



Міністерство освіти і науки України
Сумський державний університет
Факультет електроніки та інформаційних технологій

5926 МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до лабораторних робіт із дисципліни
«Контроль та керування якістю електричної енергії»
для здобувачів спеціальності
«141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
всіх форм здобуття вищої освіти

У двох частинах

Частина 1

Суми
Сумський державний університет
2024

Методичні вказівки до лабораторних робіт із дисципліни «Контроль та керування якістю електричної енергії» Частина I / укладач Д. М. Макуха. – Суми : Сумський державний університет, 2024. – 40 с.

Кафедра електроенергетики факультету ЕЛІТ

ЗМІСТ

С.

Вступ	4
Лабораторна робота 1 Дослідження впливу типу споживача на показники якості електроенергії».....	5
Лабораторна робота 2 Дослідження нелінійних спотворень в електричних мережах.....	11
Лабораторна робота 3 Дослідження несиметричних режимів роботи електричних мереж і методів симетрування.....	17
Лабораторна робота 4 Розрахунок відхилення напруги за допомогою ймовірно-статистичних методів.....	22
Практична робота 5 Розклад періодичної функції в ряд Фур'є.....	24
Список використаних джерел	32

Вступ

Якість електричної енергії – це важлива характеристика електричної мережі, що складається з ряду параметрів, затверджених Держстандартом і потребує постійного контролю та покращення, а також впливає на добробут повсякденного життя.

У наших методичних вказівках наведені тексти лабораторних і практичних робіт із дисципліни «Контроль та керування якістю електричної енергії» для здобувачів спеціальності «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», що навчаються за освітньо-професійною програмою: «Електротехнічні системи електроспоживання». Мета викладання дисципліни полягає у формуванні в студентів умінь і навичок оцінки якості електричної енергії, її впливу на роботу електричних приладів та впливу електричного устаткування на якість електроенергії, а також тут розглянуто способи її покращення.

Дисципліна є логічним продовженням ряду дисциплін спеціальності, таких як «Електричні системи та мережі», «Теоретичні основи електротехніки» тощо та передбачає виконання лабораторних та практичних робіт, самостійне опрацювання матеріалу. Лабораторні роботи розроблені з урахуванням викликів сьогодення так, що студент має можливість виконувати роботи, маючи відповідне апаратне та програмне забезпечення. Кожна лабораторна робота має короткі теоретичні відомості та чіткий порядок виконання роботи, у кінці наведені контрольні запитання для самоперевірки та закріплення пройденого матеріалу.

Дисципліна дозволяє розширити вже відомі теоретичні знання та закріпити їх на практиці, систематизувати матеріал, підвищити загальний професійний рівень.

Лабораторна робота 1

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТИПУ СПОЖИВАЧА НА ПОКАЗНИКИ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

Мета роботи – навчитися визначати *тип навантаження* за формою синусоїди струму та напруги.

Елементи теорії

Якість електричної енергії – це набір параметрів електричної енергії, значення яких повинні відповідати встановленим вимогам державного стандарту [1] та забезпечувати безпечну та надійну роботу електричного обладнання.

До показників якості електричної енергії відповідно до ДСТУ EN 50160:2014 відносять: відхилення частоти напруги електропостачання (Δf), зміну напруги (δU_y), швидку зміну напруги (одиничну швидку зміну напруги, дозу флікера (мерехтіння)), небаланс напруг електропостачання, напругу гармонік, напругу інтергармонік, напругу сигналів у мережах електропостачання, переривання напруги, провали напруги, перенапруги, перенапруги перехідного процесу [1]. Низька якість електричної енергії може призвести до зниження ефективності, пошкодженню та виходу з ладу обладнання, а також до необхідності додаткових затрат на його ремонт.

Стандартна номінальна напруга відповідно до ДСТУ EN 50160:2014 для мереж низької напруги (середньоквадратичне номінальне значення напруги $U_{ном} \leq 1$ кВ) загального призначення дорівнює $U_{ном} = 230$ В між фазним і нульовим проводом або між фазними проводами (в Україні тимчасово має значення $U_{ном} = 220$ В [1]).

Деякі показники якості електроенергії

1. Відхилення частоти напруги електропостачання (Δf). Відповідно до ДСТУ [1] номінальна частота становить $f_{ном} = 50$ Гц. Середнє відхилення основної складової напруги, яку

виміряно на проміжку 10 с, повинне становити $\pm 1 \%$, (тобто $\pm 0,5$ Гц) упродовж 99,5 % часу на рік та $+4 \%$ -6% упродовж 100 % часу на рік. [1]. Відхилення частоти розраховують за формулою

$$\Delta f = f_y - f_{\text{НОМ}}, \quad (1.1)$$

де f_y – усереднене значення частоти, виміряної впродовж 10 с,

$$f_y = \frac{\sum_{i=1}^N f_i}{N}, \quad (1.2)$$

де N – кількість вимірювань (не менше 15).

f_i – дійсне значення частоти для i -го спостереження.

2. Зміна напруги (δU_y). Величина зміни напруги не повинна перевищувати 10 % від номінальної напруги. Розраховують за такою формулою:

$$\delta U_y = \frac{U_y - U_{\text{НОМ}}}{U_{\text{НОМ}}} \cdot 100, \% \quad (1.3)$$

де $U_{\text{НОМ}}$ – номінальне значення (лінійне, фазне) напруги;

δU_y – усереднене середньоквадратичне значення напруги, виміряне впродовж 10 хвилин

$$U_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N U_i^2}{N}}, \quad (1.4)$$

де U_i – діюче значення напруги для i -го спостереження.

Чинне (середньоквадратичне) значення напруги для синусоїдального сигналу розраховують за такою формулою:

$$U = \frac{U_{max}}{\sqrt{2}} \quad (1.5)$$

Упродовж 7 днів 95 % середньоквадратичних (чинних) значень напруги (U_y) повинні бути в межах 10 %. Та впродовж усього періоду вимірювання 100 % середньоквадратичних значень напруги (U_y) повинні бути в межах +10 % – –15% [1].

3. Провал напруги (voltage dip). Тимчасове зменшення середньоквадратичної напруги нижче за визначений поріг. Поріг початку провалу напруги дорівнює 90 % від $U_{ном}$ [1]. На рисунку 1.1 наведено часову діаграму напруги.

Провал напруги характеризують глибиною провалу (δU_n) та його тривалістю (Δt_n). Глибину провалу напруги визначають за такою формулою [3]:

$$\delta U_{\Pi} = \frac{U_{ном} - U_{min}}{U_{ном}} \cdot 100 \% \quad (1.6)$$

де U_{min} – мінімальне значення напруги впродовж періоду провалу напруги; $U_{ном} - U_{min} = \Delta U$

Тривалість провалу напруги [3]:

$$\Delta t = t_{кін} - t_{поч} \quad (1.7)$$

де $t_{поч}$, $t_{кін}$ – початок і кінець провалу напруги.

