07 \cdot \frac{1,6 - 1}{1,14 - 1}}} = 0,4 \quad (4.20)$$

$$\omega_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_0}{60} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 900}{60} = 94,2 \text{ рад./с} \quad (4.21)$$

$$\omega_H = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_H}{60} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 840}{60} = 87,9 \text{ рад./с} \quad (4.22)$$

$$J_{IP} = J_{ДВ} + J_{PM} = 0,0015 + 0,0003 = 0,0018 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \quad (4.23)$$

Тоді

$$\beta = \frac{2 \cdot M_{KP}}{\omega_0 \cdot s_{KP}} = \frac{2 \cdot 6,74}{94,2 \cdot 0,4} = 0,36 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{рад./с}}$$

$$T_{BM} = \frac{J_{ЗВ}}{\beta} = \frac{0,0018}{0,36} = 0,005 \text{ с}, \quad k_{BM} = \frac{\omega_H}{f} = \frac{87,9}{50} = 1,76 \frac{\text{рад./с}}{\text{Гц}}$$

$$W_{BM}(s) = \frac{k_{BM}}{T_{BM} \cdot s + 1} = \frac{1,76}{0,005 \cdot s + 1}$$

У підсумку, маємо вихідні дані для оцінки точності вимірювань аналоговим методом.

4.2. Аналіз точності вимірювань системи

Виконано аналіз точності вимірювань, оцінено вплив дискретності АЦП Arduino на неточності калібрування.

Як відомо, мостовий метод вимірювань параметрів комплексного опору є найдосконалішим та найкраще вивченим, так як забезпечується найвища точність та широкі функціональні можливості, незважаючи на складність

					02.03 – КР. 2606 "С" 2025.10.30 007 ПЗ	Арк.
						47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

будови мостів, необхідність великої кількості зразкових засобів та пристроїв керування.

Розглянемо схеми вимірювальних мостів змінного струму.

На рисунку 4.1 наведена схема моста змінного струму для вимірювань ємності C_x і тангенса кута втрат $\operatorname{tg} \delta_x$ з малими втратами.

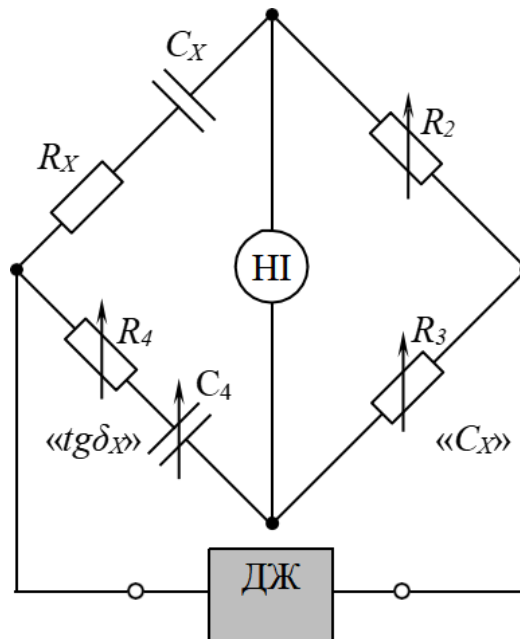


Рис. 4.1 – Схема моста змінного струму для вимірювань ємності C_x і тангенса кута втрат $\operatorname{tg} \delta_x$ з малими втратами

Умова рівноваги моста змінного струму при вимірюванні ємності C_x і тан-генса кута втрат $\operatorname{tg} \delta_x$ з малими втратами має вигляд

$$\left(R_x + \frac{1}{j\omega \cdot C_x} \right) \cdot R_3 = \left(R_4 + \frac{1}{j\omega \cdot C_4} \right) \cdot R_2, \quad (4.24)$$

звідки

$$R_x = \frac{R_4 \cdot R_2}{R_3}; \quad C_x = \frac{R_3 \cdot C_4}{R_2}; \quad \operatorname{tg} \delta_x = \omega \cdot C_x \cdot R_x = \omega \cdot R_4 \cdot C_4. \quad (4.25)$$

З наведених формул можна зробити, що регулювальними елементами плечей моста доцільно обирати резистори R_3 і R_4 , кожен з яких входить тільки в одне з рівнянь для визначення C_x та $\operatorname{tg} \delta$, причому резистор R_3

можна градувати у значеннях C_X , а резистор R_4 – у значеннях $\text{tg}\delta$.

На рисунку 4.2 наведена схема моста змінного струму для вимірювань ємності C_X і тангенса кута втрат $\text{tg}\delta_X$ з великими втратами.