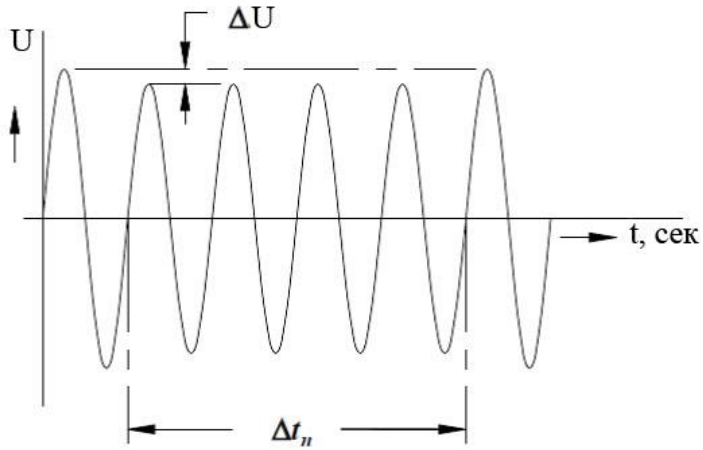


Рисунок 1.1 – Провал напруги [2]

Усіх споживачів електричної енергії умовно можна поділити на три групи: споживачі активної, реактивної та повної потужності. Активні споживачі – це такі споживачі, які споживають лише активну потужність, Активна потужність реально використовується для виконання роботи, на активних (резистивних) елементах виділяється (розсіюється) енергія у вигляді тепла. Прикладами таких споживачів можуть бути нагрівальні прилади, лампи розжарювання тощо. На рисунку 1.2 наведені часові залежності змінного струму та напруги (а) та векторна діаграма (б) для даного типу споживачів. Як видно з рисунка 1.2, струм та напруга для зазначеного типу навантаження співпадають по фазі (*зсув фаз дорівнює 0, тобто $\cos \varphi = 1$*)

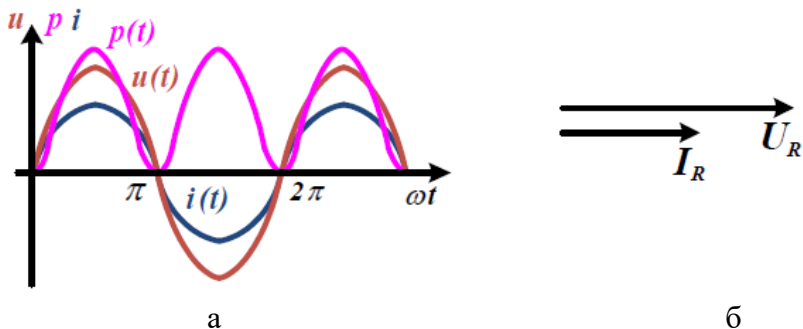
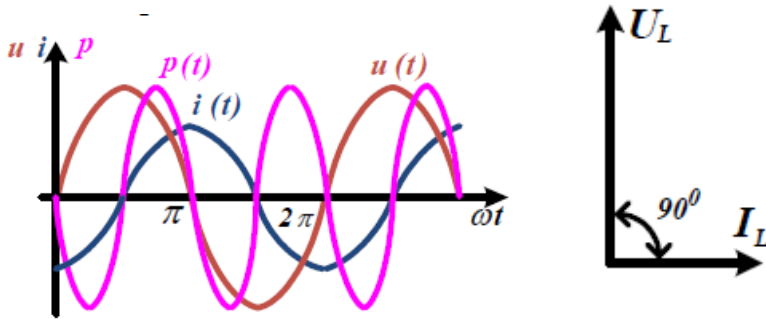


Рисунок 1.2 – Часові залежності змінного струму $i(t)$, напруги $u(t)$ та потужності $p(t)$ (а) та векторна діаграма (б) для споживачів активної потужності [4]

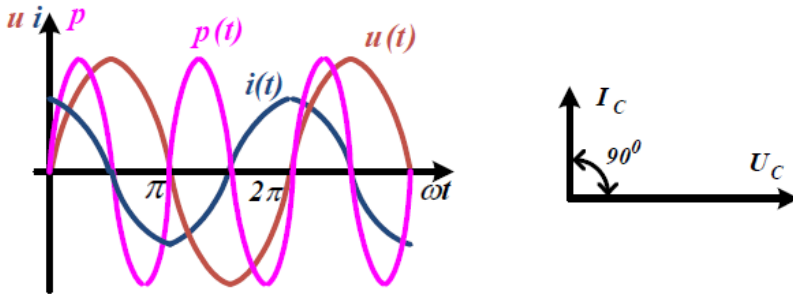
Споживачі реактивної потужності містять у своєму складі елементи, які накопичуються та віддають енергію (котушки індуктивності, трансформатори, конденсатори), реактивна потужність не йде на виконання корисної роботи, а може, наприклад, іти на компенсації реактивної потужності, створені іншими пристроями.

Якщо напруга випереджає по фазі струм, то такий реактивний елемент є індуктивним. На рисунку 1.3 наведені часові залежності змінного струму та напруги (а, в) та векторні діаграми (б, г). Для *індуктивного* елемента вектор U випереджає вектор I на 90° (рис 1.3 а, б). Якщо ж реактивний елемент ємнісного типу, то навпаки, струм буде випереджати напругу по фазі на 90° (рис. 1.3 в, г).



а

б



в

г

Рисунок 1.3 – Часові залежності змінного струму $i(t)$, напруги $u(t)$ та потужності $p(t)$ (а, в) та векторна діаграма (б, г) для індуктивного та ємнісного елементів [4].

Споживачі повної потужності – це такі, які споживають як активну, так і реактивну потужність. Прикладами таких споживачів можуть бути промислові підприємства, досить великі магазини і т.п.

Порядок виконання роботи

1. Запустити програму, ознайомитись із зовнішнім виглядом та функціями програми.

2. Запустити процес моделювання параметрів мережі за відсутності навантаження, натиснувши кнопку «Пуск» на панелі програми. По зовнішньому вигляду синусоїд напруги та струму, а також числових значеннях параметрів мережі зробити висновок про якість даної мережі.

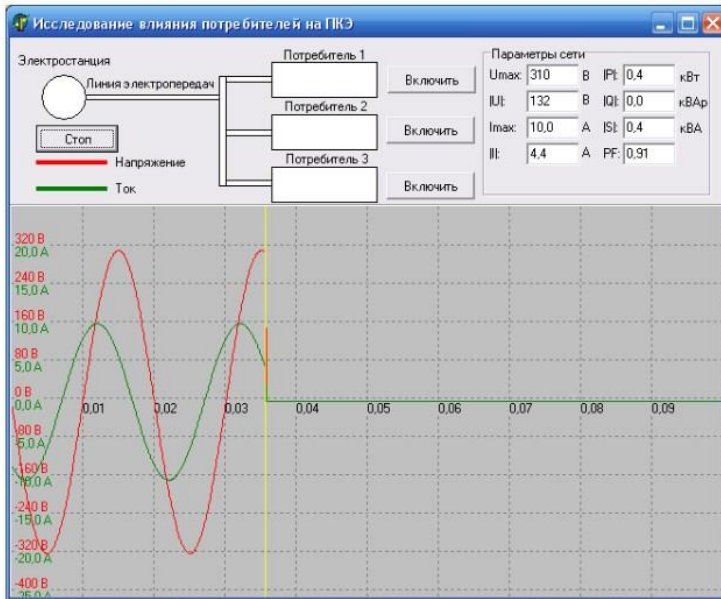


Рис.1.4 – Зовнішній вигляд програми для моделювання поведінки параметрів мережі при ввімкненні різних типів навантаження

3. Ввімкнути **Споживач 1**. За зовнішнім виглядом синусоїд напруги та струму проаналізувати вплив навантаження першого споживача на якість параметрів мережі та визначити тип навантаження даного споживача.

4. Ввімкнути **Споживач 2**. За результатами моделювання визначити тип навантаження даного споживача.

5. Ввімкнути **Споживач 3**. За результатами моделювання визначити тип навантаження даного споживача.

6. Для кожного типу споживача розрахувати: зміну напруги в процентах, глибину провалу напруги.

7. Заповнити таблицю:

	U, В	I, А	P, Вт	Q, ВАР	φ , град	(δU_y) , %	(δU_n) , %	Тип навантаження
без навантаж.								
Споживач 1								
Споживач 2								
Споживач 3								

8. Зробити висновки, оформити роботу.

Контрольні запитання.

1. Поясніть значення поняття якості електроенергії.
2. На що впливає якість електроенергії?
3. Які споживачі електроенергії впливають на її якість?
4. Назвіть показники якості електроенергії.
5. Як здійснюється контроль за якістю електроенергії?
6. Що називається відхиленням напруги і яка його допустима величина?
7. Як визначається відхилення напруги?
8. Як впливає відхилення напруги на електрообладнання?
9. Назвіть основну причину відхилення напруги.

Лабораторна робота 2

ДОСЛІДЖЕННЯ НЕЛІНІЙНИХ СПОТВОРЕНЬ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ

Мета роботи – дослідити несинусоїдальну напругу в електричній мережі, проаналізувати вплив вищих гармонік на коефіцієнт нелінійних спотворень і коефіцієнт гармонічних спотворень.

Елементи теорії.

Реальна напруга в мережі не є ідеальною синусоїдою, а являє собою періодичну функцію, тобто таку, яка повторюється через певний період часу. Такі функції можуть бути рнпрезентовані кількома способами: часовими діаграмами ($u(t)$, $i(t)$), аналітично розкладені в ряд Фур'є (формула 2.1) або графічно розкладені на еквівалентні синусоїди (рис 2.1).

Несинусоїдальна періодична функція являє собою суму основного сигналу та його гармонічних складових. Для визначення величини цих гармонік використовують перетворення Фур'є, а саме: сигнал розкладають на суму гармонічних сигналів. Це означає, що завжди можна підібрати ряд гармонічних (синусоїдальних) сигналів із такими амплітудами A , частотами ω та початковими фазами ψ алгебраїчна сума ординат яких дорівнює ординаті даного сигналу на будь-який момент часу. Частота першої гармоніки співпадає з частотою даного сигналу $f_1 = f$, частота другої гармоніки – у 2 рази більша $f_2 = 2f$, частота k -гармоніки – у k разів більша $f_k = kf$.

Загалом ряд Фур'є деякої функції $f(\omega t)$ виглядає так:

$$f(\omega t) = A_0 + A_{1m} \sin(\omega t + \psi_1) + A_{2m} \sin(2\omega t + \psi_2) + \dots + A_{km} \sin(k\omega t + \psi_k), \quad (2.1)$$

де A_0 – постійна складова або нульова гармоніка;

A_{km} і ψ_k – амплітуда й початкова фаза k -гармоніки.

ω – циклічна частота;

$A_{1m} \sin(\omega t + \psi_1)$ – основна або перша гармоніка,

$A_{km} \sin(k\omega t + \psi_k)$ – вищі k-гармоніки;

Для поширених форм сигналів (прямокутні, трикутні, синусоїдальні тощо) розклад їх в ряд Фур'є можна знайти в спеціальних довідниках. Для періодичного сигналу, близького до синусоїди, гармоніки спадають швидко, тому 3–5 гармонік є достатньо для точного опису сигналу.

Розклавши функцію, наприклад, сигнал напруги $u(\omega t)$, у ряд Фур'є можна побудувати часові діаграми одержаних гармонік (рис 2.1).

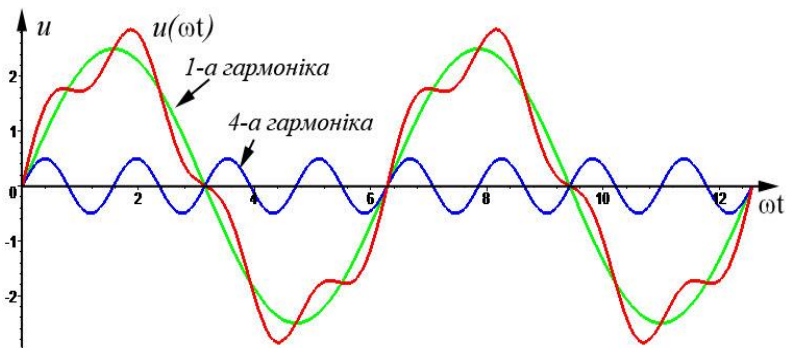


Рисунок 2.1 – Часова діаграма напруги $u(\omega t)$, та еквівалентні синусоїди (гармоніки)

Сигнал зручно подавати у вигляді амплітудного та фазового спектрів (рис 2.2).

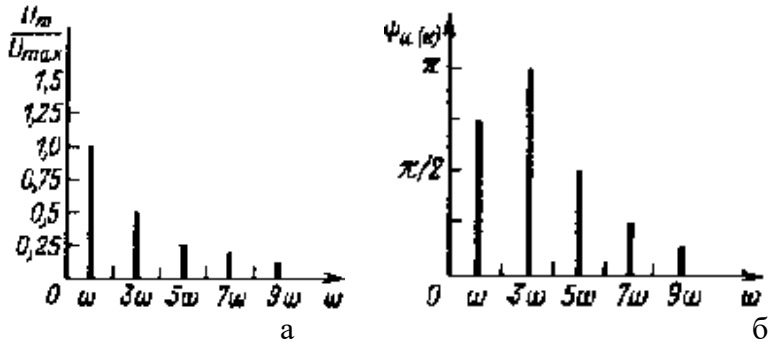


Рисунок 2.2 – Амплітудно-частотна (а) фазочастотна діаграми (б)

Амплітудний спектр – це набір амплітуд всіх гармонік, репрезентований у вигляді вертикальних ліній (діаграм) на залежності $A(\omega t)$. Фазовий спектр – це набір початкових фаз усіх гармонік, поданий у вигляді вертикальних ліній (діаграм) на залежності $\psi(\omega t)$.

Мірою наявності гармонік у сигналі є коефіцієнт нелінійних спотворень (КНС або Total Harmonic Distortion), який розраховують за такою формулою [2, 5]:

$$\text{КНС} = \sqrt{\frac{U^2 - U_1^2}{U_1^2}}, \quad (2.2)$$

де U – середньоквадратичне значення напруги

U_1 – середньоквадратичне значення напруги першої гармоніки.

Середньоквадратичне значення напруги для періодичного сигналу

$$U = \sqrt{\frac{U_1^2 + U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_k^2}{k}}, \quad (2.3)$$

Після підстановки (2.3) в (2.2) одержимо

$$\text{КНС} = \frac{\sqrt{U_{2m}^2 + U_{3m}^2 + \dots + U_{km}^2}}{U_{1m}}, \quad (2.4)$$

де U_{1m} – амплітудне значення напруги першої гармоніки;
 U_{2m} – амплітудне значення напруги другої гармоніки.

Формули (2.2) та (2.4) є еквівалентними. Тобто можна зробити висновок, що не важливо амплітудне чи середньоквадратичне значення використовувати для оцінювання впливу гармонік, а вибір формул (2.2) чи (2.4) пов'язаний лише з відомими значеннями напруги: середньоквадратичними чи амплітудними.