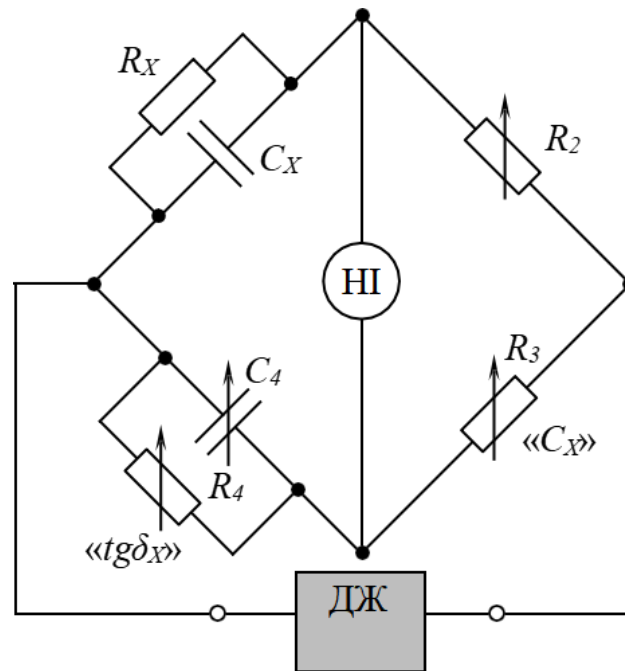


Рис. 4.2 - Схема моста змінного струму для вимірювань ємності C_X і тангенса кута втрат $\text{tg}\delta_X$ з великими втратами

При використанні такого моста змінного струму справедливі співвідношення

$$R_x = \frac{R_4 \cdot R_2}{R_3}; \quad C_x = \frac{R_3 \cdot C_4}{R_2}; \quad \text{tg}_x = \frac{1}{\omega \cdot C_x \cdot R_x} = \frac{1}{\omega \cdot C_4 \cdot R_4}, \quad (4.26)$$

де елементами регулювання є резистор R_3 при визначенні C_X та R_4 при визначенні $\text{tg}\delta$.

На рисунку 4.3 наведена схема моста змінного струму для вимірювань індуктивності L_X і добротності Q_X котушок індуктивності без феромагнітного осердя.

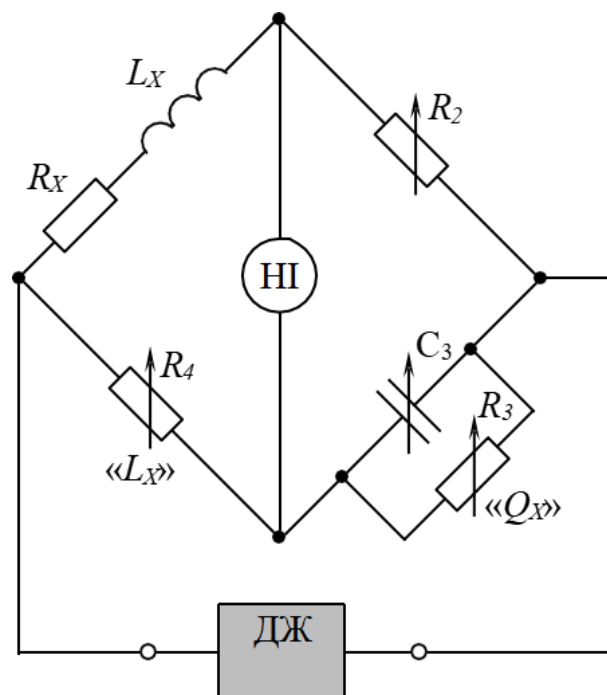


Рис. 4.3 – Схема моста змінного струму для вимірювань індуктивності L_x і добротності Q_x котушок індуктивності без феромагнітного осердя

Умова рівноваги моста змінного струму для вимірювань індуктивності L_x і добротності Q_x котушок індуктивності без феромагнітного осердя має вигляд

$$(R_x + j\omega \cdot L_x) \cdot \frac{\frac{R_3}{j\omega \cdot C_3}}{\left(R + \frac{1}{j\omega \cdot C_3}\right)} = R_2 \cdot R_4, \quad (4.27)$$

звідки

$$R_x = \frac{R_4 \cdot R_2}{R_3}; \quad L_x = C_3 \cdot R_2 \cdot R_4; \quad Q_x = \frac{1}{\tan \delta_x} = \frac{\omega \cdot L_x}{R_x} = \omega \cdot C_3 \cdot R_3. \quad (4.28)$$