Чим менший коефіцієнт нелінійних спотворень, тим менше спотворень у сигналі й тим вища якість електричної енергії. КНС чистої синусоїди дорівнює 0.

Коефіцієнт n -ї гармоніки показує яку частину n -а гармоніка становить від загальної напруги та розраховується за такою формулою[3]:

$$K_{U(n)} = \frac{U_{(n)}}{U_{\text{ном}}} \cdot 100 \%, \quad (2.5)$$

де $U_{(n)}$ – чинне значення n -ї гармоніки.

Джерелами вищих гармонік є синхронні генератори електростанцій, силові трансформатори, пристрої для перетворення змінного струму на постійний, пристрої з нелінійними ВАХ або нелінійним навантаження. Найбільш значущий вплив на якість електричної енергії завдають вентильні перетворювачі, електродугові сталеплавильні печі, установки дугового та контактного зварювання, перетворювачі частоти, індукційні печі, газорозрядні лампи, телевізійні приймачі тощо.

Порядок виконання роботи

1. Відкрити розрахункову програму, ознайомитись із її зовнішнім виглядом та функціями (рис. 2.3).

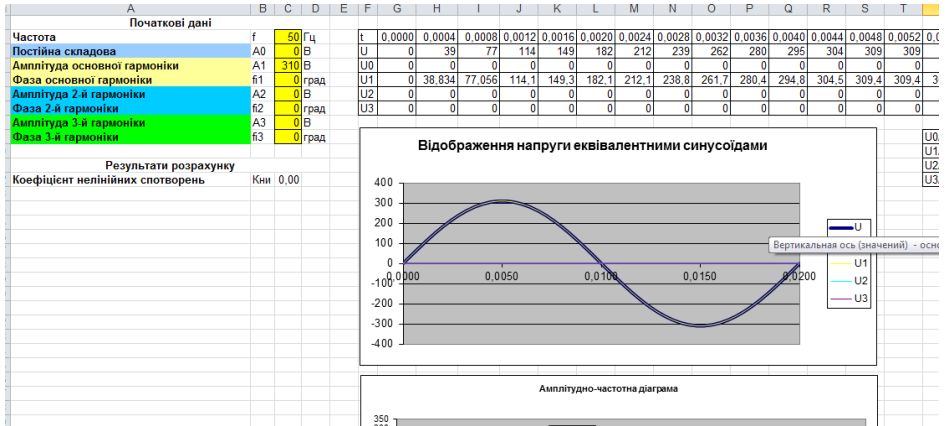


Рисунок 2.3 – Зовнішній вигляд програми для моделювання гармонічних спотворень

2. Задати такі параметри напруги (амплітуди та фази кожної гармоніки), щоб коефіцієнт нелінійних спотворень КНС = 5 %. Проаналізувати форму напруги.

3. Змінити параметри напруги так, щоб коефіцієнт нелінійних спотворень КНС = 20 %. Зробити висновок про форму напруги.

4. Аналогічним способом одержати коефіцієнт нелінійних спотворень КНС = 40 %. Зробити висновок про форму напруги.

5. Добитися значення КНС > 100 %. Зробити висновок про форму напруги.

6. Задати такі параметри напруги, при яких форма напруги матиме вигляд, як після випрямлення трифазного змінного

струму двотактним випрямлячем (рис 2.4). Розрахувати коефіцієнт нелінійних спотворень.

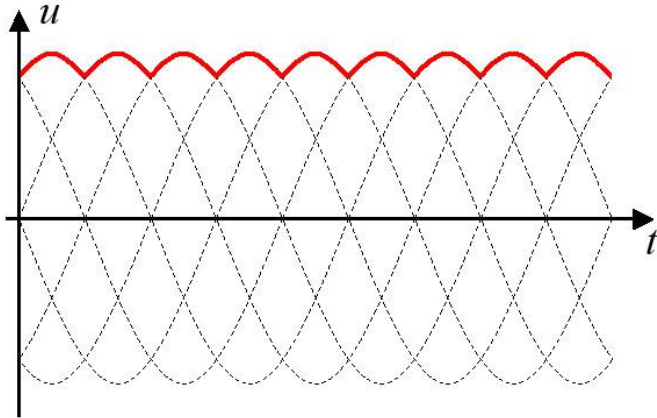


Рисунок 2.4 – Часова діаграма напруги після випрямлення трифазного струму двотактним випрямлячем

7. Одержані дані занести в таблицю

	A_0	A_1	ψ_1	A_2	ψ_2	A_3	ψ_3
КНС = 5 %.							
КНС = 20 %.							
КНС = 40 %.							
КНС > 100 %							
КНС =							

8. Зробити висновки, оформити роботу.

Контрольні питання

1. Якими показниками характеризується несинусоїдальність напруги в електромережах? Дайте їх визначення.
2. До яких негативних явищ призводить несинусоїдальність напруги живлення?
3. Чому напруга в електромережах стає несинусоїдальною?
4. Як визначають порядок вищих гармонік напруги в мережах із потужними напівпровідниковими перетворювачами?
5. Як на практиці визначають коефіцієнт спотворення синусоїдальності на шинах 6–10 кВ, що живлять випрямні агрегати?
6. Як розраховують коефіцієнт спотворення синусоїдальності в мережах, що живлять електродугові сталеплавильні печі, зварювальні навантаження, печі опору з тиристорним регулятором потужності?
7. Назвіть допустимі значення коефіцієнта спотворення синусоїдальності в електромережах?
8. Які методи та засоби використовують в електромережах для зменшення вищих гармонік?

Лабораторна робота 3

ДОСЛІДЖЕННЯ НЕСИМЕТРИЧНИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ І МЕТОДІВ СИМЕТРУВАННЯ

Мета роботи – дослідити електричну мережу в несиметричному режимі роботи, зробити висновок про вплив цього режиму на показники якості електроенергії. У разі високого ступеня несиметрії розрахувати симетрувальний пристрій.

Елементи теорії

Напруга (або струм) у трифазній системі є повністю симетричними, якщо всі три фази А, В і С зсунуті по фазі одна відносно іншої на 120° , а модулі цих векторів (амплітуди) рівні між собою (рис. 3.1 а). Якщо ж хоча б одна із цих умов не виконується, то система несиметрична (рис 3.1 б).

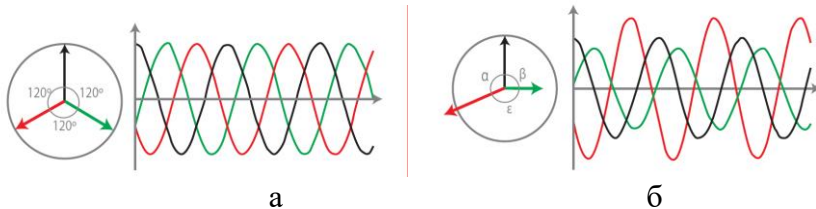


Рисунок 3.1 – Векторна та часова діаграми симетричної трифазної системи (а) та несиметричної трифазної системи (б)

Причиною несиметрії може бути:

- обрив фази або несиметричне коротке замикання;
- несиметричне навантаження – нерівномірне приєднання однофазних споживачів по фазах або несиметричне навантаження по фазах у трифазних споживачів,
- несиметрія опорів мереж.

Несиметрія навантажень по фазах викликає появу в усіх фазах струмів зворотної та нульової послідовності [3].