Разом з тим, якщо в контрольованій електричній мережі струм протікає через активне навантаження синусоїди A0 і A1 будуть збігатися по фазі. Тобто, синусоїда струму і напруги переходитимуть через нуль одночасно, як показано на графіці вгорі. Якщо споживачем буде навантаження з індуктивною складовою (електродвигун), синусоїди A0 і A1 не збігатимуться по фазі. Синусоїда струму та напруги переходитимуть через нуль у різний час зі зміщенням φ , як показано на графіку внизу (рис. 4.4). При цьому синусоїда струму (A0) відставатиме.

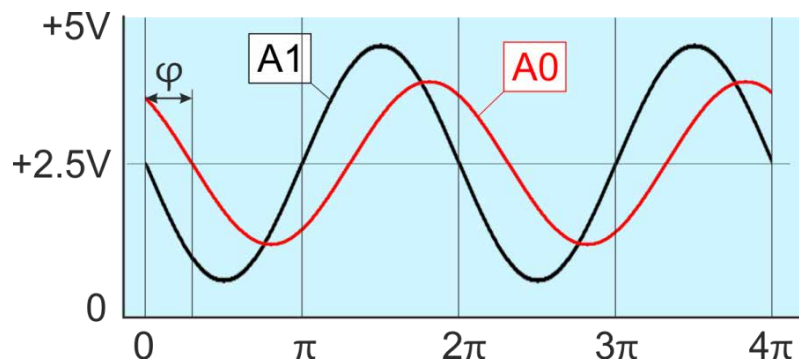


Рис. 4.4 – Графік синусоїди струму в колі з активним навантаженням

У випадку, якщо споживачем буде навантаження з ємнісною складовою, синусоїда A0 випереджатиме синусоїду A1, як показано на графіку внизу (рис. 4.5).

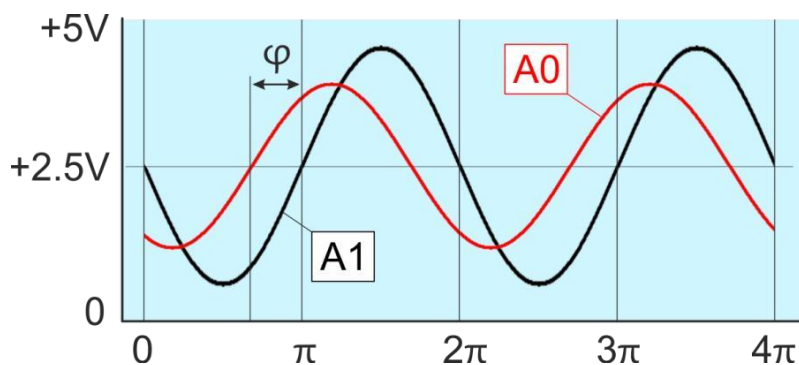


Рис. 4.5 – Графік синусоїди струму в колі з реактивним навантаженням

Крім того, у колах змінного синусоїдального струму, внаслідок постійної зміни значення напруги та струму, потужність не можна обчислити шляхом простого множення напруги на струм. Тому виділяють відразу три види електричної потужності: активну, реактивну та повну, аналіз яких у даній роботі не проводився.

Таким чином, найточнішими приладами для вимірювання параметрів конденсаторів та котушок індуктивності є мости змінного струму, які, крім основних параметрів C та L , призначені також для вимірювання тангенса кута втрат $\operatorname{tg} \delta$ конденсаторів та добротності Q котушок індуктивності. Похибки вимірювань мостами змінного струму можуть становити тисячні частки відсотка у широкому діапазоні значень вимірюваних величин.

Висновки до розділу 4

У підрозділі описано умови експерименту: схема підключення, типи навантажень, кількість вимірювань, інтервали збору даних, вимірювані параметри. В якості прикладу, досліджуваним елементом системи моніторингу в частині енергоспоживання є електродвигун приводу вентилятора CN-150 55" потужністю 1,1 кВт. Побудовано графіки синусоїд струму в колі з активним та реактивним навантаженням.

Проведено оцінку та показано, що найточнішими приладами для вимірювання параметрів конденсаторів та котушок індуктивності є мости змінного струму, які, крім основних параметрів C та L , призначені також для вимірювання тангенса кута втрат $\operatorname{tg} \delta$ конденсаторів та добротності Q котушок індуктивності. Похибки вимірювань мостами змінного струму можуть становити тисячні частки відсотка у широкому діапазоні значень вимірюваних величин.