Розглянемо що це значить. При симетричному режимі роботи амплітуди напруг (струмів) рівні та зсунуті одна відносно одної на 120° . При несиметричному ж режимі спостерігається їх дисбаланс.

Для розрахунку таких кіл існує метод симетричних складових [4], коли несиметрична трифазна система репрезентована як векторна сума трьох симетричних трифазних систем:

- 1) система прямої послідовності з прямими порядком додержання фаз ($A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow A$) складається з трьох векторів $\dot{A}_1, \dot{B}_1, \dot{C}_1$, що рівні по довжині (модулю векторів) та здвинуті один відносно одного на 120° .
(в даній системі вектори мають індекси 1)
- 2) система зворотної послідовності (зі зворотнім порядком додержання фаз $A \rightarrow C \rightarrow B \rightarrow A$) – із векторів $\dot{A}_2, \dot{C}_2, \dot{B}_2$.
(вектори з індексами 2)
- 3) система нульової послідовності – з трьох рівних векторів, що співпадають по фазі $\dot{A}_0 = \dot{B}_0 = \dot{C}_0$.
(вектори з індексами 0).

Будь-яку несиметричну систему трифазних напруг (струмів, ЕРС) можна репрезентувати як результат накладання симетричних систем (як векторну суму) прямої, зворотної та нульової послідовностей

$$\begin{aligned}\dot{U}_A &= \dot{U}_{A1} + \dot{U}_{A2} + \dot{U}_{A0} \\ \dot{U}_B &= \dot{U}_{B1} + \dot{U}_{B2} + \dot{U}_{B0} \\ \dot{U}_C &= \dot{U}_{C1} + \dot{U}_{C2} + \dot{U}_{C0}\end{aligned} \quad (3.1)$$

Беручи це до уваги оператор трифазної системи a (3.1) набуде вигляду (3.2) $\dot{B}_1 = a^2 \cdot \dot{A}_1, \dot{C}_1 = a \cdot \dot{A}_1, \dot{B}_2 = a \cdot \dot{A}_1, \dot{C}_2 = a^2 \cdot \dot{A}_1$.

$$\begin{aligned}
 \dot{U}_A &= \dot{U}_{A1} + \dot{U}_{A2} + \dot{U}_{A0} \\
 \dot{U}_B &= a^2 \cdot \dot{U}_{A1} + a \cdot \dot{U}_{A2} + \dot{U}_{A0} \\
 \dot{U}_C &= a \cdot \dot{U}_{A1} + a^2 \cdot \dot{U}_{A2} + \dot{U}_{A0}
 \end{aligned}
 \tag{3.2}$$

де a – оператор трифазної системи – множення вектора на a повертає його на кут 120° , множення на a^2 – на 240° проти часової стрілки, модуль вектора при цьому не змінюється.

Векторна діаграма такої системи виглядає так:

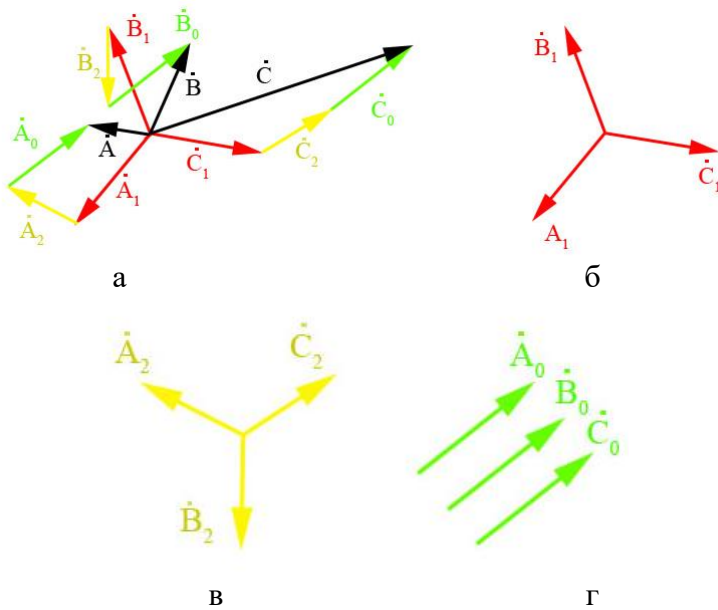


Рисунок 3.2 – Векторна діаграма несиметричної трифазної системи (а): векторні діаграми систем прямої (б) зворотної (в) та нульової (г) послідовностей

Напруги зворотної або нульової послідовності, значно менші за величиною за напругу прямої (основної) послідовності.

Несиметрія напруг характеризується коефіцієнтом несиметрії напруг за зворотною послідовністю та коефіцієнтом несиметрії за нульовою послідовністю [3].

Коефіцієнт несиметрії за зворотною послідовністю [3]

$$K_{2U} = \frac{U_{2(1)}}{U_{1(1)}} \cdot 100 \%, \quad (3.3)$$

де $U_{2(1)}$ – чинне значення напруги зворотної послідовності основної частоти трифазної системи;

$U_{1(1)}$ – чинне значення напруги прямої послідовності основної частоти трифазної системи.

Або за такою формулою:

$$K_{2U} = \frac{U_{2(1)}}{U_{\text{ном.л}}} \cdot 100 \%, \quad (3.4)$$

де $U_{\text{ном.л}}$ – номінальне значення лінійної напруги мережі

Коефіцієнт несиметрії за нульовою послідовністю [3]:

$$K_{0U} = \frac{\sqrt{3}U_{0(1)}}{U_{1(1)}} \cdot 100 \% \quad (3.5)$$

де $U_{0(1)}$ – чинне значення напруги нульової послідовності основної частоти трифазної системи.

Або за такою формулою:

$$K_{0U} = \frac{U_{0(1)}}{U_{\text{ном.ф}}} \cdot 100 \% \quad (3.6)$$

де $U_{\text{ном.ф}}$ – номінальне значення фазної напруги мережі.

В ДСТУ EN 50160:2014 такий несиметричний режим роботи називається «небаланс напруг електропостачання» (voltage unbalance). 95 % середньоквадратичних значень напруги зворотної послідовності (основного складника) повинні бути в межах 0 %–2 % від напруги прямої послідовності (основного складника) [1].

Потрібно відзначити, що джерелами несиметричного режиму роботи електричних мереж можуть бути індукційні та дугові електричні печі, електрозварювальні агрегати, потужні однофазні електроприймачі, наприклад, електровози в мережах із тяговими підстанціями тощо. Також розбалансування напруг може призводити до зміни напрямку обертання магнітного поля в асинхронних двигунах, що збільшує втрати та викликає зростання температури [5].

Порядок виконання роботи

1. Відкрити розрахункову програму для моделювання несиметричних режимів роботи електричної мережі, ознайомитись із зовнішнім виглядом та функціями програми (рис. 3.3).

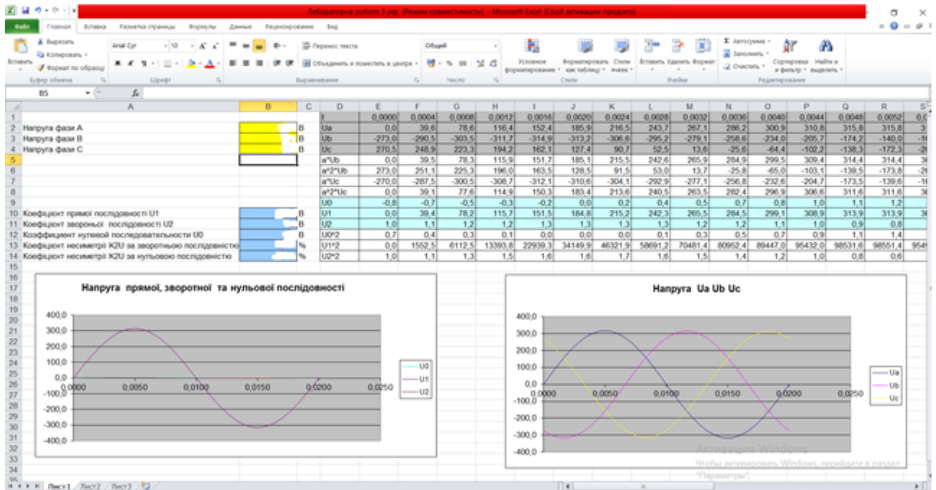


Рисунок 3.3 – Зовнішній вигляд програми для моделювання несиметричних режимів

2. Змінюючи напруги фаз A , B і C добитися значення коефіцієнта несиметрії $K_{2U} = 4\%$. Зробити висновок, при яких значеннях напруги фаз виникає гранично допустимий режим роботи електричної мережі.

3. Зафіксувавши напругу фаз A і B рівною номінальному значенню 220 V ($U_a = U_b = 220\text{ V}$) і змінюючи напруги фази C побудувати графік залежності коефіцієнта несиметрії K_{2U} від напруги фази C ($K_{2U} = f(U_c)$), зробити висновок про допустимі межі зміни напруги фаз.

4. Зафіксувавши напругу фази A ($U_a = 220\text{ V}$) і змінюючи напруги фаз B і C ($U_b > U_{b\text{ном}}$, $U_c < U_{c\text{ном}}$) побудувати залежність коефіцієнта несиметрії K_{2U} від напруги фаз B і C – $K_{2U} = f(U_b, U_c)$. Зробити висновок про допустимі межі зміни напруги фаз. Порівняти результати з попереднім дослідом.

Контрольні питання

1. Назвіть причини несиметричних режимів.
2. Назвіть види несиметрії.
3. Який метод використовують для дослідження несиметричних режимів?
4. Охарактеризуйте явище зсуву нейтралі навантаження.
5. Якими ПКЕ характеризується несиметрія і як їх визначають?
6. Як впливає несиметрія напруг на електроспоживачів?
7. Як розраховують коефіцієнти несиметрії напруг?

Лабораторна робота 4

РОЗРАХУНОК ВІДХИЛЕННЯ НАПРУГИ ЗА ДОПОМОГОЮ ЙМОВІРНІСНО-СТАТИСТИЧНИХ МЕТОДІВ

Мета роботи – навчитися застосовувати ймовірнісно-статистичний метод для аналізу відхилення напруги в електричній мережі.

Елементи теорії

Зміна параметрів електричної мережі, потужності й характеру навантаження з часом є основною причиною зміни показників якості електричної енергії [1]. Показники якості електричної енергії частково випадкові, тому оцінювати їх потрібно методами теорії ймовірності та статистики.

Нормальний закон розподілу (або розподіл Гауса)[6].

Параметри закону:

- математичне очікування випадкової величини (в нашому випадку відхилення напруги $M(\delta U)$,
- середньоквадратичне відхилення ($\delta_{\delta U}$)

Інформацію про вимірювання зручно представляти у вигляді гістограми (рис. 4.1) залежності відхилення напруги (δU), від імовірності (P) попадання значень у певний інтервал.

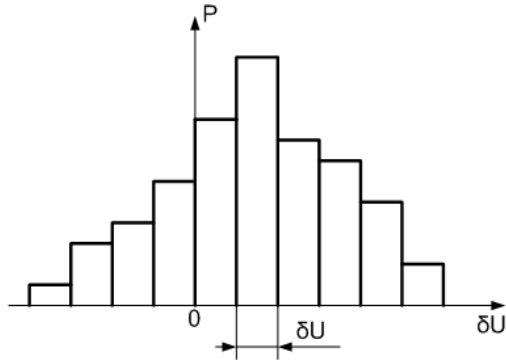


Рис.4.1 - Гістограма відхилень напруги

Увесь діапазон відхилень напруги поділяється на рівні інтервали шириною (ΔU). Для кожного інтервалу розраховують імовірність (частоту) попадання значень δU :

$$P_i = \frac{n_i}{n}, \quad (4.1)$$

де, n_i – кількість попадань в i -тий інтервал
 n – загальна кількість вимірювань.

Значення $M(\delta U)$, $\delta_{\delta U}$ визначають із гістограми. Математичне очікування – середній рівень відхилень величини δU в заданій точці мережі за певний період часу.

$$M(\delta U) = \sum P_i \delta U_i, \quad (4.2)$$

Також визначають дисперсію $D_{\delta U}$ – розсіювання відхилень напруги – математичне очікування квадрата відхилень напруги від її середнього значення $\delta_{\delta U}^2$:

$$D_{\delta U} = \delta_{\delta U}^2 = \sum_{i=1}^N (\delta U_i P_i - M(\delta U))^2, \quad (4.3)$$

де N – число інтервалів гістограми.

Для задоволення вимог стандарту значення середньоквадратичного відхилення напруги $\delta_{\delta U}$ за результатами вимірювань не повинне перевищувати $1/4$ від ширини припустимого діапазону. Так, якщо допустимий діапазон відхилення напруги усередненого середньоквадратичного значення напруги $\delta U_y = \pm 5\%$, то необхідно, щоб $\delta_{\delta U}$ не перевищувало $2,5\%$.

Хід роботи

1. Відкрити програму для розрахунку відхилень напруги, ознайомитись із зовнішнім виглядом та функціями програми (рис. 4.1).

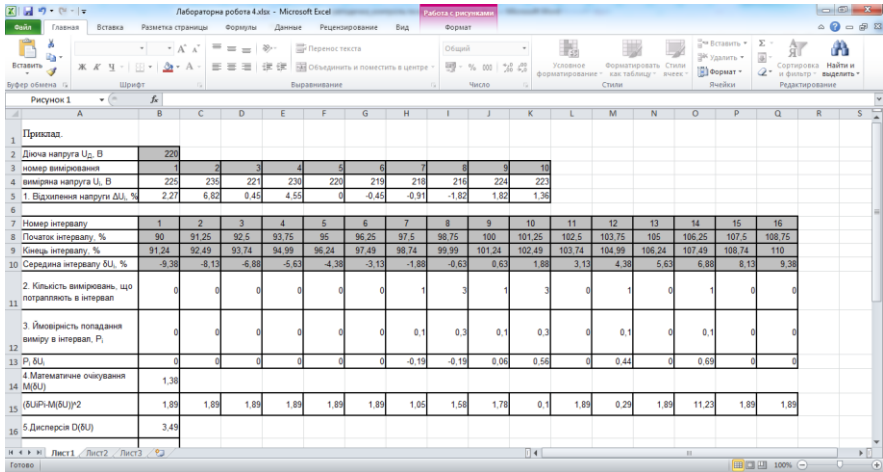


Рисунок 4.1 – Зовнішній вигляд програми для розрахунку відхилень напруги в електричній мережі за допомогою методу гістограм

2. Відповідно до свого варіанта (таблиця 4.1) внести значення вимірювань наружи в комірку програми «виміряна напруга U_i , В».