					02.03 – КР. 2606 "С" 2025.10.30 007 ПЗ	Арк.
						52
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

У роботі проаналізовано методи моніторингу параметрів електромережі та показано, що впровадження автоматизованих систем контролю та обліку енергоресурсів у поєднанні з технологіями Smart Metering є необхідною умовою сучасної цифрової трансформації енергетики.

Показано, що з розширенням використання технологій Internet of Things (IoT) система моніторингу параметрів електромережі на основі мікроконтролера Arduino може стати важливим елементом у глобальній інфраструктурі, що забезпечує доступ до енергетичних даних у реальному часі з будь-якої точки світу.

Обґрунтовано та здійснено вибір конкретної апаратної конфігурації: Arduino як контролера, датчиків напруги й струму як первинних перетворювачів, дисплея/модуля зв'язку як засобів виведення інформації. Так, для вимірювання струму в електричній мережі використовується датчик ACS712 30A GY-712, для вимірювання напруги в електричній мережі використовується звичайний трансформатор 220/12В, який підключений через чотири резистори та конденсатор до аналогового входу A1 мікроконтролера ARDUINO UNO, а для відображення інформації пропонується використати компактний OLED дисплей діагоналлю 0.96" з роздільною здатністю 128×64 пікселі.

Розроблено структуру системи, визначено принцип підключення датчиків, сформовано алгоритм роботи програми та описано методику оцінювання інерційності прийнятих датчиків для підвищення точності вимірювань.

Показано, що запропонована принципова електрична схема стосовно мережі змінного струму 220В до 30А, 6 кВт повного навантаження. Цей набір обладнання також дозволяє моніторити коло постійного струму до 30А з доопрацюванням схеми вимірювання напруги.

					02.03 – КР. 2606 "С" 2025.10.30 007 ПЗ	Арк.
						53
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Запропоновано для більш потужних електричних споживачів, в кола яких струми перевищують 30А, використовувати універсальний струмовий WEB-монітор TSD i105 на контролері STM32 та мікрокомп'ютері Orange PI Zero з струмовими датчиками ACS722. Цей пристрій підключається до електричної мережі через стандартні трансформатори струму та забезпечує паралельний моніторинг 7 струмових ліній та напруг за трьома фазами в електричній мережі будь-якої потужності.

У підрозділі описано умови експерименту: схема підключення, типи навантажень, кількість вимірювань, інтервали збору даних, вимірювані параметри. В якості прикладу, досліджуваним елементом системи моніторингу в частині енергоспоживання є електродвигун приводу вентилятора CN-150 55" потужністю 1,1 кВт. Побудовано графіки синусоїд струму в колі з активним та реактивним навантаженням.

Проведено оцінку та показано, що найточнішими приладами для вимірювання параметрів конденсаторів та котушок індуктивності є мости змінного струму, які, крім основних параметрів C та L , призначені також для вимірювання тангенса кута втрат $\tan \delta$ конденсаторів та добротності Q котушок індуктивності. Похибки вимірювань мостами змінного струму можуть становити тисячні частки відсотка у широкому діапазоні значень вимірюваних величин.

					02.03 – КР. 2606 "С" 2025.10.30 007 ПЗ	Арк.
						54
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Arduino UNO R3 Documentation. Офіційна документація Arduino щодо плати UNO R3, її характеристик, входів/виходів, живлення та програмування.
2. Arduino Uno Rev3 Technical Specs. Технічний опис плати Arduino UNO Rev3 із характеристиками ATmega328P, кількістю входів/виходів, пам'яттю та тактовою частотою.
3. OpenEnergyMonitor. How to build an Arduino energy monitor. Практичний посібник зі створення Arduino-енергомонітора для вимірювання напруги, струму, потужності та коефіцієнта потужності.
4. OpenEnergyMonitor GitHub Docs. Arduino Energy Monitor — Current Only. Документація щодо вимірювання струму за допомогою трансформатора струму та Arduino.
5. IEC 61000-4-30:2025. Power quality measurement methods. Міжнародний стандарт щодо методів вимірювання параметрів якості електроенергії в мережах 50/60 Гц.
6. Eaton. Power Quality measurement methods IEC 61000-4-30 FAQ. Пояснення ролі IEC 61000-4-30 для достовірних і повторюваних вимірювань параметрів якості електроенергії.
7. Arduino Project Hub. Arduino IoT Based Energy Meter. Приклад IoT-енергомонітора з використанням Arduino, Modbus/RS485 та Arduino IoT Cloud.
8. Arduino Based Smart Energy Meter. Дослідження системи вимірювання напруги, струму, потужності, частоти, коефіцієнта потужності та енергії з використанням Arduino/NodeMCU.
9. IoT-Based Arduino Energy Monitoring and Predictor. Публікація про IoT-систему моніторингу та прогнозування енергоспоживання на основі мікроконтролера.