Таблиця 4.1 – Варіанти завдань

№ пор.	Номер вимірювання / значення, В									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	222	235	204	215	237	221	205	226	204	240
2	238	233	216	220	222	240	233	244	203	231
3	208	207	203	206	211	221	236	219	222	210
4	231	205	205	221	213	210	232	207	215	225
5	201	214	240	200	230	232	241	232	240	231
6	233	232	238	203	207	229	223	227	207	200
7	232	210	210	219	232	219	243	239	231	239
8	219	221	219	236	235	211	228	227	231	226
9	200	226	208	217	221	235	231	201	238	201
10	215	221	232	219	202	223	210	231	204	232
11	220	235	204	205	237	204	205	226	204	204
12	206	233	216	233	222	216	233	244	203	203
13	221	207	203	236	211	203	236	219	222	222
14	200	205	205	232	213	205	232	207	215	215
15	203	214	240	241	230	240	241	232	240	240
16	219	232	238	223	207	238	223	227	207	207
17	236	210	210	243	232	210	243	239	231	231
18	217	221	219	228	235	219	228	227	231	231
19	219	226	208	231	221	208	231	201	238	238
20	215	221	232	210	202	232	210	231	204	204
21	203	212	218	201	217	209	213	227	217	199
22	200	216	208	210	221	215	231	201	228	231
23	201	215	205	220	213	200	232	207	205	235
24	208	233	216	202	222	200	230	244	203	201

3. Розрахувати математичне очікування, середньоквадратичне відхилення та дисперсію.

4. Побудувати гістограму, зробити висновок про якість електричної мережі.

Контрольні питання

1. Назвіть причини відхилення напруги в мережі.

2. Який вплив робить відхилення напруг на електроспоживачів?

3. Який метод використовують для розрахунку відхилення напруги?

4. Чому відхилення напруги є випадковою величиною?

5. Які заходи застосовують для поліпшення показників якості електричної енергії, відхилення напруги?

Практична робота 5

РОЗКЛАД ПЕРІОДИЧНОЇ ФУНКЦІЇ В РЯД ФУР'Є

Мета роботи – навчитися розкладати періодичну функцію в ряд Фур'є.

Елементи теорії

Задача. Розкласти в тригонометричний ряд Фур'є періодичну функцію напруги, вираженої кривою симетричною відносно переходу через нуль (рис. 5.1). Розрахунки зробити для:

- 1) $t_1 = T/4$ (рис. 5.1 а);
- 2) $t_1 = 0$ (рис. 5.1 б);
- 3) $t_1 = T/2$ (рис. 5.1 в).

Для кожного випадку на основі розкладання в ряд побудувати лінійний спектр частот.

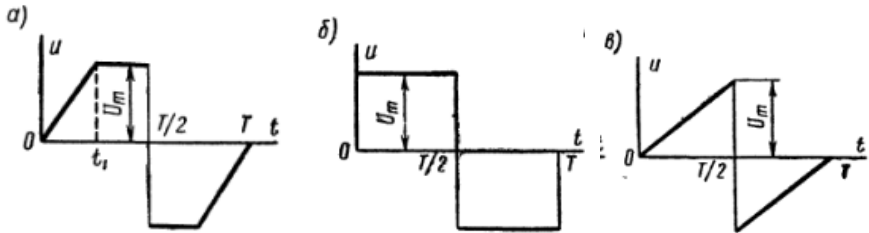


Рисунок 5.1 – Періодичні функції

Тригонометричним рядом Фур'є деякої функції називають функціональний ряд виду [7]

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos nx + b_n \sin nx), \quad (5.1)$$

де числа a_0 , a_n та b_n називають коефіцієнтами Фур'є функції та розраховують за такими формулами:

$$a_0 = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) dx, \quad (5.2)$$

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \cos(nx) dx, \quad (5.3)$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \sin(nx) dx, \quad (5.4)$$

Рівняння кривої для різних інтервалів періоду під час зміни часу t від 0 до t_1 має вигляд:

$$u = \frac{U_m}{t_1} t; \quad (5.5)$$

а під час зміни часу t від t_1 до $T/2$ має такий вигляд:

$$u = U_m. \quad (5.6)$$

Скористаємось таблицею 5.1, де описані особливості розкладу функцій у ряд Фур'є. Оскільки задана в умові функція симетрична відносно початку координат, тобто є не парною, то, згідно з таблицею 5.1 функції № 2, в ряді Фур'є будуть відсутні постійна складова та косинусоїдальні гармоніки ($a_0 = a_n = 0$). Тобто буде присутній лише коефіцієнт b_n . Для знаходження коефіцієнта b_n (формула 5.4) необхідно розбити область інтегрування на 2 проміжки: від 0 до t_1 та від t_1 до $T/2$. Інтегрування повинно проводитися за повний період T функції, тому необхідно домножити на 2. Одержуємо:

$$b_n = 2 \frac{2}{T} \left[\int_0^{t_1} \frac{U_m}{t_1} t \sin n \omega_1 t dt + \int_{t_1}^{\frac{T}{2}} U_m \sin n \omega_1 t dt \right] \quad (5.7)$$

Наступним етапом необхідно взяти інтеграли та одержати коефіцієнт ряду

$$b_n = \frac{4}{T} \left[\frac{U_m}{t_1} \left(-\frac{1}{n} t \cos n \omega_1 t + \frac{1}{n^2} \sin n \omega_1 t \right) \right]_{t=0}^{t=t_1} - \frac{U_m}{n} [\cos n \omega_1 t]_{t=t_1}^{t=\frac{T}{2}} = \frac{2U_m}{n\pi} \left(\frac{1}{n \omega_1 t_1} \sin n \omega_1 t_1 - \cos n\pi \right). \quad (5.8)$$

1) Значення $t_1 = T/4$. Скористаємось таблицею 5.1 а. Одержимо

$$b_n = \frac{2U_m}{n\pi} \left(\frac{2}{n\pi} \sin \frac{n\pi}{2} - \cos n\pi \right) \quad (5.9)$$

Знайдемо гармоніки для $n = 1-13$

$$\begin{aligned} b_1 &= \frac{1}{1} \cdot \frac{2U_m}{\pi} \left(\frac{1}{1} \cdot \frac{2}{\pi} + 1 \right); \\ b_2 &= -\frac{1}{2} \cdot \frac{2U_m}{\pi}; \\ b_3 &= \frac{1}{3} \cdot \frac{2U_m}{\pi} \left(-\frac{1}{3} \cdot \frac{2}{\pi} + 1 \right); \\ b_4 &= -\frac{1}{4} \cdot \frac{2U_m}{\pi}, \dots \end{aligned} \quad (5.10)$$

Для цього типу кривих будуть відсутні синусоїдальні гармоніки, тобто $\sin(x) = 0$. Оже, одержимо такий ряд:

$$u = \frac{2U_m}{\pi} \left[\left(\frac{1}{1} \cdot \frac{2}{\pi} + 1 \right) \sin \omega_1 t - \frac{1}{2} \sin 2\omega_1 t + \frac{1}{3} \left(-\frac{1}{3} \cdot \frac{2}{\pi} + 1 \right) \sin 3\omega_1 t - \frac{1}{4} \sin 4\omega_1 t + \dots \right] \text{в.} \quad (5.11)$$

2) Значення $t_1 = 0$.