					02.03 – КР. 2606 "С" 2025.10.30 007 ПЗ	Арк.
						55
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

10. ДСТУ 8302:2015. Інформація та документація. Бібліографічне посилання. Стандарт для оформлення бібліографічних посилань і списку використаних джерел.

11. СУЧАСНІ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ТА ОБЛІКУ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ. Available from: https://www.researchgate.net/publication/398993054_SUCASNI_SISTEMI_MONITORINGU_TA_OBLIKU_ELEKTROENERGII [дата звернення 01.05.2026].

12. ISO 50001:2018. Energy management systems – Requirements with guidance for use. International Organization for Standardization, 2018. 36 p.

13. ДСТУ EN 62053-21:2017. Прилади для вимірювання електричної енергії (стаціонарні прилади) класів точності 1 і 2. [Чинний від 01.07.2019]. К.: ДП «УкрНДНЦ», 2017.

14. Мазур І. І., Остроух А. В., Кондратюк Д. М. Системи енергоменеджменту: сучасні підходи та інструменти // *Вісник НТУУ «КПІ»*. Серія: Енергетика. 2021. No 2. С. 22–29.

15. Бурмістров С. Ю. Автоматизовані системи комерційного обліку електроенергії (АСКОЕ): технології та досвід впровадження // *Електротехніка і електромеханіка*. 2020. No 4. С. 14–19.

16. Гаврилюк В. М., Черненко О. О. Енергетичний аудит та енергоефективність підприємств: монографія. Київ : НТУУ «КПІ», 2019. 164 с.

17. Козлов В. А. Технології SCADA в енергетиці: огляд можливостей // *Електротехніка і автоматизація*. 2022. No 1. С. 40–45.

18. Поліщук, В. Й. Аналіз комунікаційних технологій для Smart Metering в умовах міських агломерацій / В. Й. Поліщук, О. В. Мороз // *Технічна електродинаміка*. Тематичний випуск «Проблеми сучасної електроенергетики». 2019. Частина 3. С. 102–106.

19. Singh, S., & Singh, J. (2018). Artificial intelligence in smart grid: A review. *Journal of Cleaner Production*, 172, 481–494.

20. Arduino Wearable Projects by Tony Olsson. Packt Publishing, 2015. 200 p.

					02.03 – КР. 2606 "С" 2025.10.30 007 ПЗ	Арк.
						56
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

21. Beginning Sensor Networks with Arduino and Raspberry Pi by Charles Bell. Apress, 2016. 403 p.
22. Arduino Internals by Dale Wheat. Apress, 2011. 272 p.
23. Programming the Internet of Things with Node.js and Raspberry Pi by Rajesh Singh, Anita Gehlot, and Lovi Raj Gupta. CRC Press, 2018. 224 p.
24. Internet of Things Programming with JavaScript by Ruben Oliva Ramos. Packt Publishing, 2017. 300 p.
25. Arduino and Kinect Projects: Design, Build, Blow Their Minds by Enrique Ramos Melgar and Ciriaco Castro Diez. Apress, 2012. 372 p.
26. IoT Projects with Arduino Nano 33 BLE Sense by Agus Kurniawan. Packt Publishing, 2020. 220 p.
27. Learning Internet of Things by Peter Waher. Packt Publishing, 2015. 340 p.
28. Sensors for Mechatronics by Paul P.L. Regtien. Elsevier, 2018. 300 p.
29. Environmental Data Analysis and Modeling by John Wainwright and Mark Mulligan. Wiley-Blackwell, 2013. 496 p.
30. Practical IoT Hacking: The Definitive Guide to Attacking the Internet of Things by Fotios Chantzis et al. No Starch Press, 2020. 304 p.
31. The Internet of Things: Key Applications and Protocols by Olivier Hersent, David Boswarthick, and Omar Elloumi. Wiley, 2012. 360 p.
32. IoT Solutions in Microsoft's Azure IoT Suite: Data Acquisition and Analysis in the Real World by Scott Klein and Sean McGehee. Apress, 2017. 250 p.