Дана крива (рис. 5.1 б) симетрична відносно початку координат, тому вибираємо з таблиці графік 7,3б. У разі $t_1 = 0$ перша складова в одержаному раніше виразі для b_n перетворюється на невизначеність, розкриваючи яку знайдемо шляхом ділення похідної чисельника на похідну знаменника й переходячи до межі під час наближення t_1 до 0)

$$\left(\frac{\sin n \omega_1 t_1}{n \omega_1 t_1} \right)_{t_1 \rightarrow 0} = 1. \quad (5.12)$$

Отже, одержимо

$$b_n = \frac{2U_m}{n\pi} (1 - \cos n\pi) = \frac{4U_m}{n\pi} \sin^2 \frac{n\pi}{2}. \quad (5.13)$$

Знайдемо гармоніки для $n = 1-13$

$$b_1 = \frac{1}{1} \cdot \frac{4U_m}{\pi}; \quad b_2 = 0; \quad b_3 = \frac{1}{3} \cdot \frac{4U_m}{\pi}; \quad b_4 = 0; \\ b_5 = \frac{1}{5} \cdot \frac{4U_m}{\pi}, \dots \quad (5.14)$$

Шуканий ряд має вигляд

$$u = \frac{4U_m}{\pi} \left(\sin \omega_1 t + \frac{1}{3} \sin 3\omega_1 t + \frac{1}{5} \sin 5\omega_1 t + \dots \right) \vartheta. \quad (5.15)$$

3) Значення $t_1 = T/2$.

У разі значення $t = T/2$ графік буде симетричним відносно осі абсцис у разі зміщення двох півперіодів, тому одержимо графік із пункту таблиці 5.1 в.

Раніше одержана формула набуде вигляду

$$b_n = \frac{2U_m}{n\pi} \left(\frac{1}{n\pi} \sin n\pi - \cos n\pi \right) = -\frac{2U_m}{n\pi} \cos n\pi. \quad (5.16)$$

У разі $n = 1-13$ коефіцієнти ряду будуть дорівнювати

$$b_1 = \frac{1}{1} \cdot \frac{2U_m}{\pi}; \quad b_2 = -\frac{1}{2} \cdot \frac{2U_m}{\pi}; \quad b_3 = \frac{1}{3} \cdot \frac{2U_m}{\pi}; \\ b_4 = -\frac{1}{4} \cdot \frac{2U_m}{\pi}, \dots \quad (5.17)$$

Одержимо шуканий ряд

$$u = \frac{2U_m}{\pi} \left(\sin \omega_1 t - \frac{1}{2} \sin 2\omega_1 t + \frac{1}{3} \sin 3\omega_1 t - \right. \\ \left. - \frac{1}{4} \sin 4\omega_1 t + \dots \right) \vartheta. \quad (5.18)$$

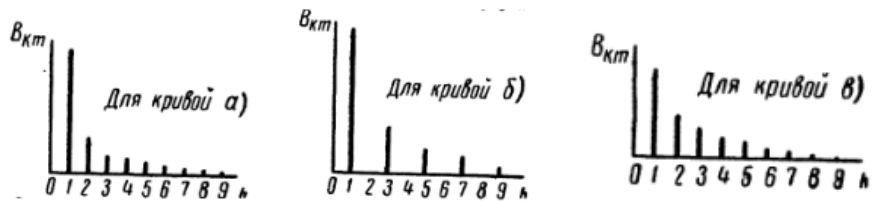
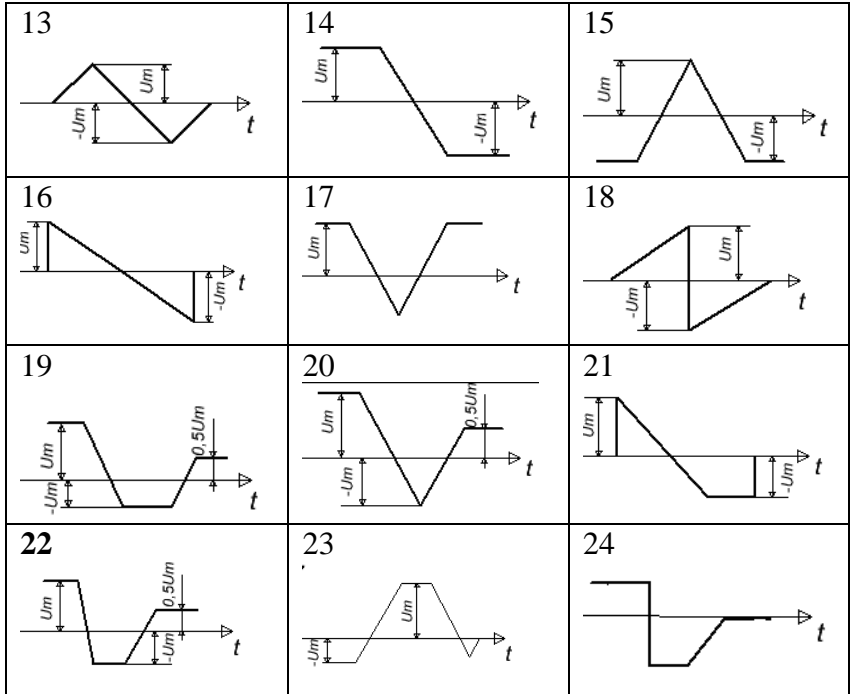


Рисунок 5.2 – Лінійні спектри частот

Таблиця 5.2 – Варіанти завдання для самостійної роботи

1	2	3
4	5	6
7	8	9
10	11	12



Список літератури

1. Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загального призначення. ДСТУ EN 50160:2014 (EN 50160:2010, IDT) ДСТУ EN 50160:2014. Київ : Мінекономрозвитку України, 2014.
2. Sankaran C. Power Quality. Boca Raton London New York Washington, D. C. : CRC Press LLC, 2002. 202 p.
3. Лебединський І. Л., Романовський В. І., Загородня Т. М. Електричні системи та мережі : конспект лекцій. Суми : Сумський державний університет, 2018. 214 с.
4. Лебединський І. Л., Романовський, В. І., Загородня Т. М. Теоретичні основи електротехніки: конспект лекцій. Суми : Сумський державний університет, 2016. 325 с.
5. Alexander Kusko., Thompson M. T. Power Quality in Electrical Systems. New York : McGraw Hill; 1st edition, 2007. 336 p.
6. Розподіл Гауса. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9D%D0%BE%D1%80%D0%BC%D0%B0%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D0%B8%D0%B9_%D1%80%D0%BE%D0%B7%D0%BF%D0%BE%D0%B4%D1%96%D0%BB.
7. Ряд Фур'є. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A0%D1%8F%D0%B4_%D0%A4%D1%83%D1%80%27%D1%.

Електронне навчальне видання

5926 МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до лабораторних робіт із дисципліни
«Контроль та керування якістю електричної енергії»
для здобувачів спеціальності
«141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
всіх форм здобуття вищої освіти

У двох частинах

Частина 1

Відповідальний за випуск І. Л. Лебединський
Редакторка О. Ф. Дубровіна
Комп'ютерне верстання Д. М. Макуха, З.М. Ляшенко

Формат 60×84/16. Ум. друк. арк. 2,32. Обл.-вид. арк.1,89.

Видавець і виготовлювач
Сумський державний університет,
вул. Р.-Корсакова, 2, м. Суми, 40007
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК №