

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Центр перепідготовки та післядипломної освіти

(повна назва факультету)

Кафедра електричної інженерії

(повна назва кафедри)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

магістр

(назва освітнього ступеня)

на тему: **Схемотехнічне дослідження якості електроенергії**
в мережах з нелінійними електроприймачами

Виконав: студент 6 курсу, Групи ЕТмд-61
спеціальності 141 – Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка
(шифр і назва спеціальності)

Котелянець Я.В.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник Оробчук Б.Я.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Нормоконтроль Коваль В.П.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри Коваль В.П.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Рецензент
(підпис) (прізвище та ініціали)

Тернопіль
2025

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет Центр перепідготовки та післядипломної освіти
(повна назва факультету)

Кафедра електричної інженерії
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Коваль В.П.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

« »

2024 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня магістр
(назва освітнього ступеня)

за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(шифр і назва спеціальності)

студенту КОТЕЛЯНЕЦЬ Ярослав Васильовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Схемотехнічне дослідження якості електроенергії
в мережах з нелінійними електроприймачами

Керівник роботи Оробчук Богдан Ярославович, к.т.н., доцент
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, місце роботи)

Затверджені наказом ректора від « 10 » жовтня 2024 року № 4/7-985

2. Термін подання студентом завершеної роботи квітень, 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи Статистичні дані електроспоживання супермаркета «АТБ» (вул. Микулинська, 116/1, Тернопіль), навчального корпусу №7 ТНТУ ім. І. Пулюя (вул. Микулинська, 46), системи освітлення залізничного моста Тернопільської залізниці (вул. Руська)

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)

1. Аналітичний розділ

2. Проектно-конструкторський розділ

3. Розрахунково-дослідницький розділ

4. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)

1. Актуальність теми, предмет і об'єкт дослідження, поставленні задачі та шляхи їх розв'язку

2. Вплив вищих гармонік на параметри електричної мережі

3. Способи зменшення гармонійних складових напруги та струму

4. Схема включення аналізатора параметрів якості енергії

5. Результати досліджень якості електричної енергії на заданих об'єктах вул. Руська

6. Алгоритм розрахунку параметрів фільтрокомпенсуючої ланки

7. Результати моделювання частотно залежних кіл для мереж освітлення

8. Загальні висновки до кваліфікаційної роботи

РЕФЕРАТ

Котелянець Я.В. Схемотехнічне дослідження якості електроенергії в мережах з нелінійними електроприймачами. 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка; Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя. Центр перепідготовки та післядипломної освіти. Кафедра електричної інженерії, група ЕТмд-61. – Тернопіль: ТНТУ, 2025.

Стор. - 83; рис. - 58; табл. - 8; слайдів - 20; джерел – 43

У кваліфікаційній роботі розглянуто теоретичні та практичні питання, що дозволили виконати дослідження якості електроенергії в мережах з нелінійними електроприймачами, зокрема системи освітлення залізниці, системи електроспоживання супермаркету та навчально-лабораторного корпусу вищого навчального закладу.

У кваліфікаційній роботі виконано дослідження складу гармонік в мережах з нелінійними приймачами та якості електричної енергії на об'єктах, основним нелінійним навантаженням яких є однофазні джерела живлення, а також на об'єктах з електроосвітленням на основі світлодіодних світильників. Проведено розрахунок на базі 4-променевої зірки. В роботі виконано моделювання частотно залежних ланок для мереж освітлення та здійснено розрахунок надійності фільтрокомпенсуючого пристрою.

Ключові слова: якість електричної енергії, нелінійні електроприймачі, система освітлення, система електроспоживання, гармоніка, однофазні джерела живлення, пасивний фільтр, фільтрокомпенсуючий пристрій.

ABSTRACT

Y. Kotelyanets. Circuitry testing of electrical energy quality at networks with non-linear power receivers. 141 - Electrical Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics. Ternopil Ivan Puluj National Technical University. Center for Retraining and Postgraduate Education. Chair of Electrical Engineering, group ETmd-61. – Ternopil: TNTU, 2025.

Page – 83; Illustrations – 58; Tables – 8; Blueprints – 20; Sources – 43

The qualification work considered theoretical and practical issues that allowed conducting research on the quality of electricity in networks with nonlinear electrical receivers, in particular, railway lighting systems, electricity consumption systems of a supermarket, and the educational and laboratory building of a higher educational institution.

In the qualification work, a study of the composition of harmonics in networks with nonlinear receivers and the quality of electric energy at facilities whose main nonlinear load is single-phase power sources, as well as at facilities with electric lighting based on LED lamps, was carried out. The calculation was carried out on the basis of a 4-ray star. The work performed modeling of frequency-dependent links for lighting networks and calculated the reliability of the filter-compensating device.

Key words: electrical energy quality, nonlinear electrical loads, lighting system, power consumption system, harmonics, single-phase power supplies, passive filter, filter-compensating device.

ЗМІСТ

ВСТУП	7
1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ	11
1.1 Аналіз електромереж на базі світлодіодних світильників	11
1.2 Аналіз струмів в мережах з світлодіодними світильниками	13
1.3 Аналіз джерел нелінійних спотворень у системі електропостачання	16
1.4 Вплив вищих гармонік на параметри електричної мережі	19
1.5 Аналіз способів зменшення гармонійних складових напруги та струму	24
1.6 Висновки до розділу 1	26
2 РОЗРАХУНКОВО-ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ	27
2.1 Дослідження складу гармонік в мережах з нелінійними приймачами	27
2.2 Проведення досліджень якості електричної енергії	30
2.2.1 Дослідження системи електропостачання супермаркету	31
2.2.2 Дослідження системи електропостачання навчального корпусу №7	35
2.2.3 Дослідження системи електропостачання освітлення вулиці	39
2.3 Розрахунок пасивних фільтрів на базі 4-променевої зірки	43
2.4 Висновки до розділу 2	51
3 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ	52
3.1 Моделювання частотно залежних ланок для мереж освітлення	52
3.2 Розрахунок надійності фільтрокомпенсуючого пристрою	65
3.3 Висновки до розділу 3	70
4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	71
4.1 Охорона праці як складова безпеки життєдіяльності	71
4.2 Аналіз причин ураження людини електричним струмом	72
4.3 Заходи безпеки життєдіяльності в електроустановках	76
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	78
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	79

ВСТУП

Актуальність теми. Структуру сучасного електричного споживання можна охарактеризувати розширюваним нелінійним навантаженням, характер якого визначається алгоритмом роботи джерел вторинного електроживлення.

У зв'язку з цим багато енергопостачальних організацій зіткнулися із серйозною проблемою виникнення в розподільчих мережах високих по відношенню до промислової частоти гармонік. Коли значення потужності нелінійного навантаження не перевищує 15% значення потужності системи електропостачання, то нема значних змін у режимі роботи системи. При збільшенні нелінійного навантаження більше 25% в електричних мережах можуть виникають негативні та аварійні режими [1]. Впровадження в українську економіку енергозберігаючих технологій дозволить підвищити ефективність виробництва, знизити питоме енергоспоживання та підвищити конкурентну спроможність власних товаровиробників. У випадку масового переходу на енергозберігаючі джерела світла замість ламп розжарювання буде спостерігатися суттєве зниження споживання потужності на освітлення, але додатково зросте забруднення електромереж вищими гармонійними складовими [2]. Варто відмітити, що на сучасному етапі розвитку проблема енергоефективності стоїть є пріоритетною із-за постійного зростання споживання електричної енергії і згідно прогнозів International Energy Outlook управління з інформації Департаменту енергії США у найближчі 30 років споживання електроенергії у світі може зрости на 60% [3, 4].

Заборона на лампи розжарювання та орієнтація на енергозберігаючі лампи дозволяє суттєво заощадити енергоресурси, оскільки, наприклад, в компактних люмінесцентних лампах біля 25% споживаної електроенергії використовується на вироблення світла, а у світлодіодних вже більше 80 %. Проведені дослідження показали, що для зниження споживаної потужності на освітлення можна використовувати напівпровідникові джерела світла, зокрема, світло-випромінюючі діоди [5].

Світлодіодне або напівпровідникове освітлення є одним із способів енергозбереження і знайшов широке використання в повсякденному житті [6]. Поп-

равки до «Санітарних правил і норм» дозволили використовувати світлодіодні світильники у всіх сферах діяльності. Напівпровідникові джерела світла на основі світлодіодів з меншим енергоспоживанням, кращою екологічністю, більшою довговічністю, малими експлуатаційними витратами на даний час мають серйозний недолік, а саме високу ціну. Розвиток світового ринку потужних світлодіодів дозволяє розглядати напівпровідникове освітлення в якості альтернативи, технічно досконалого і економічно конкурентного товару сучасним газорозрядним лампам [7].

Необхідно також відмітити, що перспективні сьогодні напівпровідникові джерела світла володіють імпульсним характером електроспоживання, широ-ким спектром гармонік і низькою електромагнітною сумісністю з електромере-жею живлення [8]. Забезпечення електромагнітної сумісності світлодіодних світильників з електромережею живлення можна вирішити при застосуванні частотнозалежних або фазокомпенсуючих пристроїв (коректорів коефіцієнта потужності) [9]. Пристрої корекції коефіцієнта потужності є досить складними активними електронними колами, що суттєво знижують економічну доцільність застосування світлодіодних світильників в малопотужних мережах, до яких відносяться електромережі освітлення.

Таким чином, вирішення науково-технічного завдання при розробці простих і ефективних засобів фільтрації вищих гармонік є актуальною задачею, оскільки це дозволяє забезпечити в електромережах живлення необхідну якість електричної енергії [10].

Мета кваліфікаційної роботи. Метою кваліфікаційної роботи є обґрунтування ефективних схемних рішень фільтрокомпенсуючих пристроїв для забезпечення необхідних показників якості електроенергії в системах електропостачання енергозберігаючих електроприймачів з нелінійними вольт-амперними характеристиками.

Для вирішення поставленої мети були розв'язані наступні задачі:

1. Виконано експериментальні дослідження гармонійного складу струмів та напруг у мережах електропостачання енергозберігаючих електроприймачів з нелінійними вольтамперними характеристиками.

2. Проведено обґрунтування ефективних схемних рішень фільтрокомпенсуючих пристроїв для підтримання необхідних параметрів якості електроенергії в системах електропостачання енергозберігаючих електроприймачів з нелінійними вольтамперними характеристиками.

3. Виконано аналіз динамічних характеристик фільтрокомпенсуючих пристроїв з метою оцінки їх впливу на перехідні процеси при включенні та відключенні мереж з нелінійним навантаженням.

4. Проведено оцінку впливу фільтрокомпенсуючих пристроїв за рівнем надійності мереж електропостачання зовнішнього освітлення.

Об'єкт дослідження: комунальні мережі електропостачання енергозберігаючих приймачів постійної потужності з нелінійною характеристикою.

Предмет дослідження: якість електроенергії в комунальних розподільних електричних мережах та методи зниження негативного впливу високо-частотних гармонічних складових на напругу живлення.

Наукова новизна виконаної роботи є наступною:

- обґрунтовано можливість використання пасивних фільтрів у якості технічних засобів для забезпечення потрібного рівня якості електроенергії в системах електропостачання постійної потужності з нелінійними вольтамперними характеристиками;

- запропоновано методику визначення необхідного рівня вибіркості пасивного фільтра з урахуванням потужності вищих гармонік струму.

Отримані практичні результати роботи полягають в запропонованій методиці визначення необхідного рівня вибіркової, яка є основою для інженерного проектування пасивних фільтрів для забезпечення необхідних показників якості електроенергії в системах електропостачання енергозберігаючих електроприймачів з нелінійними вольтамперними характеристиками.

Апробація отриманих результатів виконаної роботи. Базові положення кваліфікаційної роботи та її результати були заслухані на XII науково-технічній конференції (18–19 грудня 2024 р., місто Тернопіль).

Наукові публікації. За результатами проведених досліджень виконано публікацію 1 тези доповідей «Аналіз кібербезпеки цифрових підстанцій». Матеріали XII науково-технічної конфції «Інформаційні моделі, системи та технології» Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, (Тернопіль, 18–19 грудня 2024 р.). – Тернопіль : Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2024. – 238 с.

Структура роботи: вступ, 4 розділи, висновки, перелік посилань (43 найменування); текстова частина: 83 сторінки, 58 таблиць, 8 рисунків.

1.1 Аналіз електромереж на базі світлодіодних світильників

Фахівці вважають, що протягом 15 наступних років світлові випромінюючі діоди суттєво змінять практику штучного освітлення через очевидні переваги світлодіодних світильників перед іншими джерелами світла, а саме [11]:

- термін служби значно більший за термін експлуатації існуючих джерел світла, а термін безперервної роботи становить не менше 100000 (наприклад, галогенна лампа працює 1000 годин, металогалогенна – 3000 годин);

- висока надійність, механічна міцність та вібростійкість досягається за рахунок особливостей конструкції даного типу світильника, а саме:

- а) литий монолітний корпус з алюмінієвого сплаву дозволяє досягти ступеня захисту IP67,

- б) відсутність нитки розжарювання гарантує високу вібростійкість,

- в) полікарбонатне скло може витримувати високі ударні навантаження;

- висока контрастність освітлення гарантує покращену чіткість освітлюваних об'єктів;

- у прожекторах цього типу та інших виробках показник використання світлового потоку становить 100 %, а в стандартних вуличних світильниках – біля 75%;

- технічні характеристики виключають небезпеку перевантаження комунальних електромереж у момент їх включення;

- гетероструктура світлодіодів забезпечується миттєве запалювання при подачі напруги живлення і стабільну працездатність світильників при будь-якій температурі навколишнього середовища, що актуально для вуличного освітлення населених пунктів України;

- широкі можливості для оптоволоконних систем на через заміну громіздких та ненадійних світловипромінювачів на світлодіодні освітлювачі;

- застосування світлодіодних світильників дозволяє знизити енергоспоживання на 75% у порівнянні зі світильниками на газорозрядних лампах;

- відсутність заміни та обслуговування світлодіодних світильників протягом терміну їх експлуатації дозволяє знизити їх експлуатаційні витрати;

- у нічний час, з метою економії електроенергії, можна знизити освітленість вулиці до 50 % за допомогою зниження напруги (традиційні світильники на газорозрядних лампах при зниженні напруги вимикаються);

- застосування світлодіодних світильників дозволяє знизити втрати на проводах ліній живлення та зменшити матеріаломісткість мережі живлення;

- екологічна безпека світлодіодних світильників забезпечує збереження навколишнього середовища, не вимагаючи спеціальних умов утилізації;

- відсутність стробоскопічного ефекту в світлодіодних світильниках дозволяє виключити мерехтіння світла і його негативний вплив на сітківку ока людини при використанні таких світильників.

Перераховані вище переваги світлодіодних світильників вказує на доцільність заміни традиційних джерел світла на напівпровідникові, а актуальність задачі переходу на нові технології штучного освітлення підтверджують проведені наукові дослідження в цій галузі провідними країнами світу. Наприклад, з держбюджету США в рамках програми фундаментальних досліджень National Lighting Initiative на цей проект виділено понад 1 млрд. доларів. Головним завданням програми є підвищення ефективності білих світлодіодів до 150 Лм/Вт і згідно експертних прогнозів економія електроенергії в США при переході на твердотільні джерела має сягнути 1100 ТВт·год на рік [12].

Десять років тому було ініційовано програму LED City американською фірмою Cree для просування світлодіодних технологій загального зовнішнього та внутрішнього освітлення. Програма призначена для промислових підприємств та місцевого самоврядування і використовується для проектування та впровадження світлодіодного освітлення населених пунктів. Програма є міжнародною, включає в себе міста Америки, Канади, Італії та Китаю [13].

Світовим лідером у галузі освітлення є компанія Royal Philips Electronics (Німеччина), яка суттєво розширює спектр своїх світлодіодних світлових продуктів для освітлення приміщень і вулиць [14].

Ще одним потужним гравцем на ринку освітлювальних систем є фірма Toshiba, яка веде свій бізнес в таких країнах як Франція, Німеччина та Великобританія. Світлодіодні лампи виробництва Toshiba у продажу у Франції з січня

2010 року. Фахівці фірми в галузі світлодіодного освітлення прогнозують щорічне зростання біля 20% світового ринку світлодіодних світильників [15].

Енергозбереження в Україні є одним із базових постулатів державної політики, базові питання якого відображені в законі «Про енергозбереження» (№ 74/94-ВР від 01.07.1994), комплексній державній програмі «Енергозбереження в Україні на 2005—2020 рр.», а також в Державній науковій технічній програмі «Розробка і впровадження енергозберігаючих світлодіодних джерел світла та освітлювальних систем на їх основі». Головним напрямком політики енергозбереження в Україні має бути економія електричної енергії на освітлення, яка становить більше 30 % від усієї електроенергії. Попередньо проведений аналіз показав, що застосування світлодіодних світильників може зменшити витрати на освітлення в Україні до 15 % від сумарних витрат електричної енергії [16].

Отже бачимо, що очевидну найближчу перспективу активного переходу на напівпровідникові джерела світла з нелінійним характером електроспоживання струму не можна реалізувати без урахування електромагнітної сумісності зовнішньої мережі та джерел вторинного живлення, що активно використовуються в напівпровідникових джерелах світла [17].

1.2 Аналіз струмів в мережах з світлодіодними світильниками

Негативний вплив джерел вторинного живлення на електромережу живлення можна пояснити двома складовими:

- спотворенням форми струму мережі живлення;
- споживанням реактивної потужності.

Сучасні джерела вторинного живлення отримали назву *імпульсні джерела живлення*, оскільки вони використовують імпульсне перетворення вхідної напруги. Вони мають компактні показники, недорогі, малі втрати потужності і можуть працювати в широкому діапазоні вхідної напруги [18].

Типова схема вхідного кола імпульсного джерела живлення з мостовим випрямлячем та вхідною ємністю приведена на рис. 1.1, а на рис. 1.2 - діаграма роботи цього випрямляча.

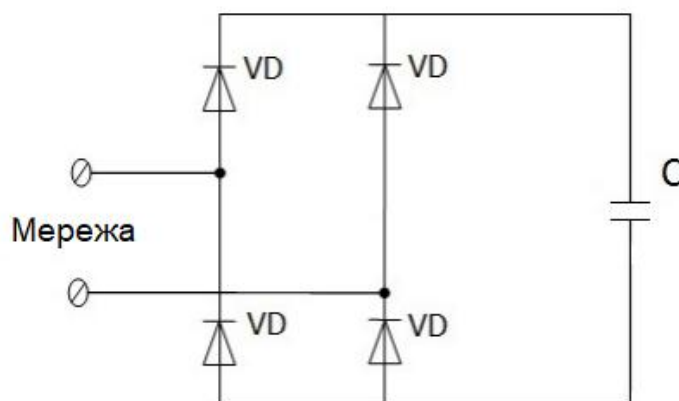


Рисунок 1.1 – Схема випрямляча із згладжуючою ємністю

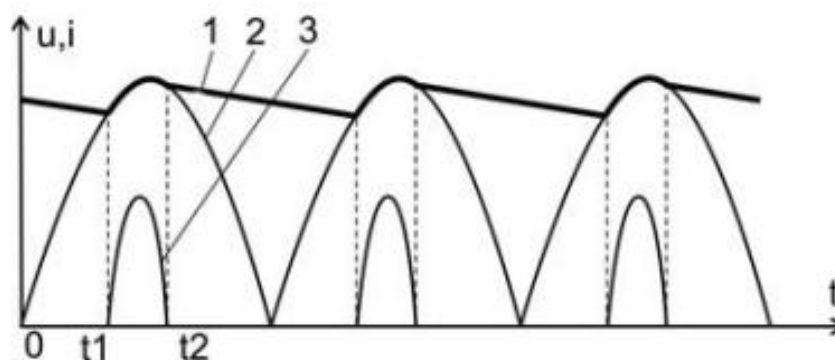


Рисунок 1.2 - Напруга і струму на випрямлячі з згладжуючою ємністю:

1 – напруга на ємності; 2 – напруга після випрямлення; 3 – струм навантаження

Поки напруга u на вході випрямляча VD1-VD4 (2) менше, ніж на фільтруючій ємності C1 (1), діоди закриті і струм навантаження i (3) не протікає. Струм i з мережі споживається в часовому проміжку $t1 - t2$, коли випрямлена напруга мережі стає більшою за напругу на конденсаторі - струм заряду ємності обмежений тільки внутрішнім опором ємності та динамічним опором вентилів.

Якщо в мережі є багато джерел з аналогічним характером споживання струму, то імпульсні струми в ній суттєво спотворюють форму напруги та викликають появу непарних гармонік. Підвищення коефіцієнта гармонік має негативний вплив на споживачів, що вимагає застосовувати спеціальні заходи для їх нейтралізації. Коефіцієнт потужності для такої схеми коливається в межах 0,5-0,7 і залежить від значення ємності конденсатора та опору навантаження.

На рис. 1.3 приведено приклад осцилограми струму споживання LED світильника з промисловим драйвером.

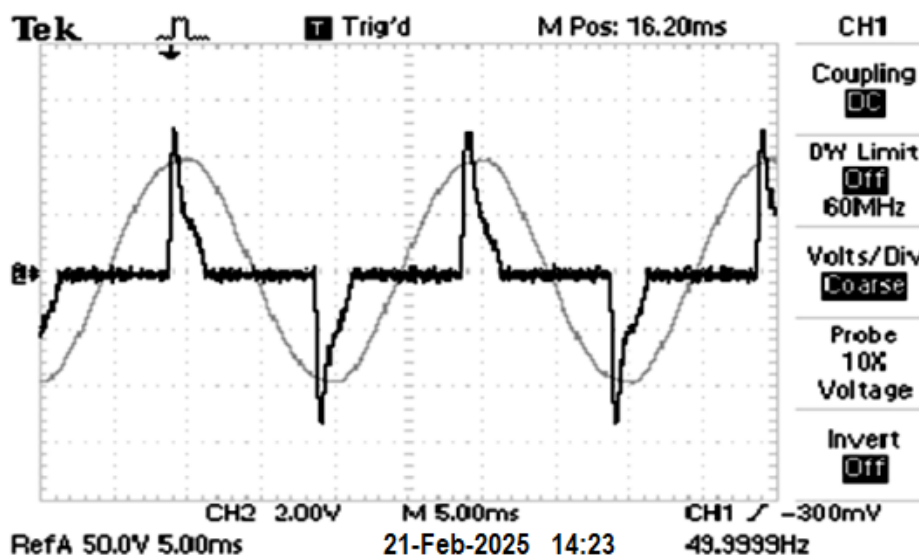


Рисунок 1.3 - Струм споживання LED-світильника

З осцилограми бачимо, що струм споживання є періодичною несинусоїдальною функцією, яку може представити гармонійним рядом Фур'є. Сукупність гармонійних складових несинусоїдальної періодичної функції називають дискретним частотним спектром, сукупність амплітуд гармонік утворює амплітудний спектр, а сукупність початкових фаз - фазовий спектр.

Згідно з державним стандартом кількісною оцінкою відхилення форми напруги від синусоїдальної є коефіцієнт несинусоїдальності, рівний відношенню діючих значень всіх вищих гармонік до діючого значення 1-ої гармонії [19]. Коефіцієнт гармонік ще називають THD (Total Harmonic Distortion – сумарне гармонічне спотворення), а характеристикою несинусоїдності форми кривої є коефіцієнт n -ї гармонійної складової.

Отже, для оцінки коефіцієнтів визначення несинусоїдності періодичних кривих потрібно знати спектральний склад несинусоїдальних струмів і напруг, а при розрахунку гармонійного складу кривих напруг і струмів краще враховувати не частоту гармоніки в герцах, а її порядок, тобто кратність по відношенню до частоти основної гармоніки.

1.3 Аналіз джерел нелінійних спотворень у системі електропостачання

Проблема погіршення якості електроенергії міських розподільчих мереж спостерігається в багатьох розвинених країнах. Зокрема, найбільший рівень

вищих гармонік спостерігається в районах, де є велика кількість побутових електронних приладів [19]. Якщо потужність напівпровідникових електроприймачів не перевищує 10-15% потужності мережі живлення, то проблем при експлуатації систем електропостачання не спостерігається. Але сучасний баланс електроспоживання освітлювального навантаження в деяких випадках досягає більше 20%, що при роботі на базі енергозберігаючих технологій освітлення може викликати перебої у роботі електрообладнання та завдавати значних економічних збитків.

Гармонічні складові струму з високим значенням коефіцієнта амплітуди генеруються однофазними навантаженнями і володіють специфічним результируючим впливом у трифазних системах. У симетричній трифазній системі синусоїдальні струми у 3-х фазах зсунуті на 120° по відношенню один до одного і сума струмів у нейтральному провіднику дорівнює нулю, тобто не виникає падіння напруги в нульовому дроті. Вищесказане не відноситься до гармонік, кратних третій, у трифазних колах вони збігаються з фазою і утворюють нульову послідовність. Непарні гармоніки, кратні 3-ій, підсумовуються в нульовому дроті і, оскільки вони становлять велику частку в діючому значенні фазних струмів, загальний струм в нульовому дроті може перевищувати фазні струми.

Гармонічні струми навантаження можуть генеруватися наступними нелінійними навантаженнями:

- а) імпульсними джерелами електроживлення;
- б) електронними баластами люмінесцентних ламп;
- в) джерелами безперебійного живлення (ДБЖ).

Значна кількість сучасних електронних пристроїв використовує імпульсні джерела електроживлення. Їх недоліком є те, що крім перетворення змінного струму мережі на випрямлений постійний струм, джерело живлення генерує імпульси струму з великою кількістю гармонік 3-го і вищого порядків та значні високочастотні складові (рис. 1.4) [20].

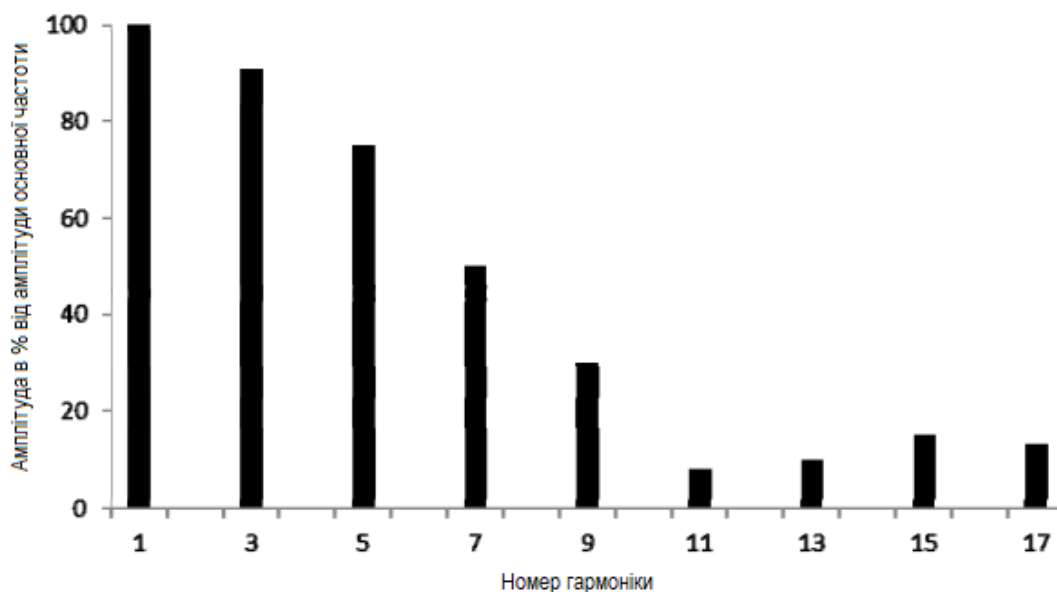


Рисунок 1.4 - Спектр гармонік стандартного імпульсного джерела живлення

Для захисту електромережі живлення від вищих гармонік на вході джерела електроживлення встановлюють звичайний фільтр, який відсікає високочастотні складові від лінії, але він не відфільтровує струми гармонік, які замикаються через джерело живлення.

На даний час популярними є електронні баласты для люмінесцентних ламп, але вони мають великий недолік - генерують гармоніки з електромережі живлення. Для потужніших пристроїв, які є досить дорогими, використовують корекцією коефіцієнта потужності зі зниженим утворенням паразитних гармонік, а пристрої малої потужності в більшості випадків не мають схеми корекції. Компактні люмінесцентні лампи в недавньому минулому розглядали-ся в якості заміни ламп розжарювання, в яких мініатюрний електронний баласт у цоколі такої лампи керував роботою багаторазово зігнутої люмінесцентної трубки діаметром 8 мм. Наприклад, компактна люмінесцентна лампа потужністю 11 Вт за світловим потоком рівна лампі розжарювання потужністю 60 Вт і може працювати біля 8000 год. Спектр гармонійних струмів компактної люмінесцентної лампи приведено на рис. 1.5.

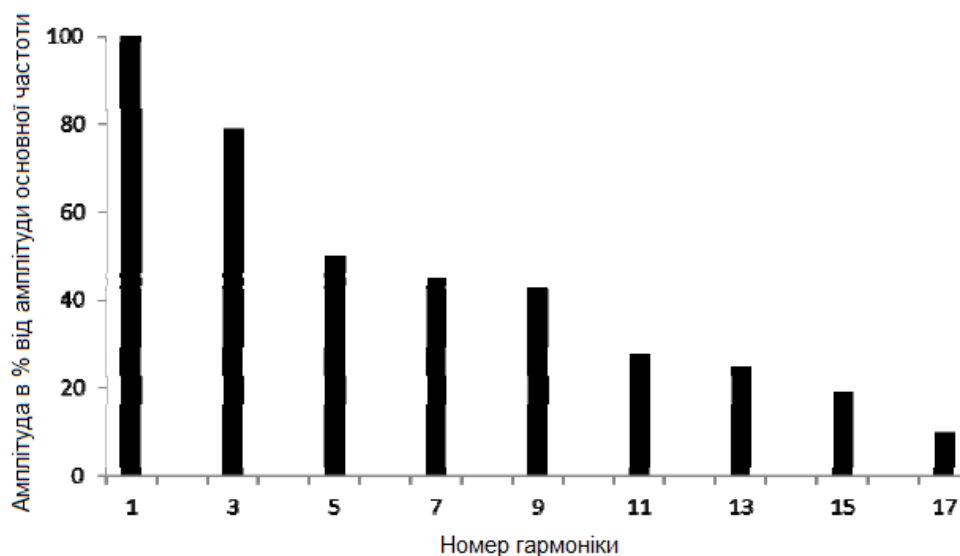


Рисунок 1.5 - Спектр гармонік компактної люмінесцентної лампи

В Україні на даний час працює державна програма по безкоштовному обміну п'яти старих лампочок розжарення на п'ять світлодіодних лампочок, зокрема уряд ввів в дію програму, згідно якої для населення з 10 січня 2023 ро-ку здійснює обмін лампочок розжарювання на світлодіодні лампочки.

Варто відмітити, що вплив на електричну мережу однофазних джерел безперебійного живлення аналогічне поведінці імпульсних джерел живлення. Активне впровадження комп'ютерів у всі сфери діяльності людини, застосування в медицині апаратури життєзабезпечення та наявність високотехнологічної промисловості зумовили зниження гармонійних складових в мережі жив-лення за рахунок використання джерел безперебійного живлення з коригуванням на вході коефіцієнта потужності.

Основним завданням коректора коефіцієнта потужності є зменшення до нуля відставання струму споживання від напруги в мережі при дотриманні синусоїдальної форми струму. Відповідно, потрібно відбирати струм від мережі не короткими інтервалами, але в загальному інтервалі роботи. Потужність від джерела повинна бути постійною навіть у випадку зміни напруги мережі, тобто при зниженні напруги електричної мережі струм навантаження повинен збільшуватися і навпаки.

Отже, бачимо, що гармонічні струми вищих порядків генерують негатив-ний вплив і на систему живлення, і на електричну мережу об'єкта.

1.4 Вплив вищих гармонік на параметри електричної мережі

Можна виділити декілька відомих типів порушень в електромережі внаслідок дії гармонік.

1. Негативні наслідки через вплив вищих гармонійних струмів (перегрівання нульових дротів та трансформаторів; перевантаження конденсаторів коригування коефіцієнта потужності; поверхневий ефект; випадкові переми-кання автоматичних вимикачів).

2. Негативні наслідки через вплив вищих гармонійних напруг (спотворення напруги; зміна показників двигунів змінного струму; шуми при переході через нуль).

Оскільки у трифазній системі напруги в кожній фазі відносно нейтральної точки зірки зміщені на кут 120° , то при рівному навантаженні кожної фази загальний струм у нейтральному дроті рівний нулю. У випадку несиметричного навантаження у нейтральному дроті буде тільки результуючий струм - різниця навантажень. Донедавна, беручи до уваги незначний струм у нейтральному проводі, використовували для нього жилу з перетином менше перерізу фазного проводу. Але, якщо струми основної частоти в нейтральному дроті взаємно компенсуються, то з гармонійними струмами цього не відбувається: амплітуди гармонік, частота яких рівна добутку внутрішньої основної частоти на непарний множник (гармоніки по рядку $3n$), складаються в нейтральному дроті, що показано на рис 1.6. У верхній частині на рисунку фазові струми зсунуті відносно один одного на кут 120° , 3-ті гармоніки всіх фазових струмів є синфазними, а частота 3-ої гармоніки втричі більша за основну частоту і зміщена відносно неї на $1/3$ періоду [21].

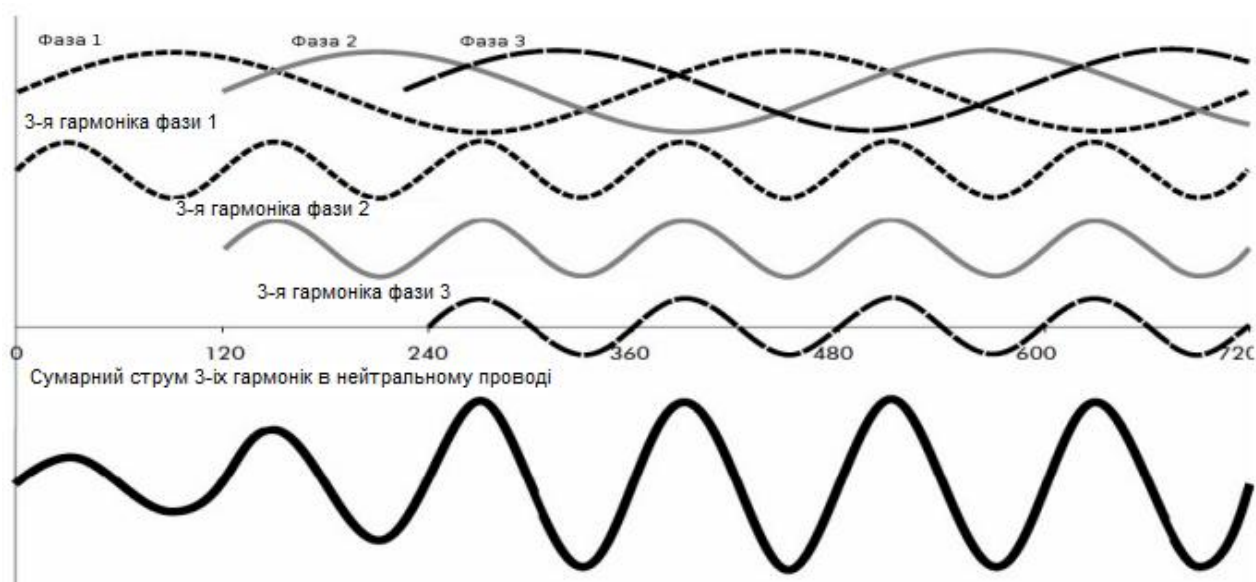


Рисунок 1.6 – Осцилограми фазних струмів та сумування струмів 3-ої гармоніки в нейтральному дроті

У верхній частині на рисунку показано сумарний струм 3-їх гармонік у нейтральному провіднику: струми третьої гармоніки кожної фази з амплітудою 70% від амплітуди основної частоти в нейтральному дроті генерують амплітуду сумарного струму 210%. Розрахунки для діючих електромереж показують, що амплітуда струму в нейтральному дроті коливатися від 150 до 210% амплітуди фазового струму [22].

Існують різні підходи до вирішення розглянутої проблеми і найпростішим рішенням для електромереж з одножильними дротами – це використати нейтральний провід у двічі більшого перерізу. У випадку багатожильних дротів рішення буде складнішим, оскільки їх параметри визначаються виробниками, виходячи з симетричного навантаження у фазах та відсутності струму у нейтральному дроті. Тобто тільки по 3-х з 4-х або 5-и жил проходить струм і викликає нагрівання. Оскільки струмонесуча здатність кабелю обмежується тільки розсіюваним теплом при максимальному рівні температурі, то бачимо, що кабелі, в яких протікають струми гармонік порядку $3n$, не відповідають нормативам. На рис. 1.7 приведено графік для визначення коефіцієнта зменшення величини струмонесучої здатності кабелю відповідно до наявності струмів $3n$ -гармонік згідно рекомендацій стандарту IEC 60364-5-52:2009 та за описаним вище тепловим методом [23].

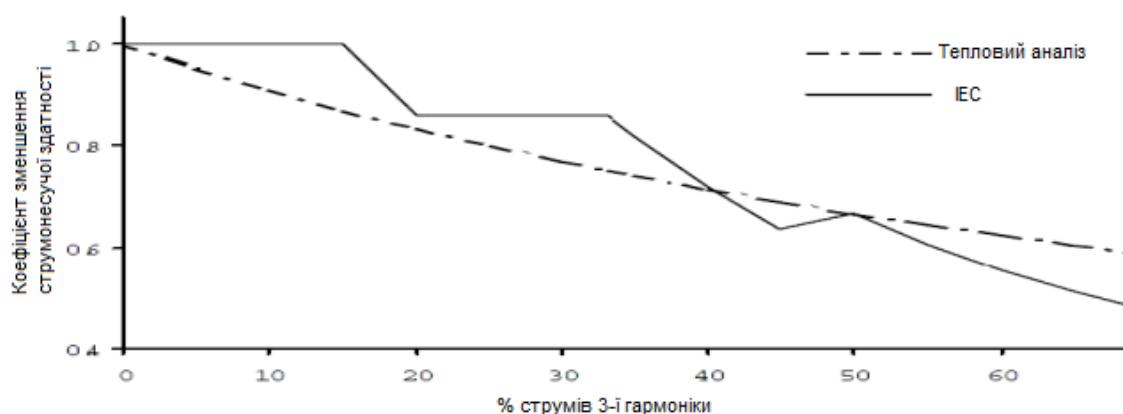


Рисунок 1.7 - Коефіцієнт зменшення величини струмонесучої здатності кабелю

Гармоніки також мають подвійний вплив на трансформатори, зокрема пропорційно квадрату номера гармоніки зростають втрати в магнітопроводі внаслідок вихрових струмів. Наприклад, при повному навантаженні трансформатора цифровим офісним та обчислювальним обладнанням втрати будуть вищими, ніж для аналогічного лінійного навантаження і будемо мати високу робочу температуру та зменшення терміну його служби. Другий вплив пов'язаний із струмами непарних гармонік порядку кратного 3 – в цьому випадку синфазні струми гармонік $3n$ присутні по обмотці (з'єднання трикутником) і не попадають в електромережу, а гармоніки з фазовим зсувом проходять через трансформатор. Для компенсації реактивної складової потужності споживання цих параметрів використовують конденсатори для компенсації фазового кута струму навантаження, оскільки вони мають менший опір при вищих струмах гармонік, але може виникати перевантаження конденсаторів (навіть до аварійної ситуації).

На рис. 1.8 приведено еквівалентну схему нелінійного навантаження з конденсатором корекції коефіцієнта потужності, опір якого зменшується із збільшенням, а опір джерела зростає із збільшенням частоти. Тому через конденсатор може протікати великий гармонійний струм, який може вивести його з ладу. Якщо конденсатор і індуктивність електромережі на частоті однієї з гармонік входять в резонанс, то утворюються дуже великі струми, що можуть викликати руйнування конденсаторної системи.



Рисунок 1.8 – Схема нелінійного навантаження з конденсатором корекції коефіцієнта потужності

Для уникнення резонансу в коло послідовно з конденсатором вводять індуктивність з такими параметрами, щоб *конденсатор-індуктивність* мав мінімальну індуктивну величину на нижчій важливій гармоніці. Це дозволяє обмежує струм гармоніки через конденсатор.

Труднощі можуть викликати фізичний розмір індуктивності, особливо якщо в мережі є гармоніки нижчих порядків.

Негативний вплив на мережу мають додаткові явища, що виникають внаслідок гармонійних напруг. Оскільки електромережа має опір джерела, то гармонійні струми навантаження спотворюють сигнал напруги через вплив гармонійних напруг (плоска вершина синусоїди). Опір електромережі має дві складові: опір внутрішньої проводки від точки загального приєднання і опір джерела в точці загального приєднання - опір локального трансформатора живлення (рис. 1.9).

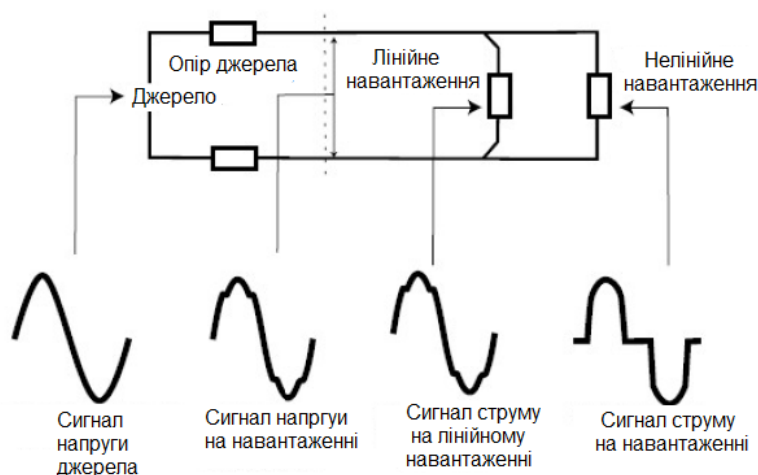


Рисунок 1.9 - Спотворення сигналу напруги внаслідок нелінійного характеру навантаження

Спотворений струм електромережі внаслідок нелінійного навантаження викликає спотворене падіння напруги на опорі електропроводки. Тоді напруга з спотвореною формою появляється в інших навантаженнях того самого кола, що викликає утворення струмів вищих гармонік, які протікають через них навіть при лінійному навантаженні (рис. 1.10).

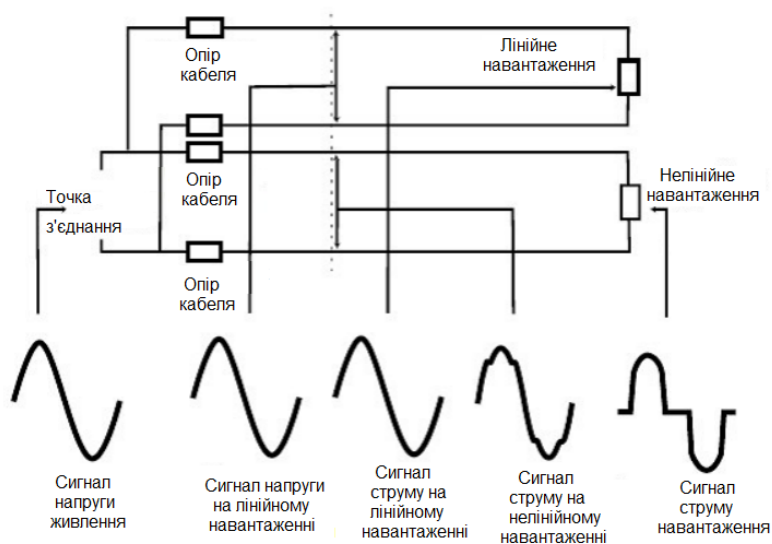


Рисунок 1.10 – Схема поділу лінійного і нелінійного навантаження

Гармонічні спотворення напруги збільшують втрати в електричних двигунах та трансформаторах на вихрові струми, додаткові втрати виникають в результаті появи магнітних полів у статорі, а струми високої частоти роторі в ще більше збільшують втрати.

Якщо гармонічний струм створює джерело живлення, він викликає зростання гармонійного падіння напруги пропорційно опору джерела у точці загального з'єднання (ТОС). Оскільки ланцюг джерела живлення у випадку має індуктивний характер, то із збільшенням частоти зростає і опір джерела. Напруга в ТГС спотворюється гармонійними струмами, що також створюються іншими споживачами і перевантаженими трансформаторами.

1.5 Аналіз способів зменшення гармонійних складових напруги та струму

Для зменшення числа гармонік у електромережі їх можна об'єднати у такі групи: пасивні фільтри, трансформатори та активні пристрої. Кожна з цих груп володіє своїми перевагами та недоліками і, відповідно, немає найкращого рішення, а для вибору оптимального варіанту необхідно здійснити аналіз електромережі та типу навантаження [24].

Пасивні фільтри створюють для гармонійних струмів кола з низьким повним опором, тоді вони протікають через фільтр, а не через джерело живлення (рис. 1.11). При потребі фільтр можна підібрати для однієї гармоніки або широкого спектру струмів гармонік.

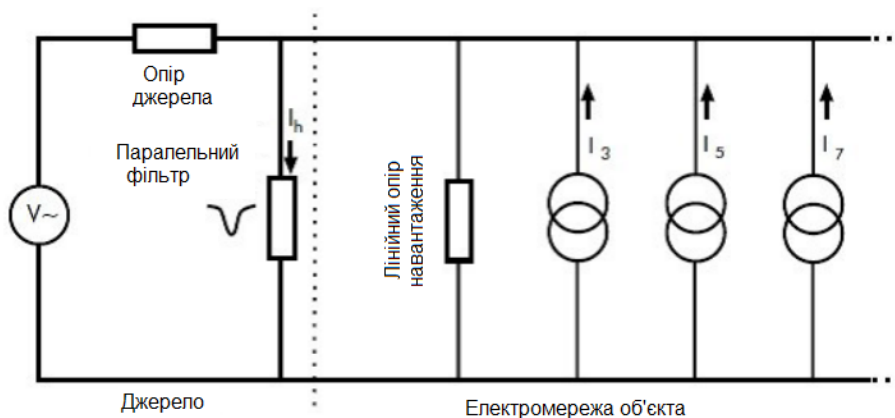


Рисунок 1.11 – Схема пасивного паралельного смугового пропускаячого фільтра

Тому потрібно розробити складніший фільтр для збільшення послідовно-го опору на частоті гармоніки та зменшення частки струму гармонік через джерело живлення (рис. 1.12).

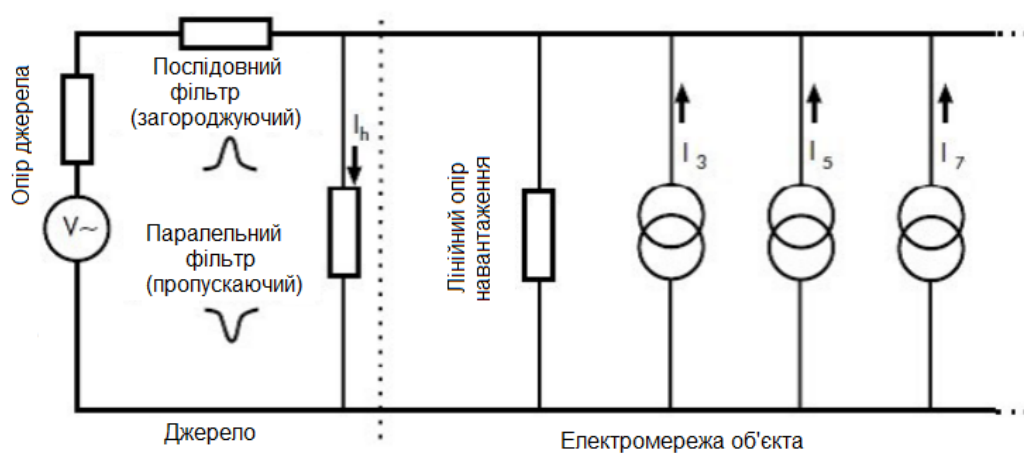


Рисунок 1.12 – Схема пасивного паралельного та послідовного фільтрів

Зазвичай використовуються звичайні послідовні загороджуючі фільтри в фазовому або нейтральному проводі, який в більшості випадків здійснює відсікання гармонійних струмів, але не керує їх відведенням. Тому на послідовних загороджуючих фільтрах спостерігається значне падіння напруги на частоті гармонійного струму, яка через джерело живлення прикладається до навантаження. В цьому випадку напруга джерела сильно спотворюється, виходить за розраховані рамки норми і гарантії на обладнання. Різне обладнання має різну чутливість до такого спотворення, тому послідовні загороджуючі фільтри не рекомендують у якості універсального засобу зменшення гармонік.

Ізолюючі трансформатори. Вище вже згадували, що струми гармонік порядку $3n$ проходять обмоткою трансформатора, що з'єднана за схемою «трикутник». Ця обставина викликає додаткові проблеми для виробників трансформаторів, оскільки необхідно враховувати додаткове навантаження, але дозволяє розробникам систем ізолювати струми гармонік $3n$ від джерела живлення. Подібний ефект можна отримати у випадку використання трансформатора з обмоткою, з'єднаною зигзагом, коли один кінець обмотки кожної фази трифазного трансформатора приєднаний до нейтралі, а обмотка кожної фази складається з двох частин, у кожній з яких індукуються зміщені фазою напруги.

Крім пасивної фільтрації гармонік струму та напруги в мережах з нелінійним режимом споживання також використовують частото-залежні ланки з адаптивною амплітудно-частотною характеристикою - активні фільтри. Алгоритм

роботи такого фільтра базується на тому, що він генерує струми або напруги гармонік у протифазі з ними, компенсуючи споживані струми [25].

Варто відмітити, що проблема електромагнітної сумісності мережі живлення з джерелами вторинного живлення світлодіодного освітлювального навантаження та активна фільтрація вищих гармонік не є актуальною, оскільки характер навантаження не змінюється за складом, а частотний спектр гармонік є постійним навіть при зміні потужності приймача. Тому основні техніко-економічні вимоги до фільтрів досліджуваних мереж мають бути наступними:

- висока стабільність робочої характеристики при використанні стандартних ланок;
- простіша топологія при забезпеченні стабільності робочих параметрів та зменшення вартості.

1.6 Висновки до розділу 1

1. Використання новітніх джерел світла передбачає зниження витрат на освітлення та суттєву економію енергетичних ресурсів, але використання електроприймачів з нелінійними характеристиками значно спотворює напругу живлення.

2. Спостерігається значне зростання кількості електроприймачів з нелінійними вольтамперними характеристиками, які мають джерела безперебійного живлення, що вимагає шукати ефективні схемні рішення фільтрокомпенсуючих пристроїв для забезпечення заданих показників якості електричної енергії в їх системах електропостачання.

3. При застосуванні фільтрокомпенсуючих пристроїв у системах електропостачання електроприймачів з нелінійними вольтамперними характеристиками потрібно врахувати вплив на перехідні процеси при роботі мереж з нелінійним навантаженням та на рівень їх надійності.

2 РОЗРАХУНКОВО-ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ

2.1 Дослідження складу гармонік в мережах з нелінійними приймачами

В цьому розділі виконано аналіз результатів обстежень деяких об'єктів різного призначення і на основі отриманих результатів визначено базові закономірності для електроприймачів з нелінійним споживанням [26]. Вимірювання основних показників якості електроенергії, а також гармонійних складових струму та напруги проводились за допомогою аналізатора якості параметрів мережі **e.meter.pro.96.m.lcd** (AC 230V, 5A, 0-450V, RS-485, виробник фірма E.NEXT, Україна). Зовнішній вигляд приладу приведено на рис. 2.1.



Рисунок 2.1 - Аналізатор якості електроенергії e.meter.pro.96.m.lcd

Аналізатор параметрів якості електроенергії **e.meter.pro.96.m.lcd** дозволяє вимірювати прямі показники якості електричної енергії за методикою ДСТУ EN 50160:2014 [27]. Електрична схема підключення подібна до схеми підключення звичайного трифазного лічильника. Первинними датчиками приладу є трансформатори струму із класом точності 0,2 та входні дільники напруги. Прилад підключається за схемою чотирипровідного з'єднання зіркою з використанням трьох трансформаторів струму (рис. 2.2). У процесі роботи **e.meter.pro.96.m.lcd** створює електронний журнал, в якому фіксуються всі події, пов'язані з перевищенням будь-якого показника його гранично допустимого значення.

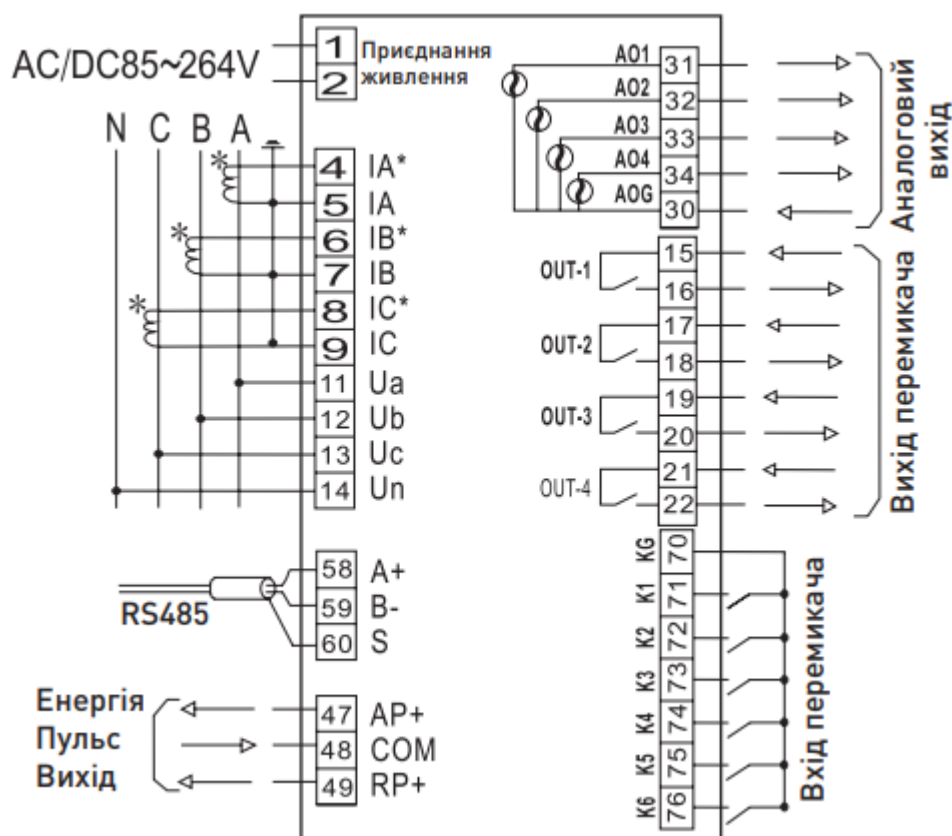


Рисунок 2.1 - Схема включення аналізатора якості електроенергії

У процесі роботи **e.meter.pro.96.m.lcd** створює електронний журнал, у якому фіксуються всі події, пов'язані з перевищенням будь-якого показника його гранично допустимого значення за ДСТУ EN 50160:2014. Приладом має вмонтовану програму для моніторингу показників якості електроенергії та параметрів мережі в режимі реального часу, збору даних та формування звітів. Обчислення значень коефіцієнтів гармонік здійснюється відповідно до ДСТУ EN 50160:2014:

$$K_{I(n)} = \frac{I_{(n)}}{I_1} \cdot 100, \quad K_{U(n)} = \frac{U_{(n)}}{U_1} \cdot 100, \quad (2.1)$$

де $I_{(n)}$, $U_{(n)}$ - діючі значення n -ої гармонійної складової струму та напруги;

I_1 , U_1 - діючі значення струму і напруги основної частоти.

На даний час нема нормативної бази для регулювання нормальних та граничних допустимих значень для вищих гармонік струму та коефіцієнта спотворення синусоїдальності по струму. Нормування цих величин здійснюється самим споживачем. Стандарт МЕК 61000-4-30:2008 встановлює для кожного вимірюваного

показника якості електроенергії три класи характеристик процесу вимірювання («А», «S» і «В») і для кожного з них визначено методи вимірювання та відповідні вимоги до характеристик засобу вимірювання [28].

Клас «А» застосовують при проведенні точних вимірів при перевірці відповідності стандартам щодо норми якості електроенергії, під час умов договорів, що передбачають можливість вирішення спірних питань шляхом вимірів і ін. Будь-які вимірювання показника якості енергії, проведені 2-а різними засобами вимірювань, що відповідають вимогам класу «А», повинні при вимірі тих самих сигналів забезпечувати отримання відтворюваних результатів із встановленою для цього показника невизначеністю.

Клас «S» застосовують при проведенні обстежень та оцінки якості енергії з використанням статистичних методів, зокрема, при обмеженій номенклатурі показників. Оскільки інтервали часу вимірювань показників якості енергії для класів «S» і «А» однакові, то вимоги до характеристик процесу вимірювання класу «S» є зниженими.

Клас «В» встановлений для уникнення визнання в системі СІ багатьох існуючих типів застарілими і не рекомендується для новостворених СІ.

Для класів «А» і «S» значення частоти вимірюють на кожному інтервалі часу 10 с і оскільки частота змінного струму не завжди рівна точно 50 Гц в межах інтервалу 10 с, то число періодів може бути не цілим числом. Вимірювана основна частота рівна відношенню числа цілих періодів в 10-секундному інтервалі часу до загальної тривалості цілих періодів.

Виміри середньоквадратичного значення напруги виконують на основному інтервалі часу виміру (10 періодів для систем електропостачання частотою 50 Гц) і ці інтервали часу повинні йти один за одним (класи «А» та «S»). Даний метод застосовується тільки для квазістаціонарних електричних сигналів і не використовується при виявленні та вимірюванні параметрів таких явищ погіршення якості енергії, як провали напруги, перенапруги та переривання напруги, а також перехідні процеси. Середньоквадратичне значення напруги включає гармоніки, інтегрармоніки, інформаційні сигнали в електричних мережах і ін. Вимірювання провалів напруги та перенапруг здійснюють на основі вимірювань у кожному

каналі середньоквадратичних значень напруги, що оновлюються для кожного напівперіоду. Тривалість періоду визначається значенням частоти вимірюваного сигналу.

Порогове значення провалу напруги встановлюють у відсотках від значення вхідної напруги або значення ковзної опорної напруги порівняння. При виявленні провалів напруги вважається, що:

- в однофазних системах електропостачання провал напруги починається, коли значення падає нижче граничного значення провалу напруги, і закінчується, коли значення дорівнює або перевищує граничне значення провалу напруги плюс;
- у трифазних системах електропостачання провал напруги починається, коли значення в одному або більше числі каналів падає нижче порогового значення провалу напруги, і закінчується, коли значення дорівнює або перевищує граничне значення провалу напруги плюс у всіх каналах, в яких проводять вимірювання.

Значення залишкової напруги є корисним для споживачів електричної енергії і може бути кращим, ніж глибина провалу, оскільки дозволяє оцінити близькість напруги до нуля. Водночас глибина провалу напруги є корисною для постачальників електричної енергії, зокрема, високовольтних систем електропостачання або коли використовується ковзна опорна напруга порівняння. Під час провалу напруги може виникати фазовий зсув, фіксується дата і час переходу порогового значення [28].

2.2 Проведення досліджень якості електричної енергії

Для оцінки характеру електроспоживання та якості електроенергії проводилися вимірювання на великих об'єктах, основним нелінійним навантаженням яких є однофазні джерела живлення, а також на об'єктах з електроосвітленням на основі світлодіодних світильників. Об'єктами дослідження були:

- супермаркет «АТБ» (вул. Микулинецька, 116/1, Тернопіль): $P_{вст} = 100$ кВт;
- навчальний корпус №7 ТНТУ ім. І. Пулюя: $P_{вст} = 100$ кВт;
- система освітлення залізничного моста Тернопільської залізниці (вулиця Руська, м. Тернопіль): $P_{вст} = 7$ кВт.

2.2.1 Дослідження системи електропостачання супермаркету

Основним навантаженням є холодильні установки, освітлення та касове обладнання. Графік роботи супермаркету - 24 години на добу, вночі працює також і аварійне освітлення. Залежності гармонік струму і напруги від часу приведені на рис. 2.3 і 2.4. На вказаних та подібних рисунках на правій осі ординат приведені абсолютні значення вимірюваних величин, на лівій осі ординат приведені відносні значення вищих гармонік до основної гармоніки.

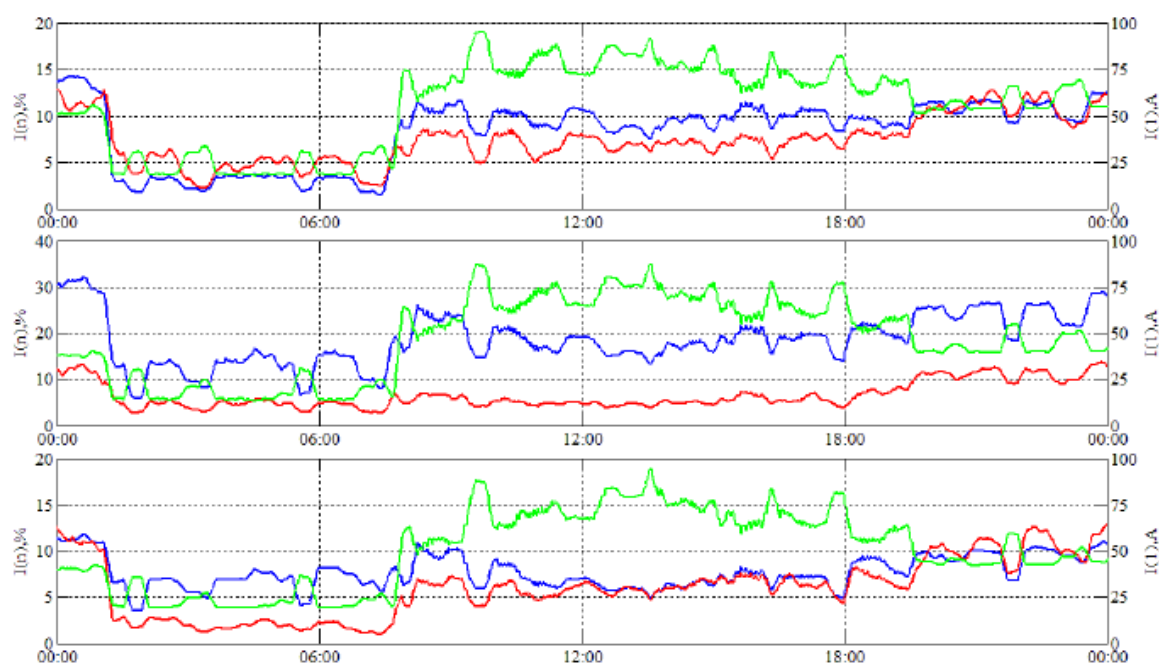


Рисунок 2.3 - Гармоніки струму за фазами: — 1-а гармоніка струму (A);
— 3-я гармоніка струму (%); — 11-а гармоніка струму (%)

Результати вимірювань показали наявність високого рівня 3 та 11 гармонік струму в мережі (рис. 2.3) і корелюючий характер кривих 3 і 11 гармонік говорить про їх єдине джерело, що явно простежується на цьому рисунку. У нічний час рівні гармонік значно менші, ніж у робочий час. Враховуючи особливості та специфіку досліджуваного навантаження, можна зробити висновок про те, що джерелами 3 та 11 гармонік є лампи освітлення.

Проаналізуємо 3 та 11 гармоніки напруги (рис. 2.4), на яких видно, що у робочий час відхилення напруги на вводах досягає максимального значення і відсоток 11 гармоніки напруги трохи більший за нічний час. Звідси можна зробити висновок, що джерелом 11 гармоніки напруги (і 11 гармоніки струму) є лампи денного світла (система освітлення). Крива 3 гармоніки напруги має більш

постійний характер, тобто майже не залежить від часу доби. Можна вважати, що джерелом напруги 3 гармоніки є система вентиляції (опалення). О 2 – 4 годині ночі спостерігаються невеликі сплески внаслідок збільшення навантаження системи вентиляції (опалення), оскільки у цей час середня температура повітря на вулиці (у приміщенні) є мінімальною. Також ця гармоніка може надходити із зовнішньої електричної мережі.

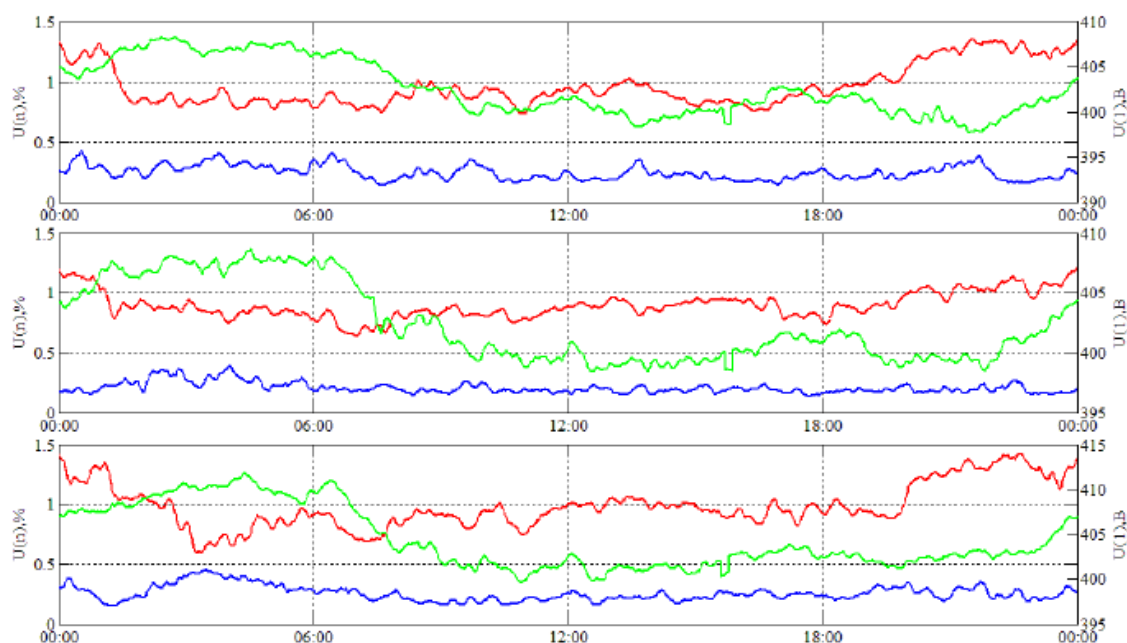


Рисунок 2.4 Гармоніки напруги: — 1 гармоніка напруги (В);
— 3 гармоніка напруги (%); — 11 гармоніка напруги (%)

Крім 3-ї та 11-ї гармонік у досліджуваній електромережі наявні гармоніки інших порядків. На рис. 2.5 приведено графік зміни коефіцієнта синусоїдальності кривої струму, де значення гармонік струму, відмінних від 3-ї та 11-ї незначні, тому крива спотворення синусоїдальності по струму корелює з кривими на рис. 2.3. З цього графіка видно, що коефіцієнт спотворення є значним і становить 40%.

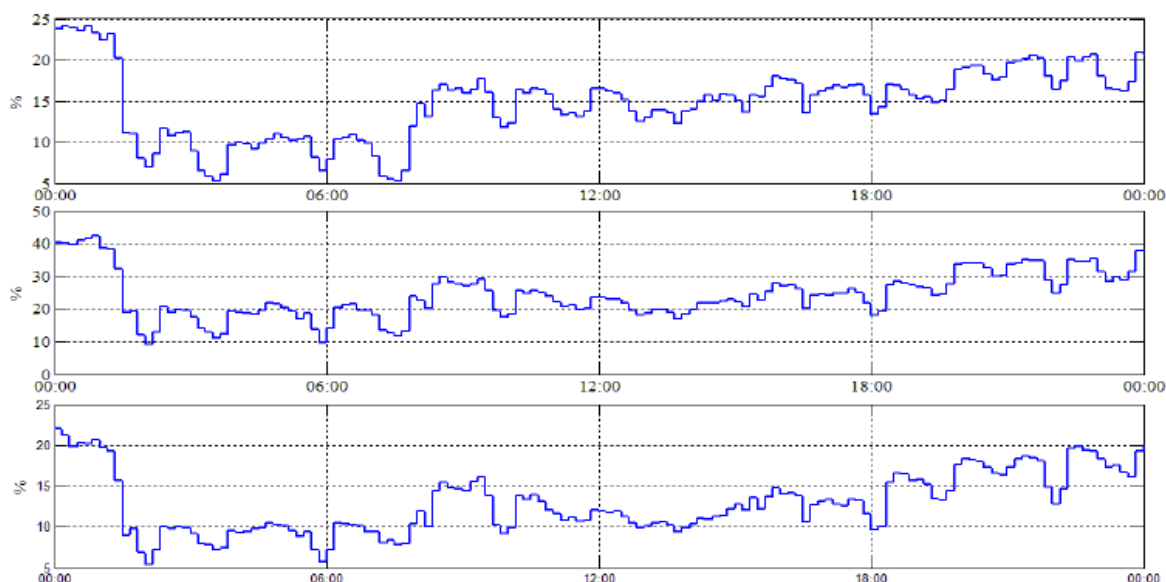


Рисунок 2.5 – Коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої струму

В таблиці 2.1 приведено значення коефіцієнта спотворення синусоїдальності за напругою та струмом за добу.

Таблиця 2.1 - Коефіцієнт спотворення синусоїдальності за напругою та струмом протягом доби

Вимірювана величина	Результат вимірювання		
	Фаза А	Фаза В	Фаза С
$K_U, \%$	1,8	1,7	1,7
$K_{U \min}, \%$	1,4	1,4	1,3
$K_{U \max}, \%$	2,2	2,1	2,2
$K_I, \%$	14,7	24,1	13,2
$K_{I \min}, \%$	4,2	7,6	5,4
$K_{I \max}, \%$	25,0	43,2	22,4

На рис. 2.6 приведено спектральну складову струмів і напруг досліджуваної електромережі супермаркету в робочий та нічний час, а в табл. 2.2 і 2.3 - відносно мінімальне, середнє та максимальне значення гармонік струму та напруги в мережі за добу.

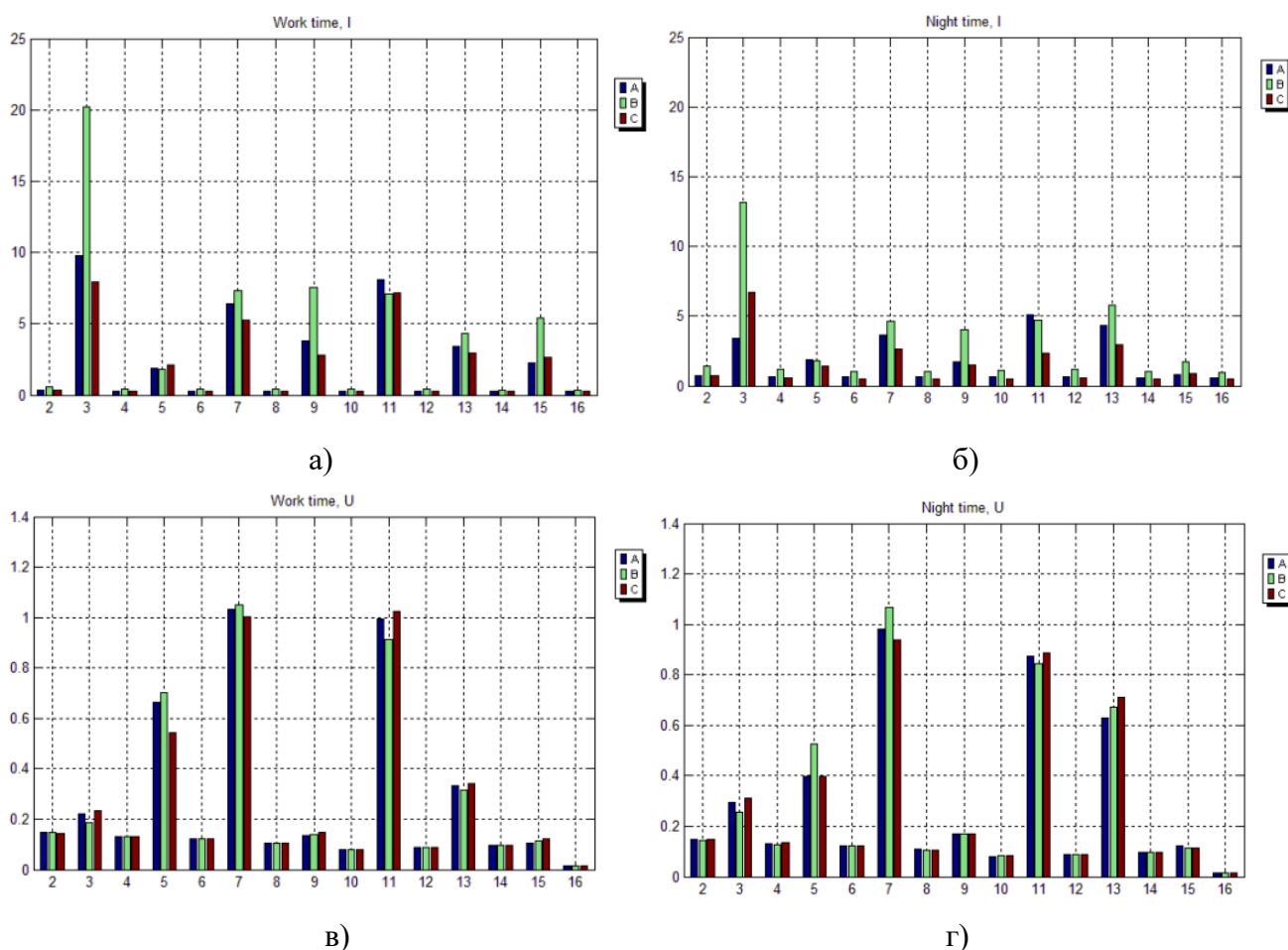


Рисунок 2.6 - Спектральна складова:

а), б) – струми в робочий і нічний час; в), г) – напруги в робочий і нічний час

Таблиця 2.2 - Величини гармонік струму в мережі протягом доби

n	Струми								
	Фаза А			Фаза В			Фаза С		
	Міні-мальне	Середнє	Макси-мальне	Міні-мальне	Середнє	Макси-мальне	Міні-мальне	Середнє	Макси-мальне
2	0,21	0,43	0,95	0,31	0,77	1,83	0,22	0,47	0,88
3	1,44	8,23	14,29	5,85	18,58	32,12	3,52	7,66	11,81
4	0,20	0,38	0,84	0,26	0,62	1,52	0,18	0,37	0,73
5	0,86	1,90	3,29	0,59	1,81	4,24	0,37	1,91	3,64
6	0,18	0,37	0,75	0,26	0,57	1,36	0,17	0,32	0,63
7	1,82	5,80	10,14	2,50	6,80	12,92	1,62	4,62	7,37
8	0,19	0,37	0,75	0,28	0,59	1,32	0,16	0,32	0,60
9	0,62	3,33	6,28	1,88	6,71	11,41	0,83	2,51	4,73
10	0,18	0,36	0,76	0,27	0,59	1,34	0,16	0,32	0,64
11	2,22	7,37	12,97	2,63	6,50	14,71	1,00	5,97	12,67
12	0,17	0,36	0,80	0,27	0,63	1,52	0,16	0,33	0,65
13	1,09	3,74	10,01	0,71	4,79	15,98	0,57	2,96	9,00

Таблиця 2.3 - Величини гармонік струму в мережі протягом доби

n	Напруги								
	Фаза А			Фаза В			Фаза С		
	Міні-мальне	Середнє	Макси-мальне	Міні-мальне	Середнє	Макси-мальне	Міні-мальне	Середнє	Макси-мальне
2	0,14	0,15	0,16	0,13	0,15	0,15	0,13	0,15	0,16
3	0,14	0,24	0,43	0,13	0,20	0,39	0,15	0,26	0,46
4	0,12	0,13	0,14	0,12	0,13	0,14	0,12	0,13	0,14
5	0,15	0,59	1,02	0,33	0,66	1,11	0,18	0,50	0,84
6	0,12	0,12	0,13	0,12	0,12	0,13	0,11	0,12	0,13
7	0,66	1,02	1,37	0,71	1,06	1,41	0,63	0,99	1,34
8	0,10	0,11	0,13	0,09	0,10	0,12	0,08	0,11	0,12
9	0,08	0,14	0,28	0,08	0,15	0,26	0,09	0,16	0,33
10	0,06	0,08	0,10	0,05	0,08	0,10	0,06	0,08	0,10
11	0,74	0,96	1,40	0,63	0,90	1,22	0,59	0,99	1,42
12	0,08	0,09	0,10	0,07	0,09	0,10	0,06	0,09	0,11
13	0,14	0,41	0,81	0,11	0,41	0,87	0,16	0,44	0,82

Аналіз табл. 2.2 і 2.3 показує, що відносні значення гармонік струму значно перевищують значення гармонік напруги.

2.2.2 Дослідження системи електропостачання навчального корпусу №7

Основне навантаження навчального корпусу №7 Тернопільського національного технічного університету ім. І. Пулюя становлять однофазні лабораторні установки, система освітлення, комп'ютерне та офісне обладнання. Навчальний процес організовано в одну зміну, тому основне споживання електроенергії відбувається з 8 до 18 години. Збільшення струму 1-ої гармоніки з 19 години до 21 години пояснюється роботою технічного персоналу пов'язаної з доглядом за корпусом після робочого дня.

При аналізі спектрального складу гармонік струму (табл. 2.4) можна бачити, що 3 гармоніка має значення, рівне за величиною з основною гармонікою, а 5, 7 та 9 гармоніки досягають 40% її значень [29]. Домінуючими є гармоніки 3, 5 та 7 порядків, як у робочий, так і в нічний час, що підтверджується осцилограмою, приведеною на рис. 2.7.

Таблиця 2.4 - Відносні значення гармонік струму протягом доби

n	Струми								
	Фаза А			Фаза В			Фаза С		
	Міні-мальне	Середнє	Макси-мальне	Міні-мальне	Середнє	Макси-мальне	Міні-мальне	Середнє	Макси-мальне
2	0,00	1,29	23,91	0,00	2,19	18,89	0,34	9,08	0,22
3	0,00	21,51	54,37	0,00	54,48	99,00	1,70	35,68	1,32
4	0,00	1,14	8,34	0,00	1,72	8,41	9,43	57,05	6,29
5	0,00	15,49	39,24	0,00	21,89	37,30	0,34	9,08	0,22
6	0,00	0,94	5,46	0,00	1,43	6,57	1,70	35,68	1,32
7	0,00	4,98	15,22	0,00	5,37	14,76	9,43	57,05	6,29
8	0,00	0,93	5,25	0,00	1,37	6,55	0,34	9,08	0,22
9	0,00	4,43	16,27	0,00	8,58	19,48	1,70	35,68	1,32
10	0,00	0,92	5,30	0,00	1,39	5,90	9,43	57,05	6,29
11	0,00	4,66	15,72	0,00	5,11	16,89	0,34	9,08	0,22
12	0,00	0,98	4,72	0,00	1,54	8,26	1,70	35,68	1,32

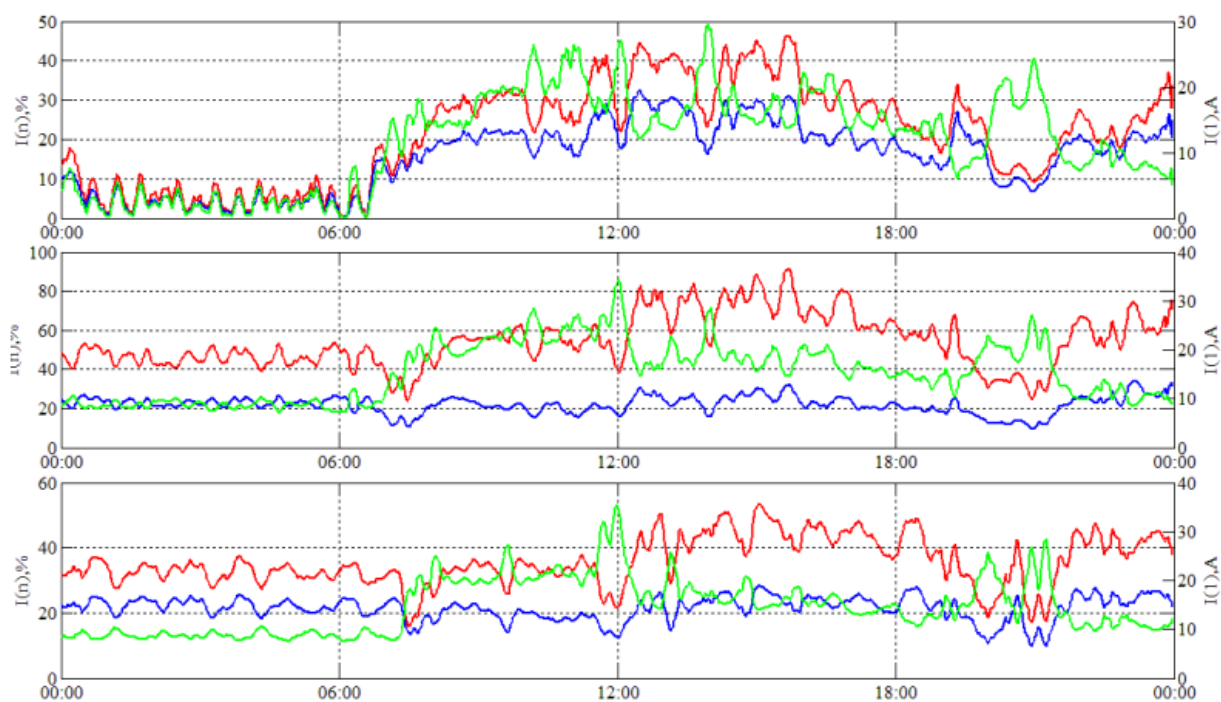


Рисунок 2.7 - Гармоніки струму за фазами: — 1-а гармоніка струму (А);
— 5-а гармоніка струму (%); — 3-я гармоніка струму (%)

Відносні величини мінімальних, середніх і максимальних значень гармонік напруги мережі живлення протягом доби приведені в табл. 2.5. Корелюючий характер зміни 3 і 5 гармонік свідчить про їх спільне джерело, що показано на рис. 2.8.

Таблиця 2.5 - Відносні значення гармонік напруги протягом доби

Напруга									
n	Фаза А			Фаза В			Фаза С		
	Міні-мальне	Середнє	Макси-мальне	Міні-мальне	Середнє	Макси-мальне	Міні-мальне	Середнє	Макси-мальне
2	0,00	0,15	0,64	0,00	0,15	1,17	0,00	0,15	1,24
3	0,00	0,31	3,71	0,00	0,27	2,78	0,10	0,30	1,68
4	0,00	0,13	0,55	0,00	0,13	1,29	0,00	0,13	1,33
5	0,48	1,20	3,75	0,71	1,27	2,42	0,27	1,27	3,23
6	0,00	0,12	0,35	0,00	0,12	0,48	0,00	0,12	0,66
7	0,11	0,47	2,30	0,00	0,49	1,66	0,10	0,51	2,11
8	0,00	0,11	0,22	0,00	0,11	0,52	0,00	0,11	0,96
9	0,00	0,22	1,28	0,00	0,20	1,28	0,00	0,20	1,46
10	0,00	0,10	0,24	0,00	0,09	0,49	0,00	0,09	0,90
11	0,22	1,05	2,49	0,56	1,02	2,30	0,30	0,86	2,37
12	0,00	0,09	0,25	0,00	0,09	0,36	0,00	0,09	0,96
13	0,00	0,34	2,05	0,00	0,33	1,29	0,00	0,43	1,79
14	0,00	0,10	0,39	0,00	0,09	0,33	0,00	0,09	1,14
15	0,00	0,24	2,59	0,00	0,20	1,35	0,00	0,19	1,90
16	0,00	0,03	0,30	0,00	0,02	0,18	0,00	0,03	0,90

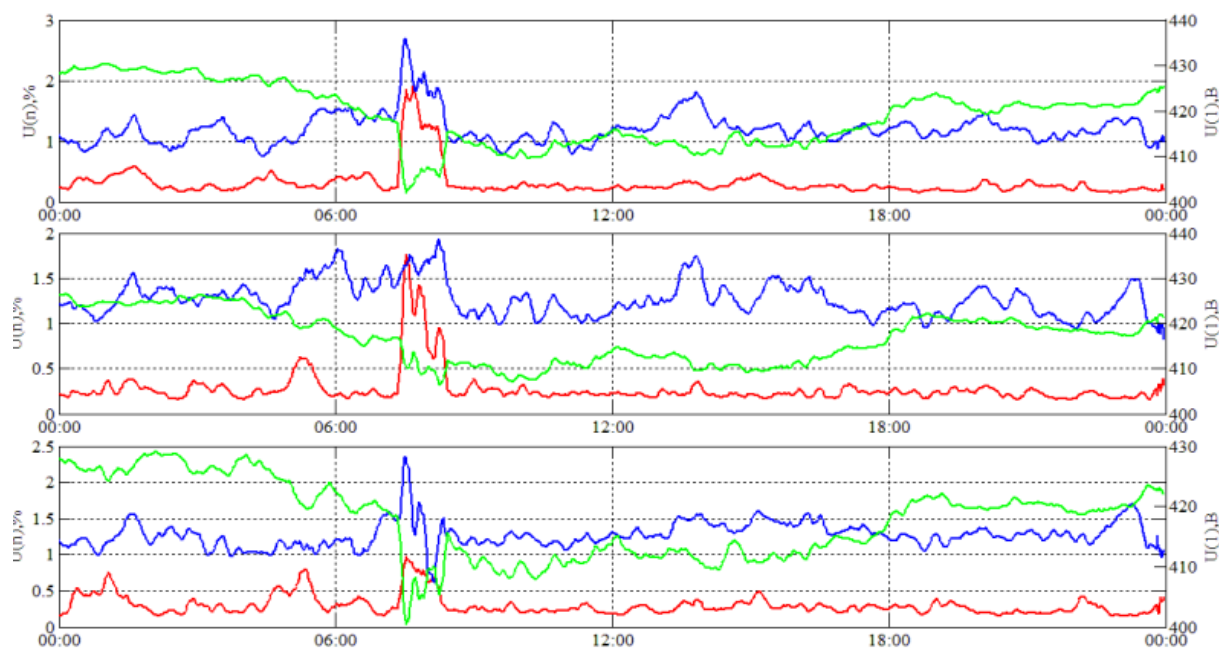


Рисунок 2.7 - Гармоніки напруги: — 1-а гармоніка напруги (В);
— 3-я гармоніка (%); — 5-а гармоніка (%)

Відносні значення гармонік напруги протягом доби, які наведені у табл. 2.5, демонструють збільшення гармонік у період з 7 до 8 години ранку, що викликано

включенням додаткового енергетичного обладнання для забезпечення робочої температури в господарських приміщеннях корпусу.

Графік зміни коефіцієнта синусоїдальності кривої струму приведено на рисунку 2.8. Значення гармонік струму, що відрізняються від 3 і 5 несуттєві, тому крива спотворення синусоїдальності по струму корелює з кривими на рис. 2.7. Бачимо, що значення коефіцієнта спотворення досягає 100%, а числові значення, наведені в табл. 2.6, відображають точніший результат, зокрема 98,9% у фазі В.

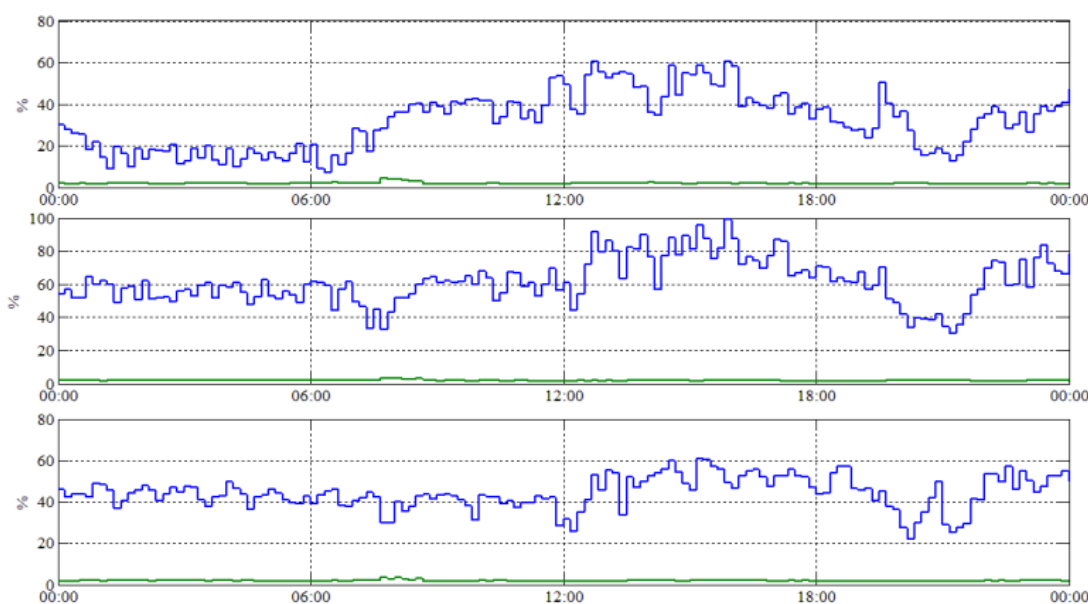


Рисунок 2.8 - Коефіцієнт спотворення синусоїдальності:
— кривої напруги (%); — кривої струму (%)

Таблиця 2.5 - Коефіцієнт спотворення синусоїдальності за напругою та струмом протягом доби

Вимірювана величина	Результат вимірювання		
	Фаза А	Фаза В	Фаза С
$K_U, \%$	1.94	1.93	1.89
$K_{U_{\max}}, \%$	4.50	3.30	3.60
$K_I, \%$	31.76	61.59	44.26
$K_{I_{\max}}, \%$	60.60	98.90	61.00

Коефіцієнт спотворення синусоїдальності за струмом показує більший негативний вплив гармонік струму, ніж гармоніки напруги (табл. 2. 5).

2.2.3 Дослідження системи електропостачання освітлення вулиці

Для освітлення залізничного моста Тернопільської залізниці по вул. Руська використовуються світлодіодні світильники сумарною потужністю 7 кВА, що включаються під напругу автоматично при настанні темного часу доби. Період вимірювання становив 3 доби.

Відповідно до графіка роботи включення світильників здійснюється після 19:00 год та відключення після 00:50 год. Піки навантаження амплітудою понад 60 кВА (рис. 2.9) відображають роботу колійного інструменту при ремонті та обслуговуванні шляхового господарства в денний час.

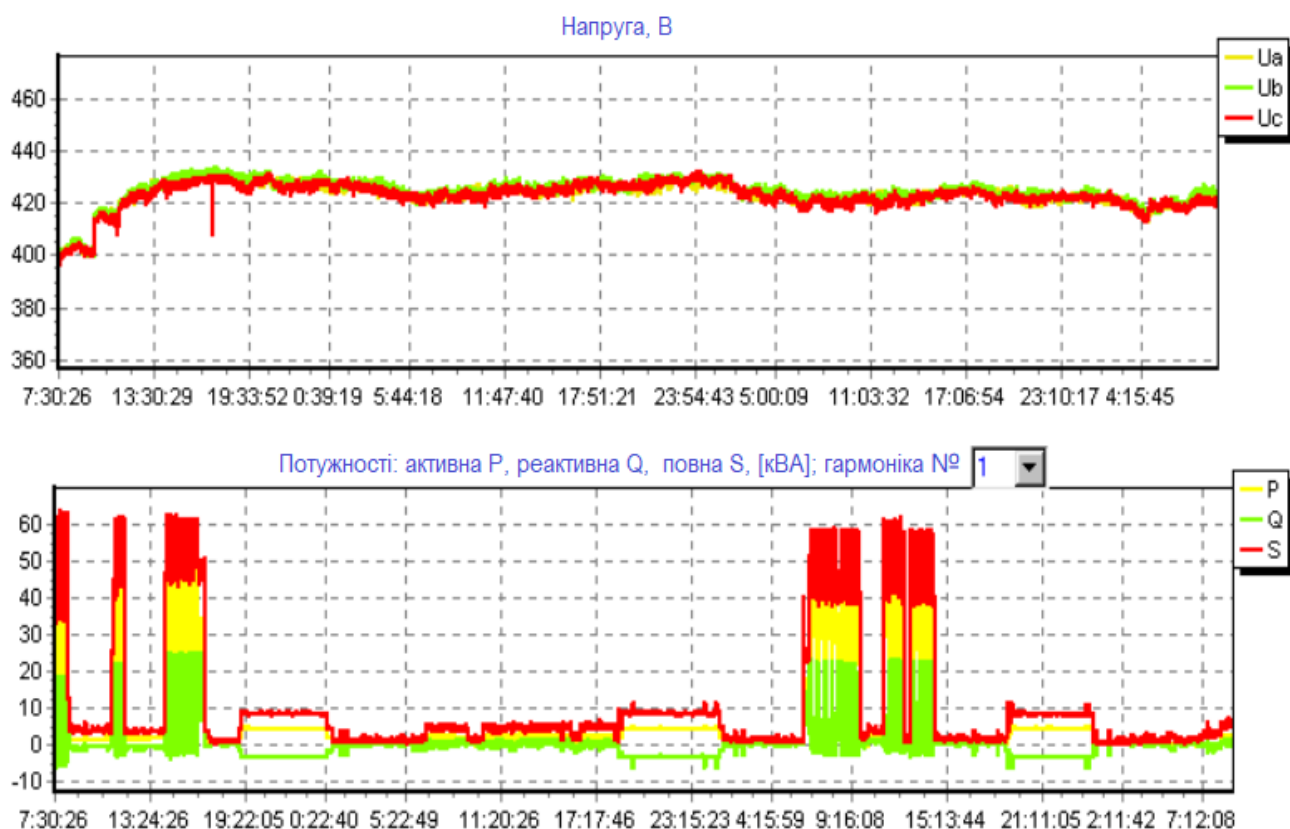


Рисунок 2.9 - Графік навантаження мережі живлення освітлення мостового залізничного переходу

Аналіз якості електроенергії у різний час доби показав, що до включення світлодіодної системи освітлення спектр частот представляє повний набір парних і непарних гармонік (рис. 2.10). З графіку видно, що амплітуда непарних гармонік струму по різних фазах досягає значень, що перевищують 60% від амплітуди 1-ої гармоніки, хоча у цьому випадку діапазон гармонік напруги не перевищує 2%

амплітуди 1-ої гармоніки напруги. Якраз в цей час амплітудні значення 1-ї гармоніки фазних струмів становили менше 1 А – до 0,84 А фази (рис. 2.11).

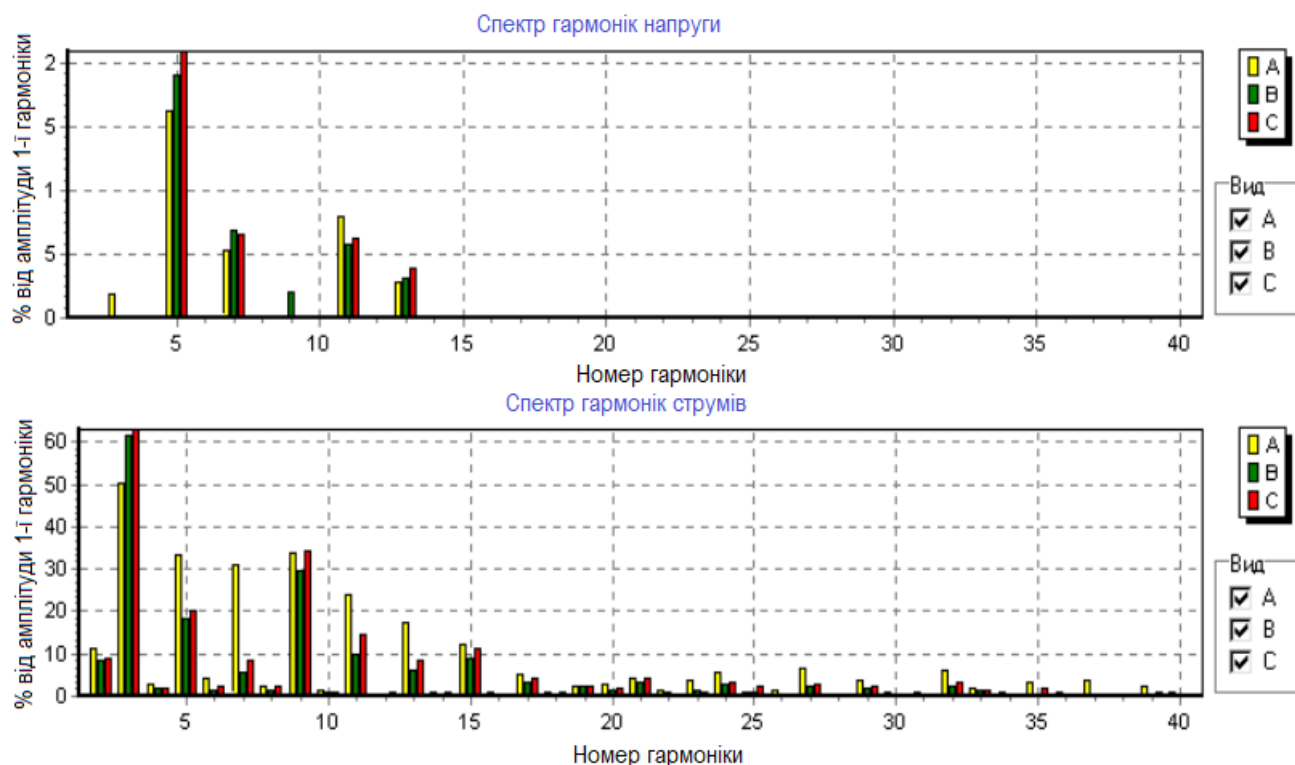


Рисунок 2.10 - Спектр гармонік в мережі живлення без світлодіодних світильників

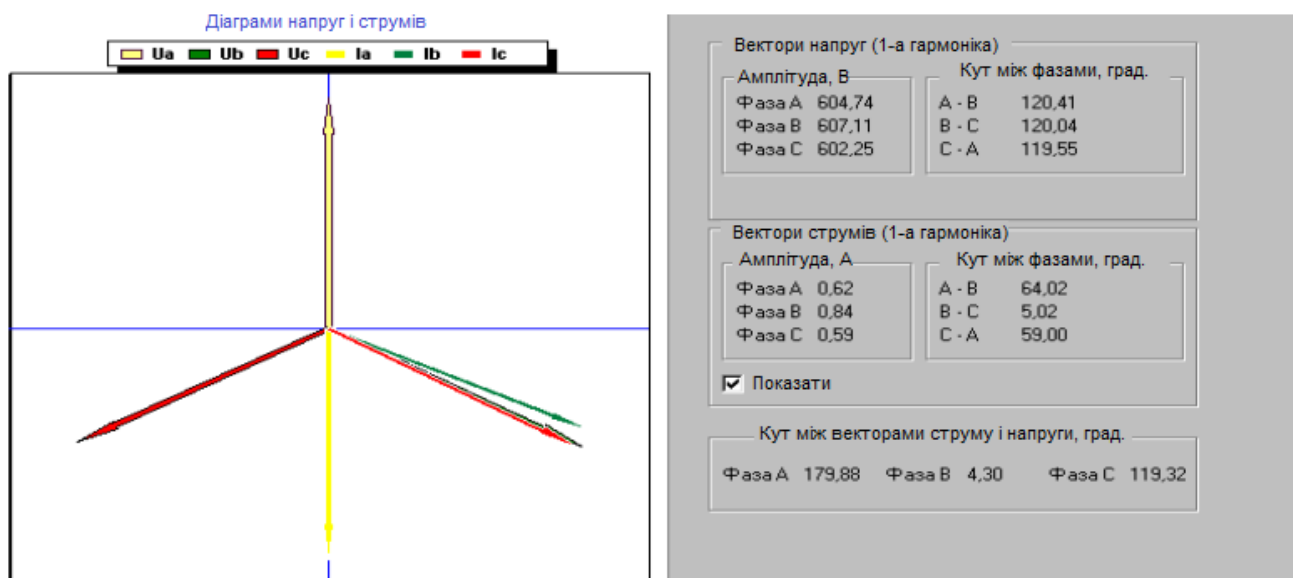


Рисунок 2.11 - Векторні діаграми струму та напруги основної частоти

Пояснити широкий спектр гармонік струму з малою амплітудою можна наявністю індукованого струму контактної мережі, а також джерелами вторинного електроживлення систем залізничної сигналізації, централізації і

блокування та пристроїв автоматики. При проведенні аналізу струму і напруги після ввімкнення тільки системи освітлення з використанням світлодіодних прожекторів видно, що спектр гармонік струмів представляє собою ряд непарних гармонік (рис. 2.12). У цьому випадку 3-я гармоніка у всіх фазах має суттєве значення, а саме понад 120% від амплітуди 1-ї гармоніки менш завантаженої фази А (рис. 2.13).

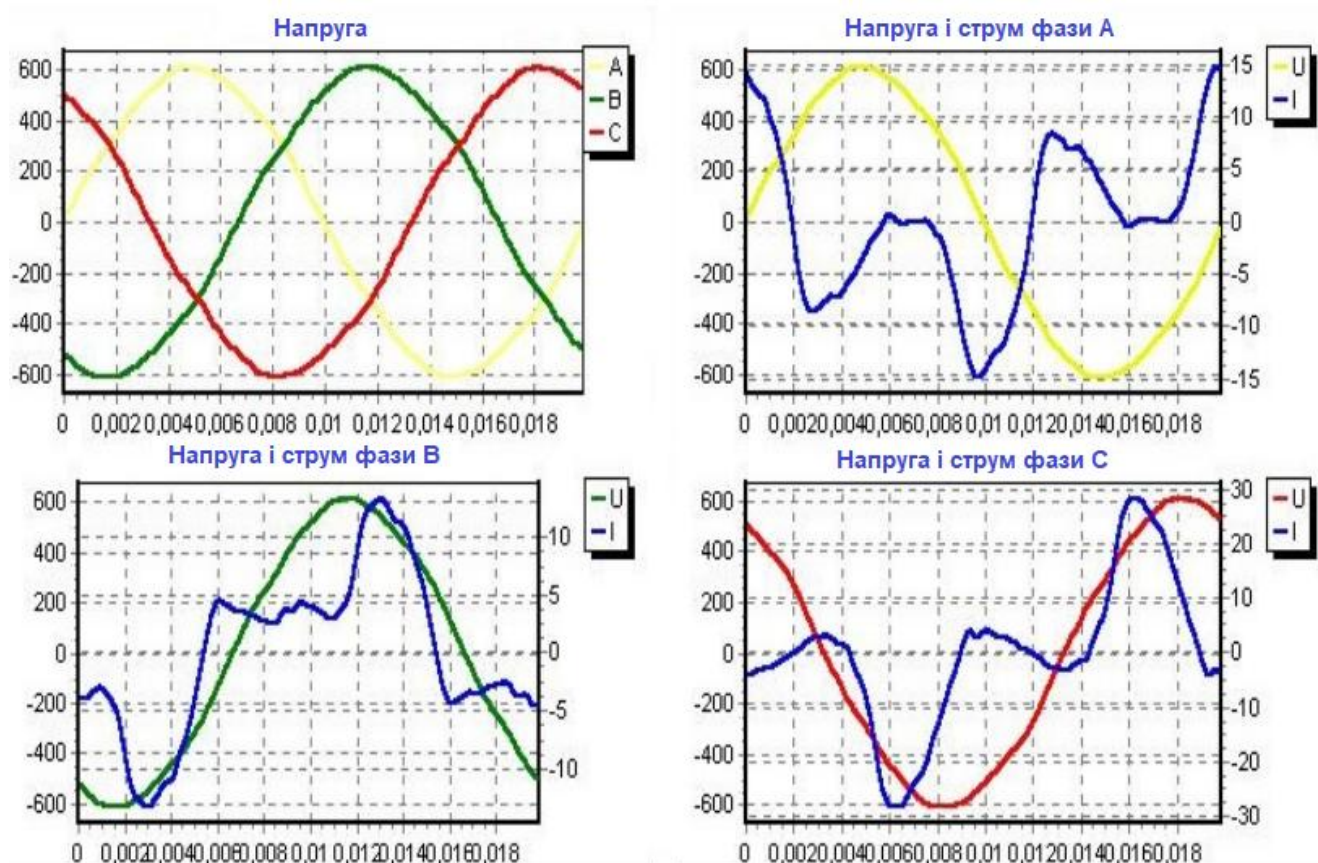


Рисунок 2.12 - Напруга живлення та струм світлодіодного навантаження

Аналіз часової (рис. 2.12) і векторної (рис. 2.14) діаграм дозволяє стверджувати, що при ввімкненні світлодіодних світильників значно знижується коефіцієнт потужності кола живлення і емісія струмів високої частоти, що генеруються джерелами вторинного електроживлення, викликає неприпустиме спотворення струму мережі [30].

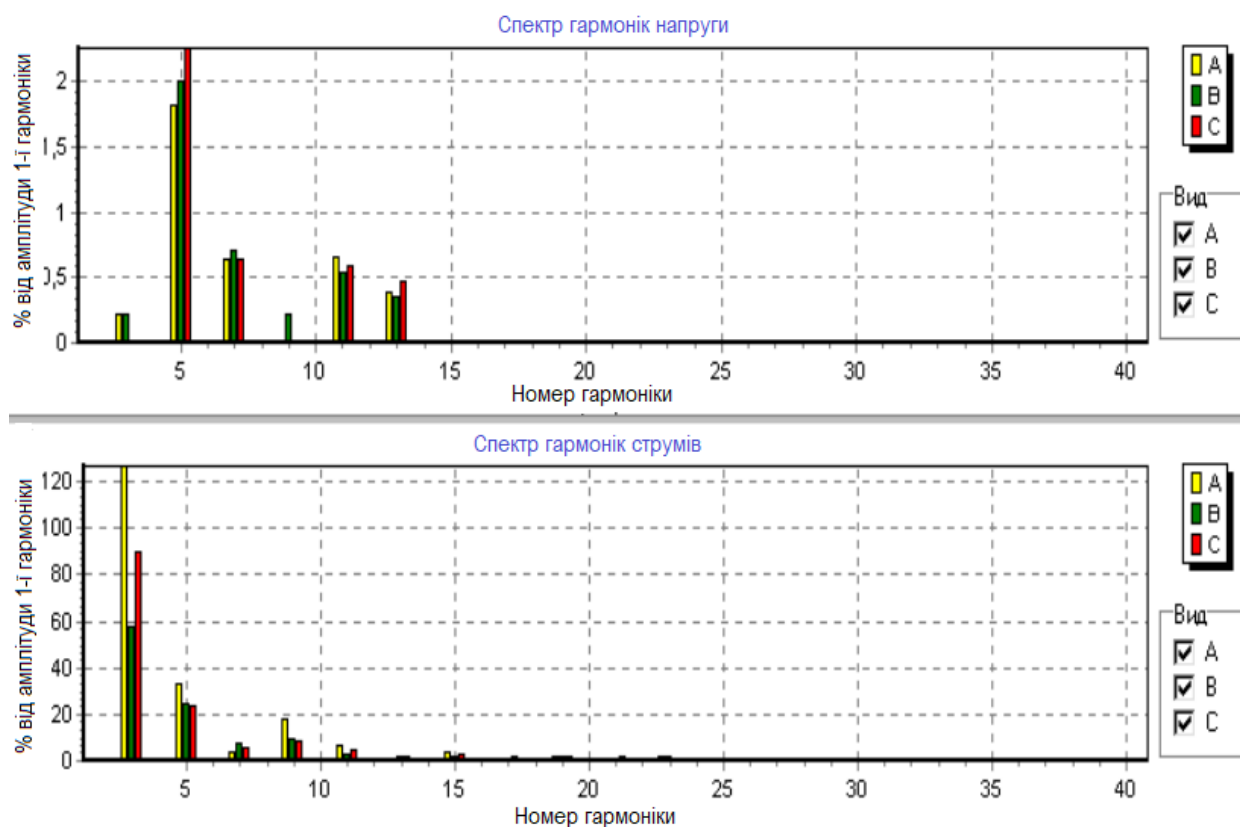


Рисунок 2.13 - Спектральні складові гармонік в мережі живлення світлодіодних світильників

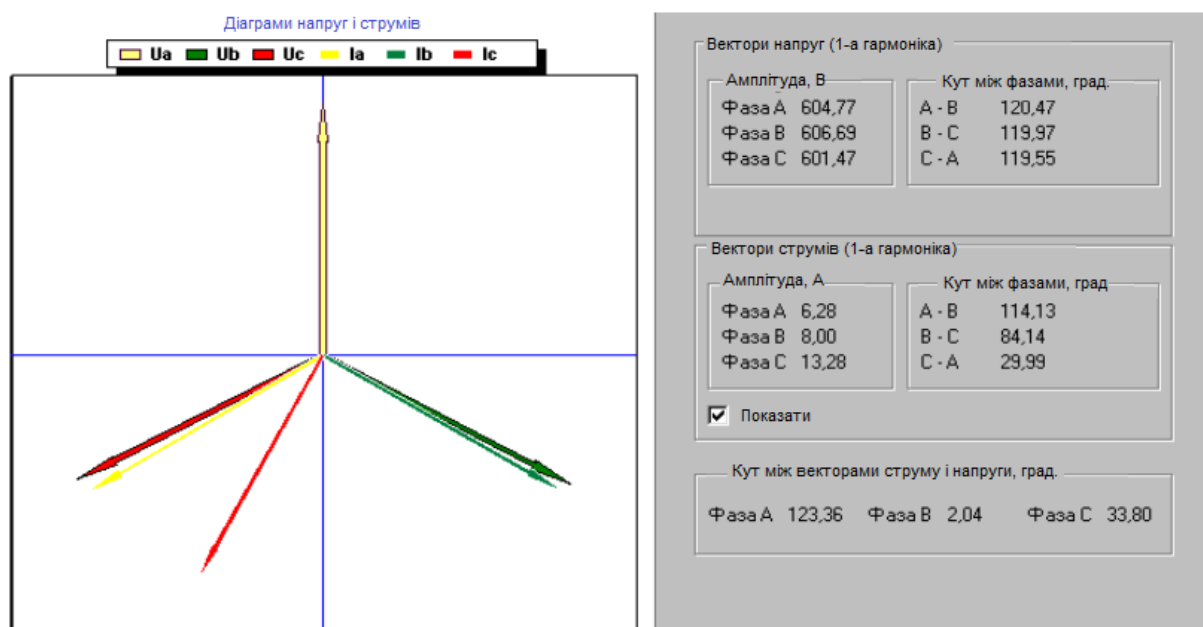


Рисунок 2.14 - Кутове зміщення у фазах після ввімкнення світлодіодних світильників

Отже, для підвищення коефіцієнта потужності та зниження в мережі живлення вищих гармонік при несинусоїдальних струмах навантаження потрібно використувати пасивні або активні фільтрокомпенсуючі пристрої.

2.3 Розрахунок пасивних фільтрів на базі 4-променевої зірки

Для симетрування електромережі живлення та зниження впливу вищих гармонік світлодіодного навантаження перспективним вважається використання в три-фазній мережі фільтра, з'єднаного за схемою «зірка» з 4-а відгалуженнями. Розглянута топологія дозволяє зменшити загальну кількість реактивних елементів фільтра та підвищити економічну ефективність мереж освітлення, порівняно з традиційними схемами [35].

За допомогою такої схеми формується силовий фільтр із 2-а резонансними частотами: одна резонансна частота для гармонік струмів, що утворюють симетричні складові прямої та зворотної послідовності, а друга - для струмів системи нульової послідовності (рис. 2.15).

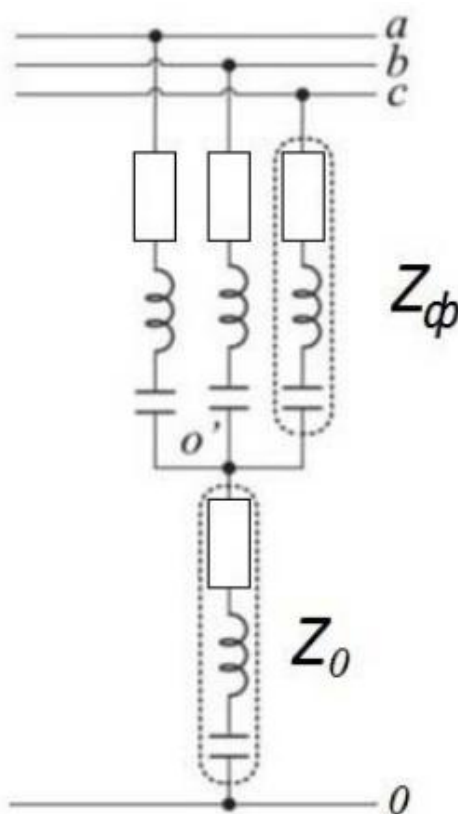


Рисунок 2.15 – Схема «зірки» з 4-а відгалуженнями

Для реалізації цієї схеми можуть застосовуватися лише пасивні елементи. Пропонована топологія складається з трьох гілок з трьома ідентичними опорами Z_{ϕ} та одного нейтрального відгалуження з опором Z_0 .

На рис. 2.15 приведено пасивний фільтр в загальній трифазній мережі, в якій компоненти напруги прямої/зворотної послідовності $u_{12} = [u_a, u_b, u_c]$ та нульової послідовності представлені окремо.

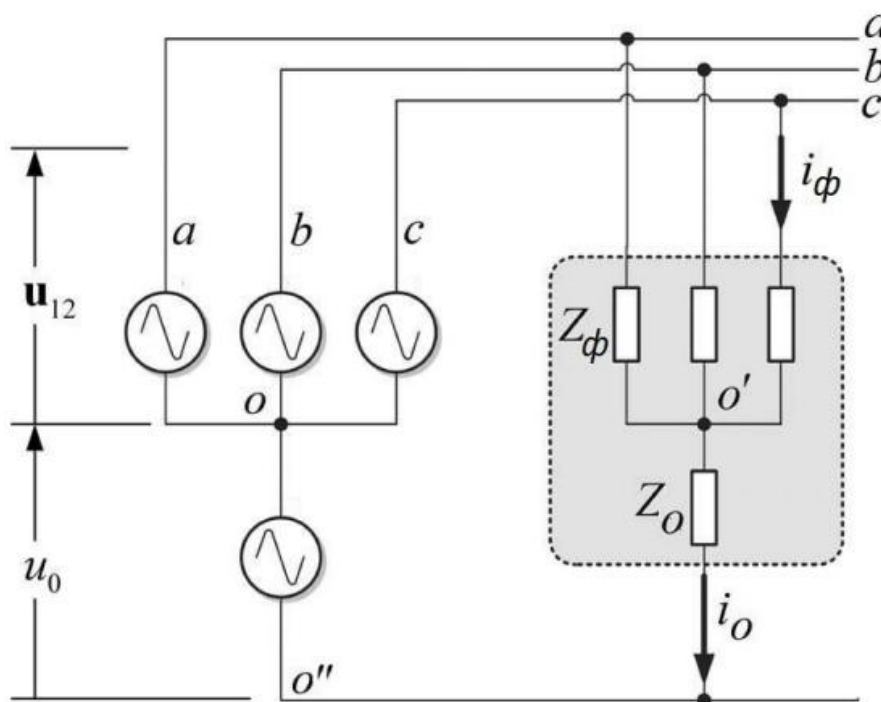


Рисунок 2.15 – 4-променевий пасивний фільтр в трифазній мережі

Якщо враховувати тільки складові основної гармоніки в колі, то нульові точки джерела та фільтра (о–о') мають один потенціал, тобто $U_{oo'} = 0$. У цьому випадку для прямої/зворотної послідовності опір Z_{12} даного фільтра на заданій частоті можна виразити:

$$\vec{Z}_{12} = \frac{\vec{U}_{12}}{\vec{I}_{12}} = \frac{\vec{U}_{\phi 0}}{\vec{I}_{\phi}} = \frac{\vec{U}_{\phi 0'}}{\vec{I}_{\phi}} = \vec{Z}_{\phi}, \quad (2.2)$$

де U_{12} , I_{12} - значення діючих на фільтр напруги і струму прямо-зворотної послідовності.

Якщо враховувати тільки нульову послідовність в колі, то нульові точки джерела та фільтра (о–о') будуть мати один потенціал:

$$\vec{Z} = \frac{\vec{U}_0}{\vec{I}_0} = 3 \frac{\vec{U}_{00''}}{\vec{I}_0} = \frac{\vec{U}_{0'0''}}{\vec{I}_0} \frac{\vec{Z}_{\phi} + 3\vec{Z}_0}{\vec{Z}_0} = \vec{Z}_{\phi} + 3\vec{Z}_0, \quad (2.3)$$

де U_0 , I_0 - значення напруги і струму нульової послідовності.

Реактивні опори у гілках фільтра є резонансними елементами, налаштованими на різні частоти. Їх з'єднання за такою схемою утворює дві групи гілок різні частоти: одна група - для однієї частоти, інша - для нульової послідовності. Це значить, що пасивний фільтр при паралельному включенні фільтрує гармоніки струму та створює контури з низьким опором для гармонік певної частоти. Схему 4-променевого фільтра з 4 відгалуженнями з урахуванням резонансних LC-елементів показано на рис. 2.16, де фазний і нейтральний опір Z_ϕ і Z_0 розраховуються таким чином:

$$\bar{Z}_\phi = R_\phi + j(L_\phi\omega - \frac{1}{C_\phi\omega}), \quad (2.4)$$

$$\bar{Z}_0 = R_0 + j(L_0\omega - \frac{1}{C_0\omega}), \quad (2.5)$$

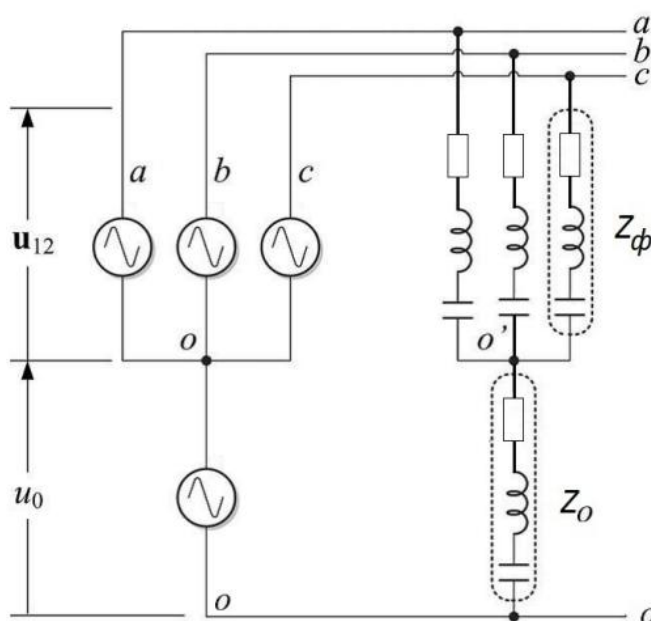


Рисунок 2.16 - Стандартний фільтр з 4 відгалуженнями з резонансними елементами LC

На рис. 2.17 приведено частотні характеристики 4-променевого фільтра, що показаний на рис. 2.16, та забезпечує послаблення гармонік нульової і прямої послідовності. Ця діаграма підтверджує, що аналізований фільтр володіє низьким опором гармонікам прямої та нульової послідовності. Відповідно, ланки такого типу можна використовувати в якості паралельного пасивного фільтра для одночасного відведення струму прямої і зворотної послідовності на частоті f_{12} і струм нульової послідовності на частоті f_0 .

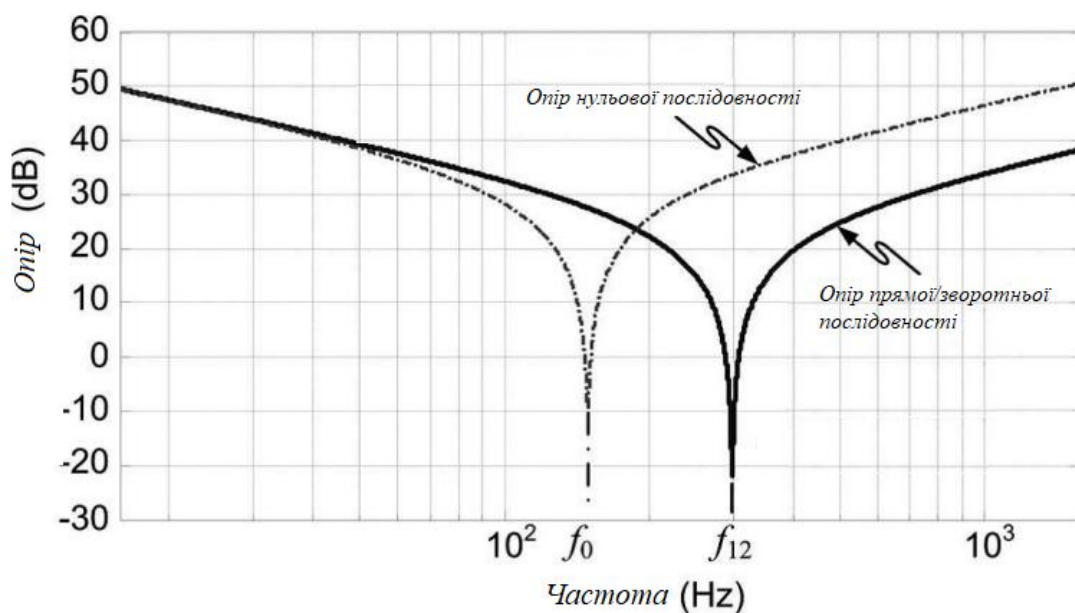


Рисунок 2.17 – Діаграм зміни модуля опору фільтра

Отже бачимо, що кола струму прямої послідовності та нульової послідовності є незалежними, а це є важливим у тому випадку, коли резонансна частота нульової послідовності є близькою до основної частоти енергосистеми ($f_0 = 150$ Гц). У цьому випадку коло нульової послідовності не має впливу на коло основної частоти, а опір основної частоти для гармонік нульової послідовності є вищим, ніж для гармонік прямої послідовності. Можна підсумувати, що фільтруюча здатність кола прямої послідовності відносно вища кола нульової послідовності.

На основі досліджуваної структури (рис. 2.15) можна застосовувати фільтри з різним поєднанням реактивних елементів. У схемах фільтрів, що приведені на рис. 2.18, число вільних ступенів для встановлення резонансних частот і коефіцієнта якості знижено для того, щоб отримати простий та економічний фільтр із збереженням робочих характеристик для ефективного гасіння гармоніки.

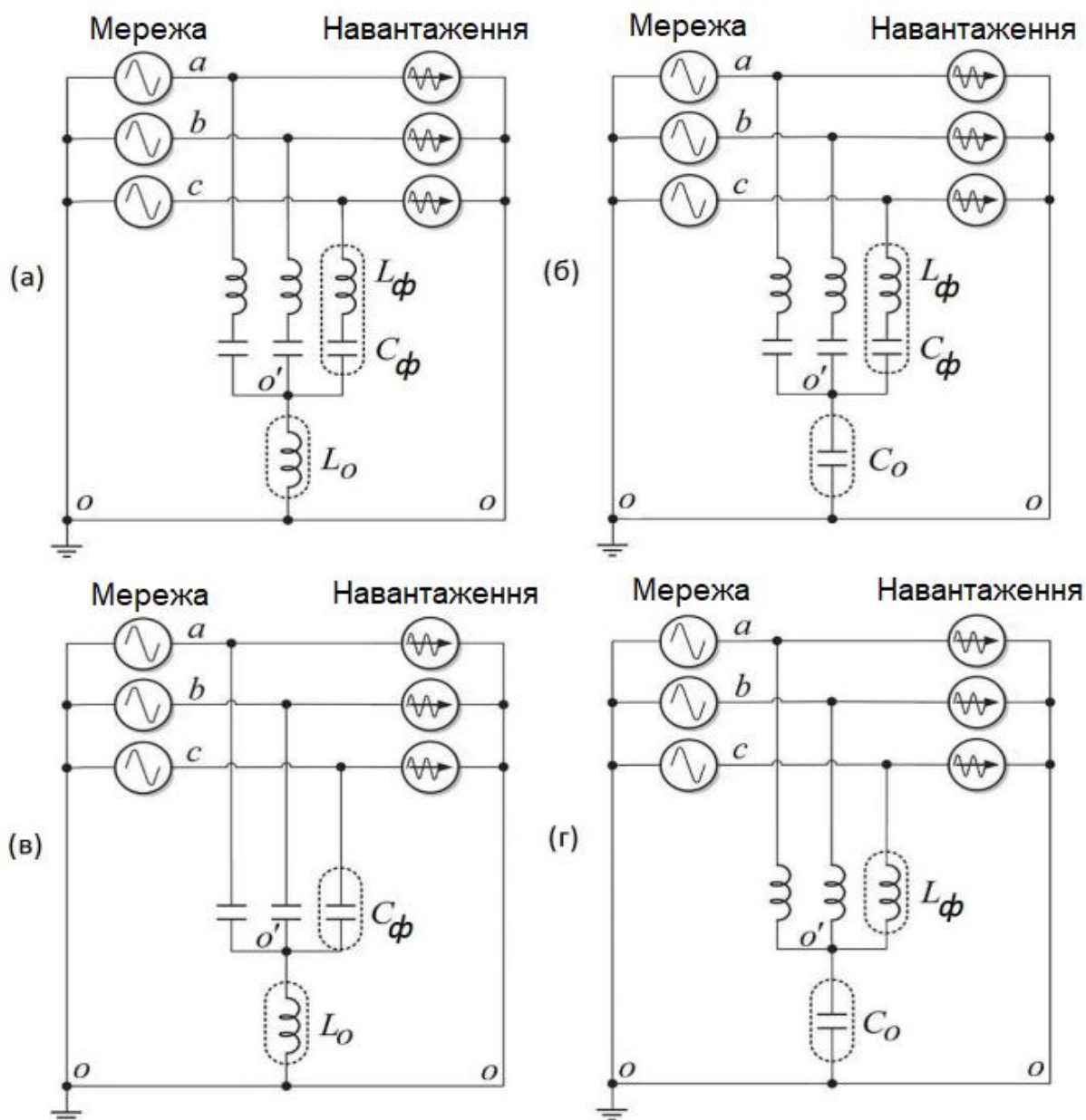


Рисунок 2.18 – Варіанти конфігурації 4-променевих фільтрів

На рис 2.18, *а* приведено конфігурацію пасивного фільтра, де резонансна частота f_0 нульової послідовності є нижчою за резонансну частоту f_{12} прямої послідовності. У такому варіанті формуються фазові опори за рахунок LC -елементів, а опір нейтрального дроту складається тільки з однофазної індуктивності L_0 . Резистори R_ϕ і R_0 невраховані, оскільки не впливають на розрахунок резонанс-них частот, але їх потрібно брати до уваги при розрахунку добротності для кожної послідовності.

Приведений на рис. 2.18, *б* варіант є кращим, коли резонансна частота нульової послідовності f_0 є вищою за резонансну частоту f_{12} прямої послідовності - тут в нейтральну гілку включається конденсатор C_0 .

Для компенсації реактивної потужності на основній частоті енергетичної системи і для зменшення гармонік нульової послідовності використовують схему, приведену на рис. 2.18, в, в якій фазні гілки містять групу конденсаторів, а котушка індуктивності з'єднана з нейтраллю.

Подвійне використання одного елемента можливе за схемою, що приведена на рис. 2.18, з, в якій фазні гілки складаються з однофазних котушок, а нейтральне відгалуження сформоване одним конденсатором.

Опір у нейтральному відгалуженні в розглянутих структурах можна замінити резонансним LC -контуром для зменшення проблем при визначенні резонансних частот та добротності фільтра. Резонансні контури у фазах та нейтральному провіднику можна створити складнішими колами отримання резонансних частот з використанням лише одного фільтра.

Для отримання компенсуючого ефекту потрібно при розрахунку електричних характеристик фільтра взяти до уваги величину реактивної потужності, яку потрібно компенсувати, і яку можна визначити за формулою:

$$Q = \frac{U^2}{X_C} = \omega C_{\Sigma} U^2, \quad (2.6)$$

де C_{Σ} – значення сумарної ємності всього спектру гармонік струму;

ω – величина кутової частоти мережі.

Проведене дослідження показало, що 3-я і 5-я гармоніки струму володіють найбільшою потужністю (від 50% до 40% загального спектру), а на 7-му і 9-му гармоніки припадає від 20% до 10% потужності спектру. Тому залежно від потужності гармоніки розподіл ємності конденсаторів може перебувати у наступному співвідношенні: 45%:35%:20% для 3-ї, 5-ї, та 7-ї гармонік відповідно.

Параметри L і C для фільтрів відповідних гармонік і відома добротність D дозволяють визначити величину активного опору R за формулою:

$$R = \sqrt{3} \frac{1}{D} \sqrt{\frac{L}{C}}. \quad (2.7)$$

Методика розрахунку у програмі C++ параметрів фільтрокомпенсуючого пристрою є наступною: спочатку вводимо дані класу напруги та потрібної реактив-ної потужності конденсаторі, потім визначаємо індуктивність реактора та оці-нюємо рівень реактивної потужності фільтра. Якщо потужність недостатня, то початкове значення реактивної потужності збільшуємо і цикл повторюється до тих пір, поки не буде виконано умову достатності реактивної потужності. Коли досягнуто необхідну потужність фільтра, відбувається порівняння розрахункового коефіцієнта несинусоїдності струму K_I з допустимим коефіцієнтом несинусоїдності $K_{I \text{ доп}}$: $K_I < K_{I \text{ доп}}$. Якщо умова не виконується, то змінюються параметри резонансних ланок і виконується повторний розрахунок. Якщо умова $K_I < K_{I \text{ доп}}$ виконується, то оцінюється достатність параметрів навантаження фільтра. При невиконанні цієї умови потрібно збільшити реактивну потужність конденсатора. За умови $K_I < K_{I \text{ доп}}$ визначається рівень напруги фільтра і при недостатній напрузі відбувається її збільшення, а цикл повторюється. Коли забезпечено необхідну напругу, розрахунок завершується. На рис 2.19 приведено алгоритм реалізації розглянутої методики.

Виконаний аналіз показав, що змінні нелінійні навантаження мають вплив на робочі характеристики фільтрів і для мережі освітлення з постійним опором характеристика пасивних фільтрів може змінюватись під впливом часових та атмосфер-них факторів.

З урахуванням проведеного дослідження можна сформулювати наступні умови для використання пасивних фільтрів:

- пасивні фільтри можна використовувати в лініях з постійним опором;
- найбільший ефект від застосування пасивних фільтрів можна отримати у 4-провідних мережах.

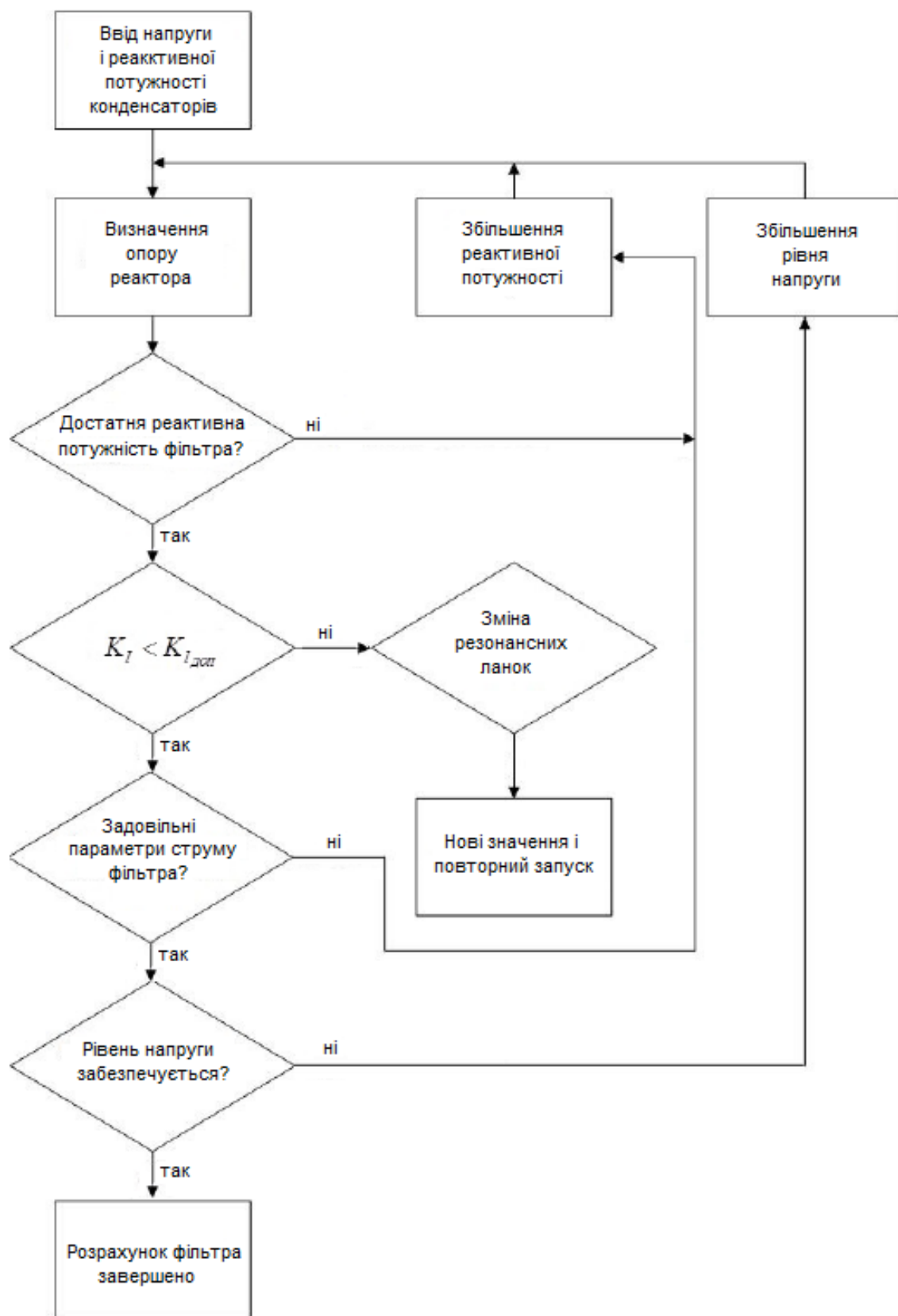


Рисунок 2.19 - Алгоритм розрахунку параметрів фільтрокомпенсуючої ланки

2.4 Висновки до розділу 2

1. Проведені дослідження електромереж живлення торгівельної, навчально-лабораторної будівель і промислового освітлення має типовий набір вищих гармонік співрозмірних за потужністю з основною гармонікою.
2. Для кожного досліджуваного об'єкта було виявлено характерний постійний спектральний склад вищих гармонік струму мережі живлення.
3. Дослідження показали, що статичний нелінійний опір енергозберігаючих освітлювальних приладів генерує непарні вищі гармоніки постійного спектру та потужності.
4. Для зниження впливу вищих гармонік, що генеруються постійним світлодіодним навантаженням, пропонується застосовувати частотно-залежні ланки з статичним комплексним опором.
5. Для зниження впливу вищих гармонік, викликаних статичним навантаженням, пропонується використовувати пасивні фільтри.
6. Для визначення оптимальних параметрів пасивного фільтра за схемою 4-променевої зірки розроблено алгоритм методичку розрахунку

3 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

3.1 Моделювання частотно залежних кіл для мереж освітлення

Аналіз статичних характеристик необхідний при оцінці робочих характеристик в нормальному режимі, а динамічні характеристики дозволяють проаналізувати реакцію фільтра в різних комутаційних режимах.

Математичне моделювання мережі та частотно залежних кіл проводилося у програмі схематичного моделювання PSpice, яка на даний час є еталонною програмою моделювання аналогових електронних кіл [31]. Сучасні версії PSpice представляють обчислювальне середовище для моделювання аналогових та цифрових електронних схем. Істотна перевага програми полягає у можливості моделювання змішаних аналого-цифрових схем без застосування допоміжних пристроїв узгодження аналогових та цифрових сигналів. Це досягається за рахунок автоматичного використання спеціальних інтерфейсів і значно полегшує моделювання змішаних аналого-цифрових пристроїв. Використання програми Probe, яка є частиною PSpice, дозволяє графічно побудувати реакцію кола на вхідний вплив у часовій та частотній областях. На основі програми PSpice було змодельовано типову схему живлення світлодіодних світильників (рис. 3.1) [32].

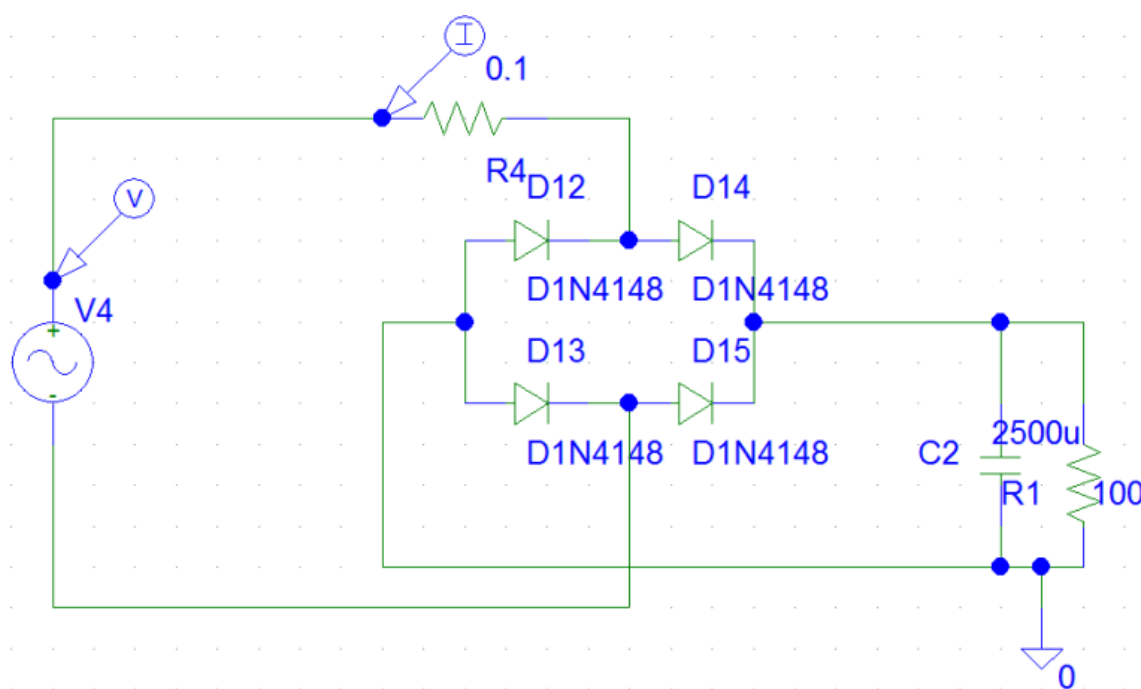


Рисунок 3.1 Модель схеми живлення світлодіодного навантаження

Основний режим роботи мостового випрямляча у схемі живлення світлодіодного навантаження визначає імпульсний характер споживаного струму. Форма віртуального струму (рис. 3.2) дуже близько збігається з характером реального струму, осцилограма якого приведена на рис. 3.3.

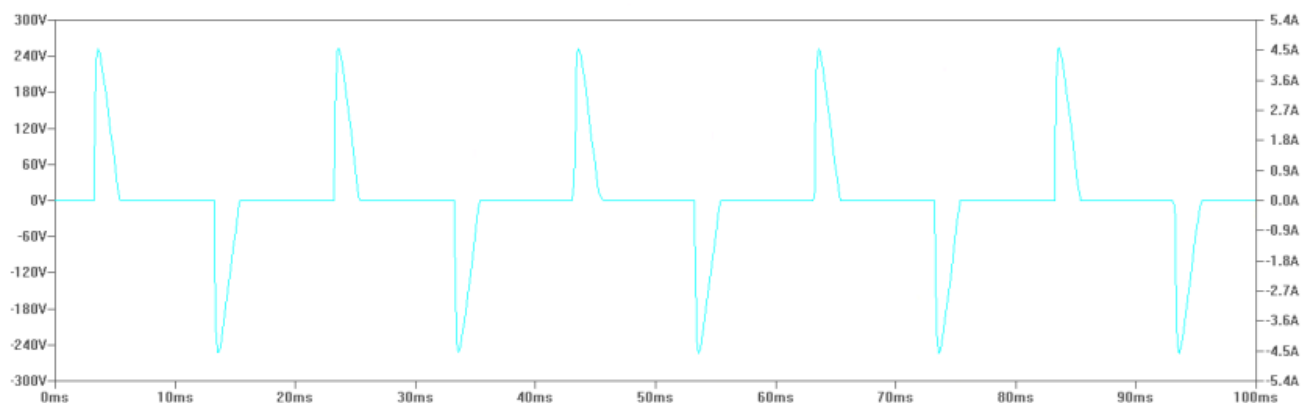


Рисунок 3.2 - Модель струму споживання мостовим випрямлячем

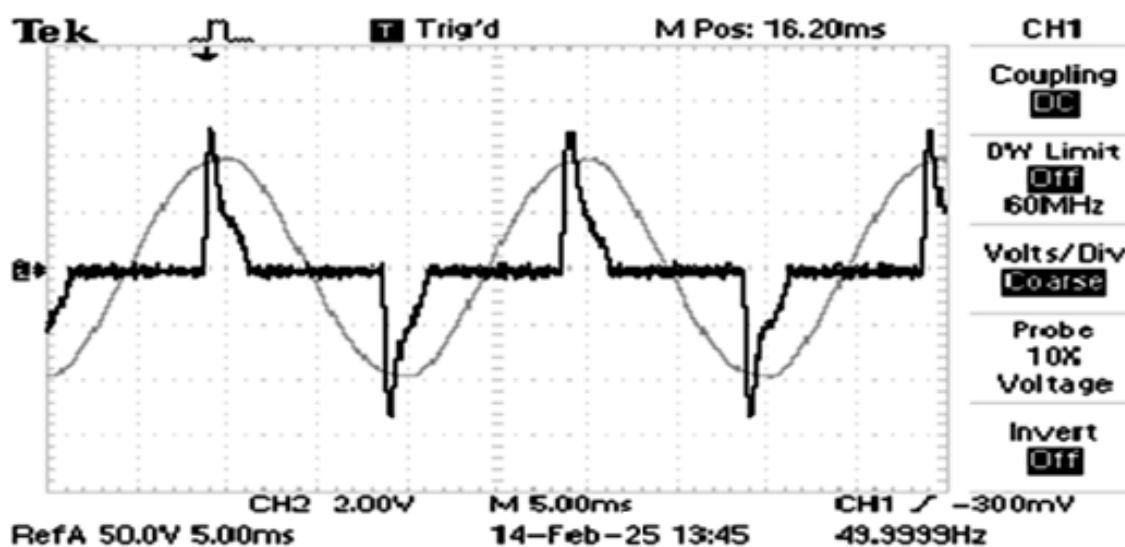


Рисунок 3.3 - Осцилограма реального струму споживання світлодіодним світильником

Гармонічний ряд реально споживаного струму світлодіодного світильника ПСУ-40-УА-В40 приведено на рис. 3.4. З рисунка видно, що осцилограма спектру гармонік містить 3, 5, 7 і 9 гармоніку, а піки гармонійного ряду демонструють потужність вищих гармонік відносно основної гармоніки.

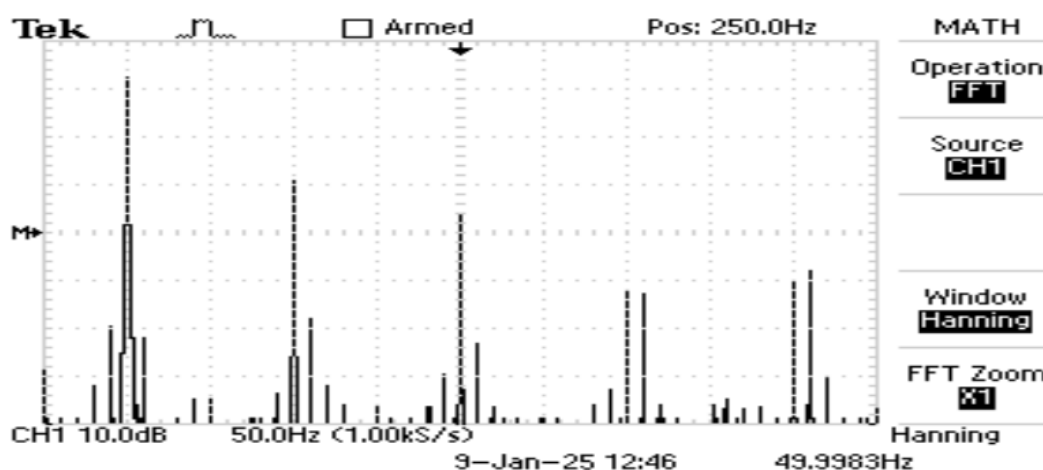


Рисунок 3.4 - Спектр 1, 3, 5, 7 і 9-ї гармонік у струмі споживання світлодіодного світильника

При 3-фазному режимі включення освітлювальних систем кращою (у порівнянні з традиційною) є «чотирипроменева» трифазна схема фільтрокомпенсуючих пристроїв [33]. Моделювання трифазного нелінійного навантаження з емісією гармонік високої частоти в мережу живлення реалізується генераторами частот IA3, IA5, IA7, IA9 для фази A, IB3, IB5, IB7, IB9 для фази B і IC3, IC5, IC7, IC9 для фази C з частотами та амплітудами, що відповідають номеру гармоніки, показано на рис. 3.5 у вигляді схеми мережі.

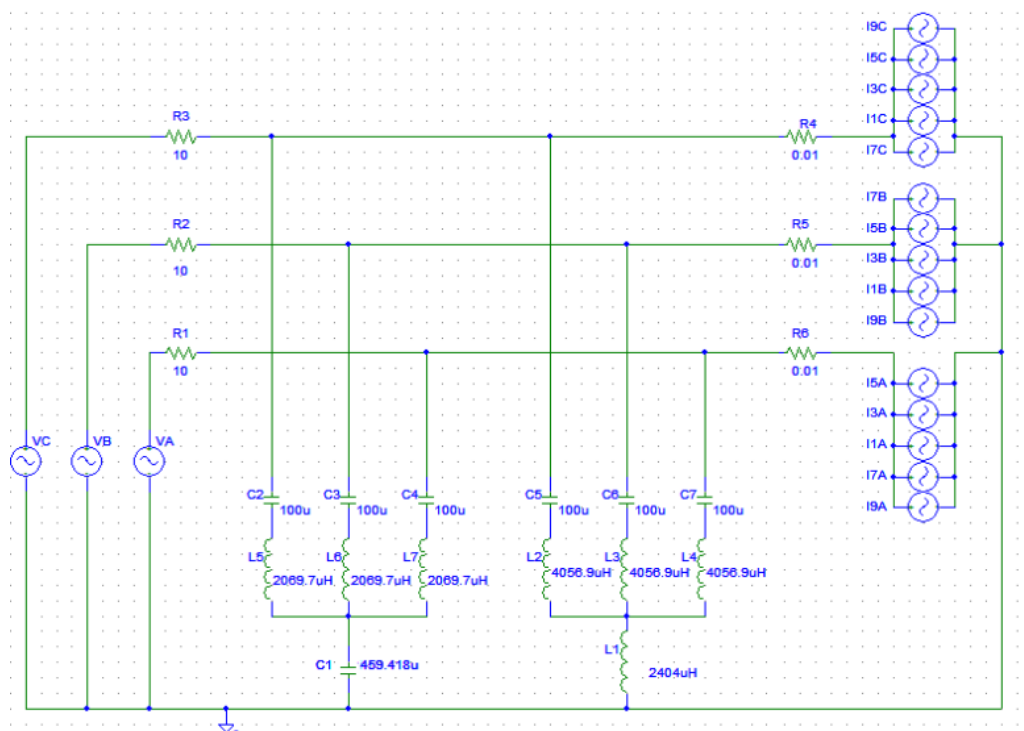
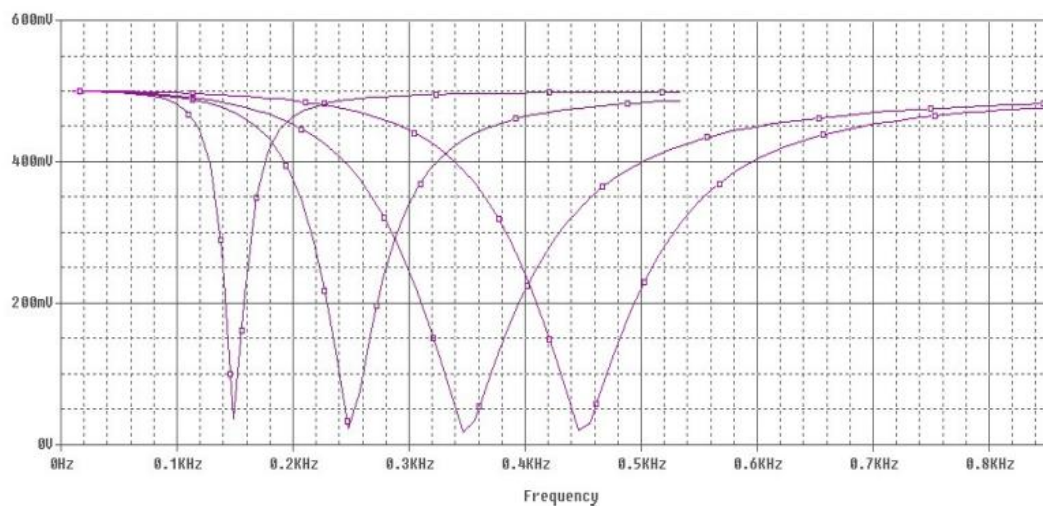
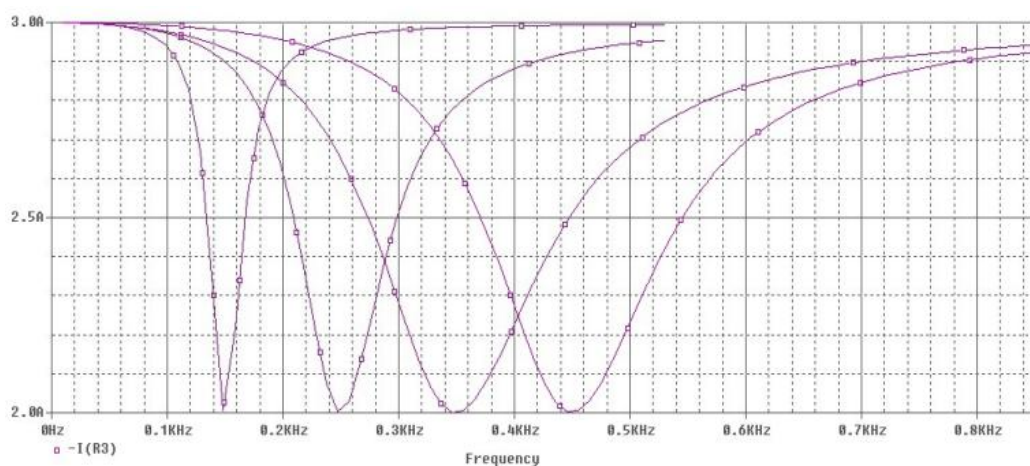


Рисунок 3.5 - Мережа з нелінійним навантаженням та частотними фільтрами

АЧХ за напругою і струмом схеми моделювання трифазного синусоїдального джерела живлення (VA,VB,VC), нелінійного навантаження (I1A, I3A, I5A, I7A, I9A), (I1B, I3B, I5B, I7B, I9B), (I1C, I3C, I5C, I7C, I9C) і 4-променеві частотні фільтри, що містять R7, (L1 – L7) та (C1 – C7) показано на рис. 3.6, а та 3.6, б.



а) амплітудно-частотна характеристика за напругою



б) амплітудно-частотна характеристика за струмом

Рисунок 3.6 - АЧХ мережі живлення

Для перевірки фільтруючих властивостей досліджуваної топології фільтрів, розглянутої в розділі 2 цієї роботи, було виконано аналіз режиму нелінійного симетричного навантаження (табл. 3.1). Спектр струму споживання нелінійного симетричного навантаження приведено на рис. 3.7, а амплітудні значення вищих гармонік струму відносно основної гармоніки (табл. 3.1, рис. 3.7) отримані при проведенні вимірювань на залізничному мості Тернопільської залізниці по вул. Руська (рис. 2.14).

Таблиця 3.1 - Параметри гармонік при симетричному навантаженні

№ гармоніки	Амплітуда відносно основної гармоніки			Частота, Гц	Генератор високої частоти
	A	B	C		
1	1	1	1	50	IA1
3	1,2	1,2	1,2	150	IA3
5	0,35	0,35	0,35	250	IA5
7	0,02	0,02	0,02	350	IA7
9	0,18	0,18	0,18	450	IA9

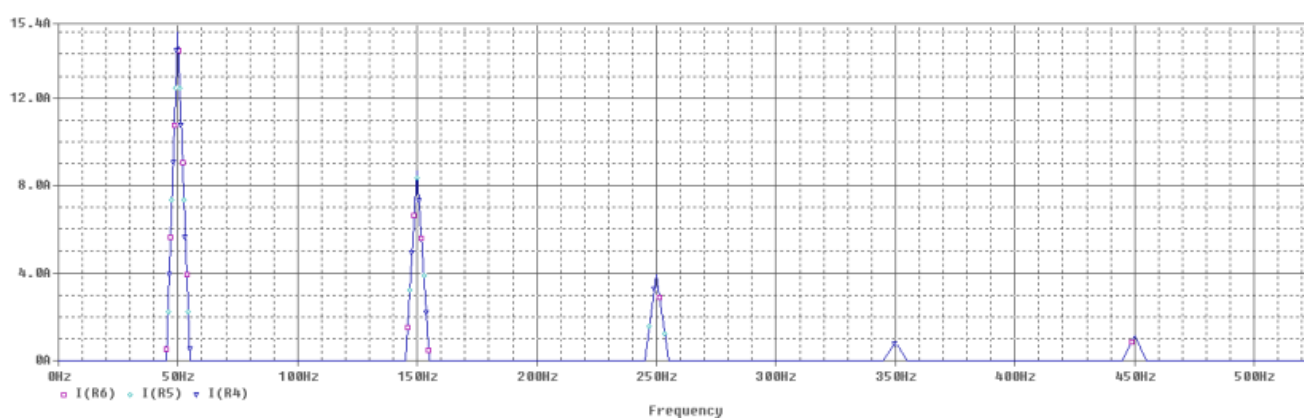
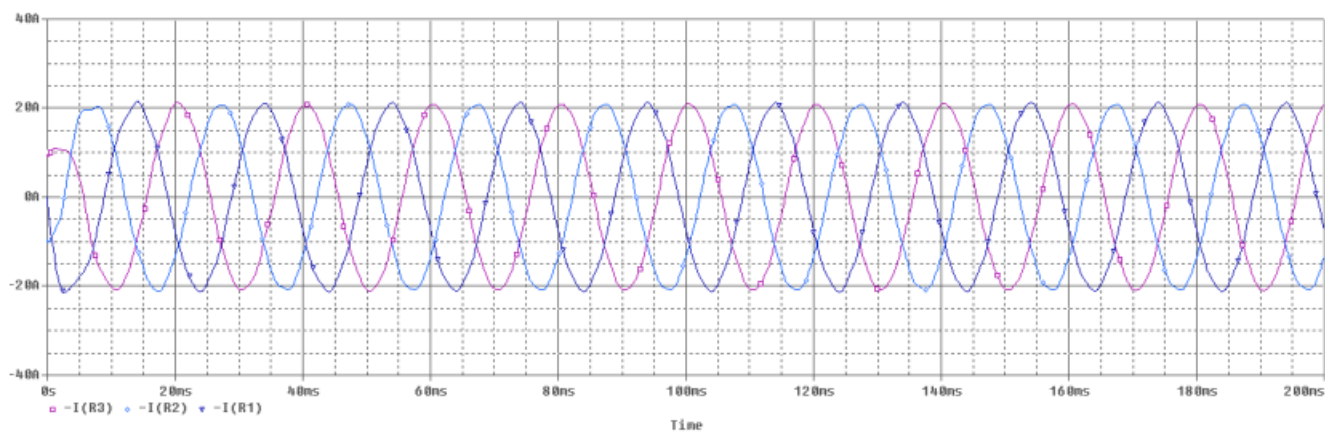
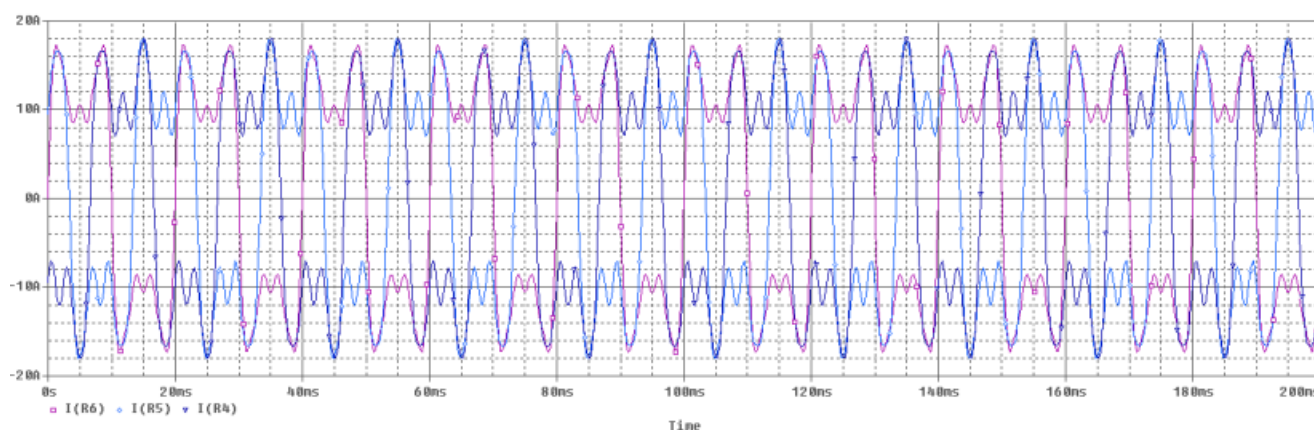


Рисунок 3.7 – Осцилограма спектру струму споживання нелінійного симетричного навантаження

На рис 3.8 показано струм в мережі живлення (а) і струм навантаження при симетричному нелінійному споживанні (б). При використанні фільтрів в мережі живлення спектр струму практично не містить вищих гармонік (рис. 3.9).



а) в мережі живлення



б) при споживанні симетричного нелінійного навантаження

Рисунок 3.8 – Осцилограми струму

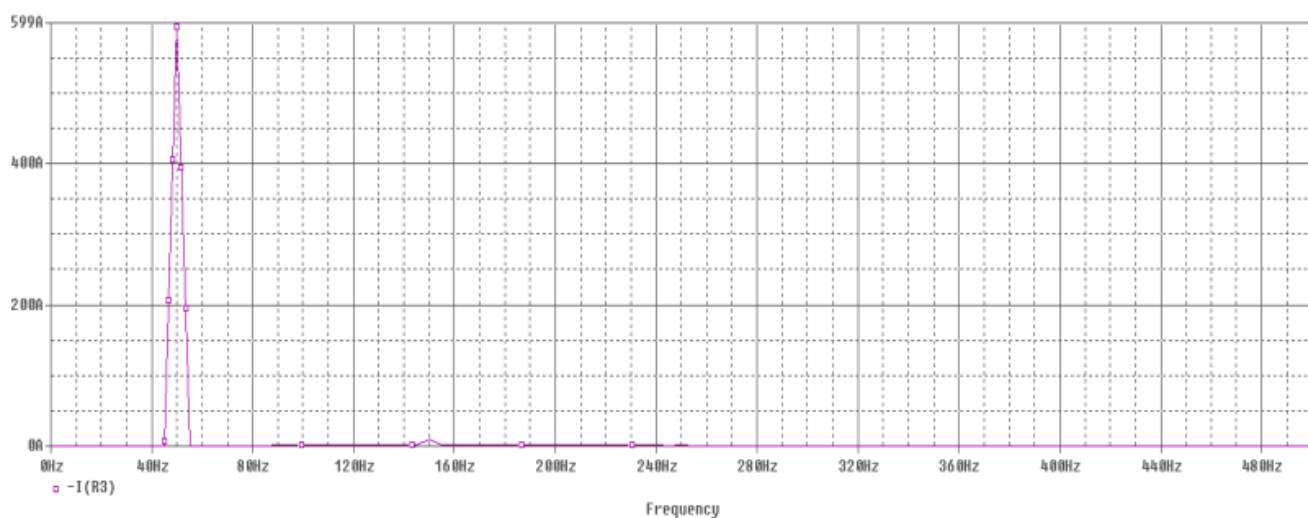
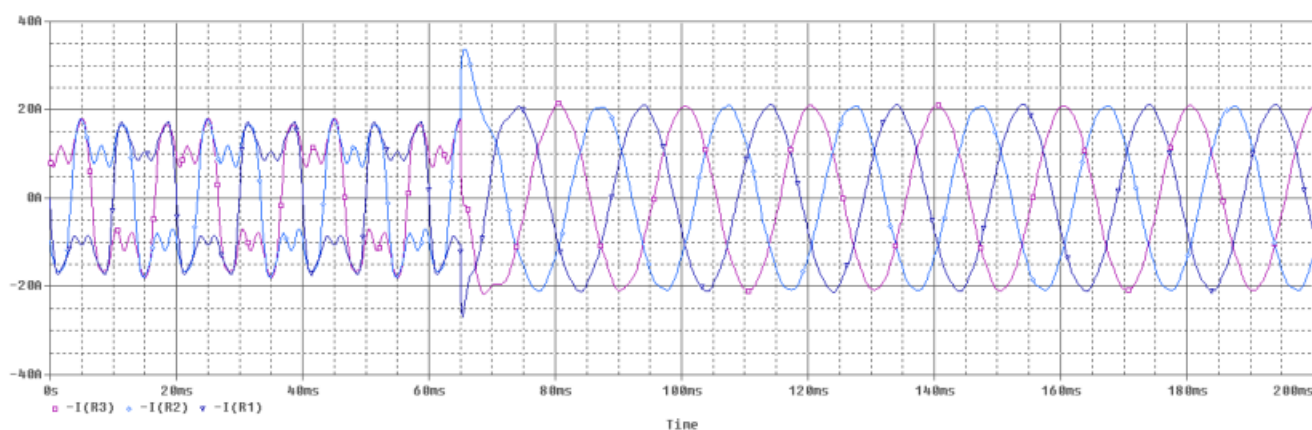
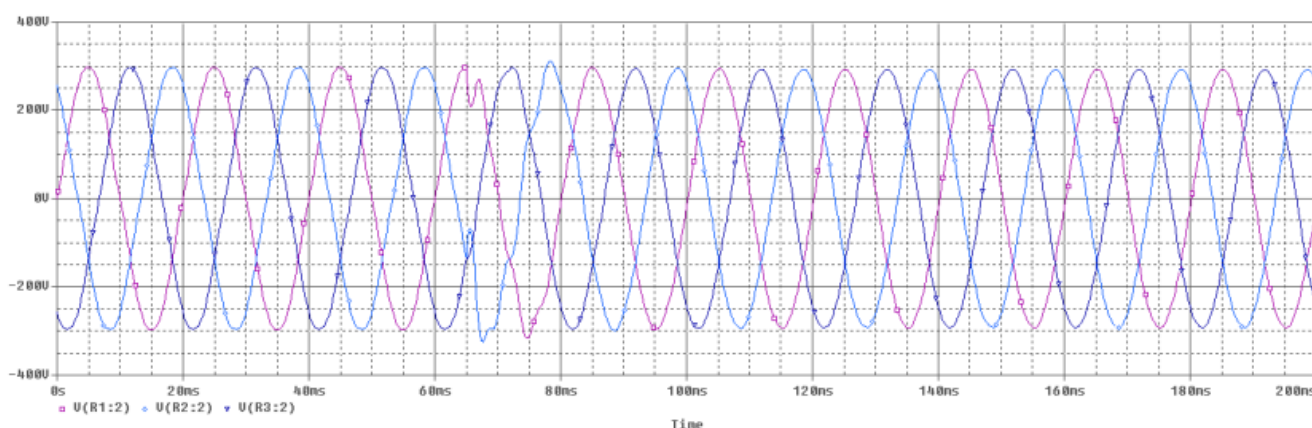


Рисунок 3.9 - Осцилограма спектр струму в мережі живлення при симетричному нелінійному навантаженні

На практиці фільтри підключаються до мережі під напругою і при їх включенні можуть виникати перехідні процеси, що здатних створювати перенапруги. Характер перехідних процесів дуже суттєво залежить від моменту комутації і на рис. 3.10, а і 3.10, б приведено осцилограму перехідного процесу при одночасному замиканні контактів вимикачів фільтрів. З рисунку видно, що перехідний процес для струму практично завершився через 25 мс, а для напруги - через 35 мс.



а) осцилограма зміни струму

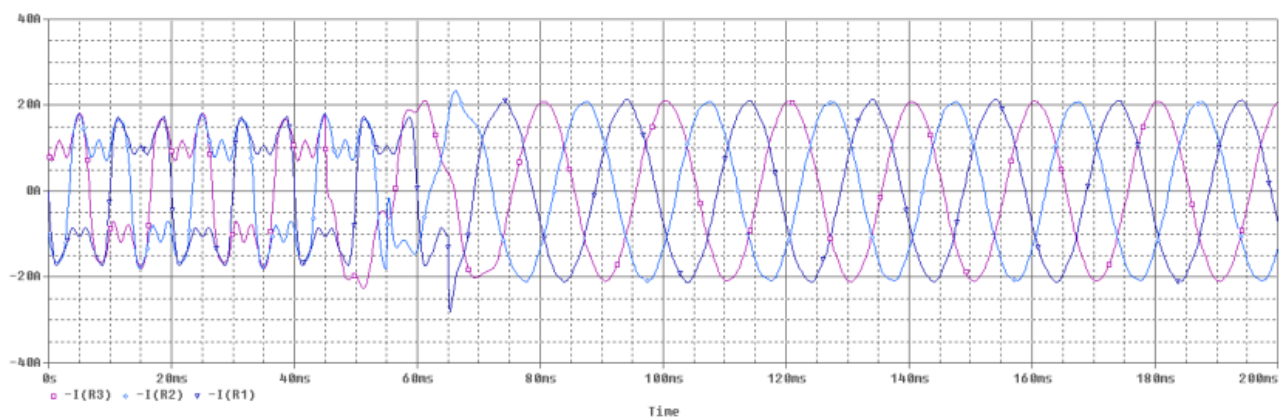


б) осцилограма зміни напруги

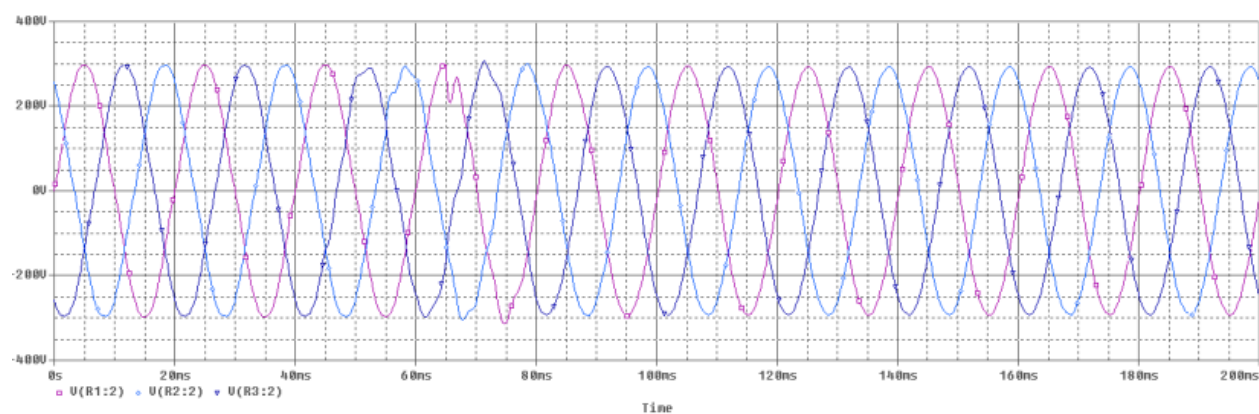
Рисунок 3.10 – Осцилограми перехідних процесів при одночасному включенні фільтрів та симетричному навантаженні

На рис. 3.11, а і 3.11, б приведено перехідний процес для симетричного навантаження при неодноразовому замиканні контактів вимикача: фаза А – 65 мс, фаза В – 55 мс, фаза С – 45 мс. Бачимо, що процес завершується у всіх трьох фазах через 40 мс (початок в 45 мс, завершення в 85 мс) після включення першого фільтра.

Такий режим симетричного навантаження в діючих електричних мережах майже не зустрічається, тому більшу увагу звертають на аналіз несиметричного режиму споживання. Співвідношення струмів фаз для несиметричного режиму приведено в табл. 3.2, які були отримані при вимірюванні якості електричної енергії для світлодіодного освітлення залізничного моста Тернопільської залізниці по вул. Руська.



а) осцилограма зміни струму



б) осцилограма зміни напруги

Рисунок 3.11 – Осцилограми перехідних процесів при неодноразовому включенні (A: 65 мс, B: 55 мс, C: 45 мс) фільтрів та симетричному навантаженні

Таблиця 3.2 - Значення гармонік при несиметричному навантаженні

№ гармоніки	Амплітуда відносно основної гармоніки			Частота, Гц	Генератор частоти
	A (15A)	B (15A)	C (30A)		
1	1	1	1	50	IA1
3	1,2	0,58	0,9	150	IA3
5	0,35	0,27	0,25	250	IA5
7	0,02	0,06	0,04	350	IA7
9	0,18	0,08	0,07	450	IA9

На рис 3.12 приведено частотний ряд струму споживання при несиметричному навантаженні і на спектральній площині бачимо різницю у навантаженні фаз.

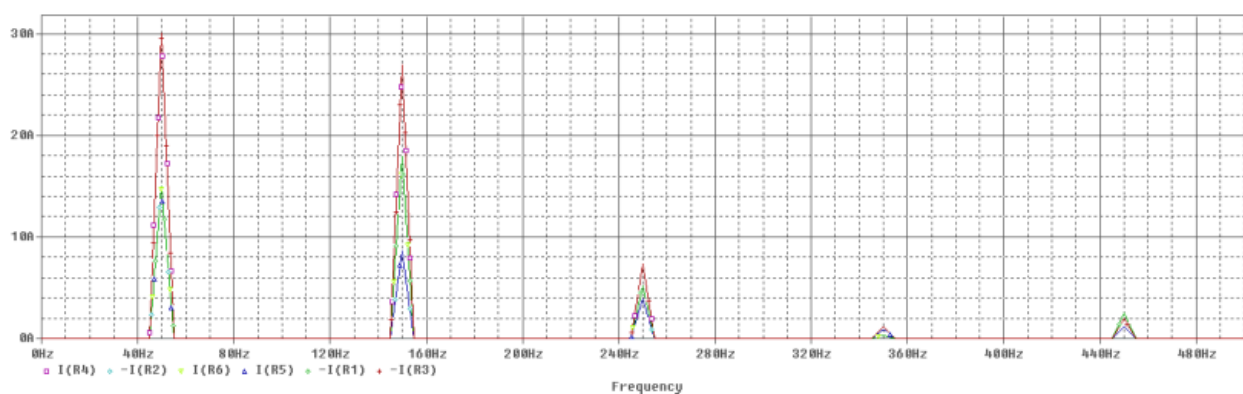
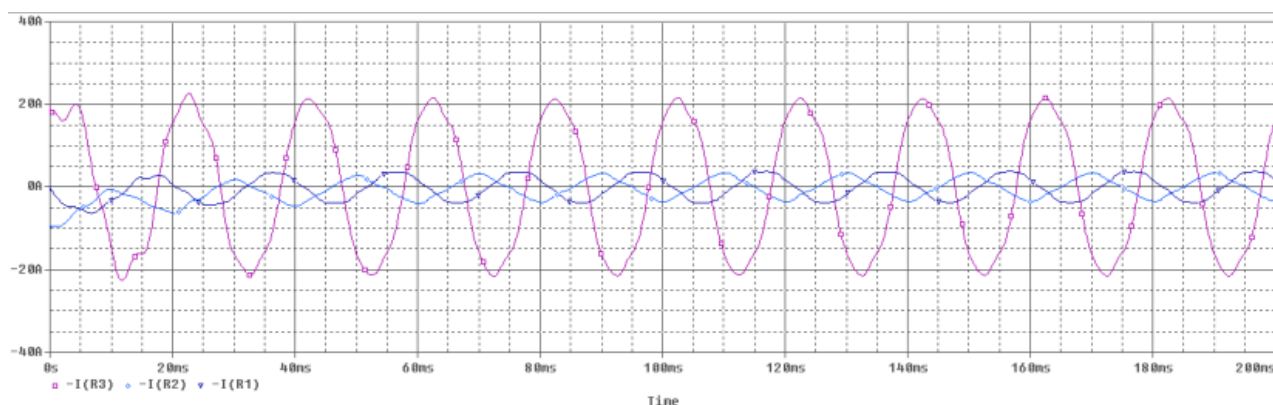
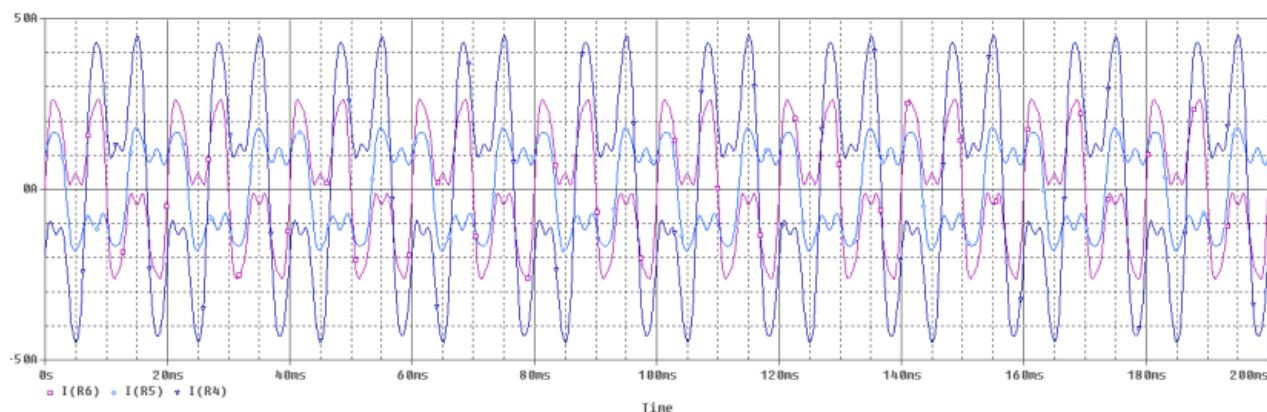


Рисунок 3.12 – Осцилограма струму споживання при несиметричному навантаженні

Часова характеристика на рис. 3.13 демонструє характер струму в мережі живлення (а) і струму споживання світлодіодними світильниками (б).



а) в мережі живлення

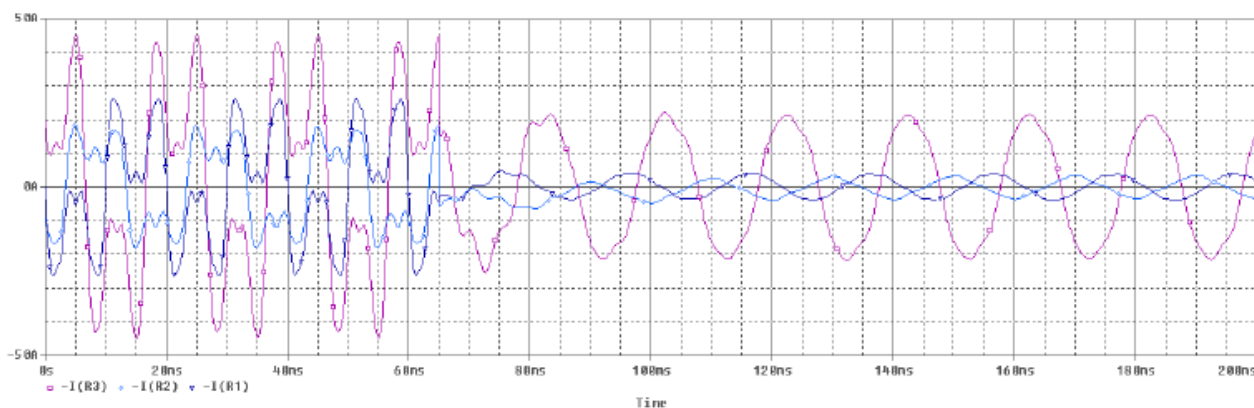


б) споживання при несиметричному навантаженні

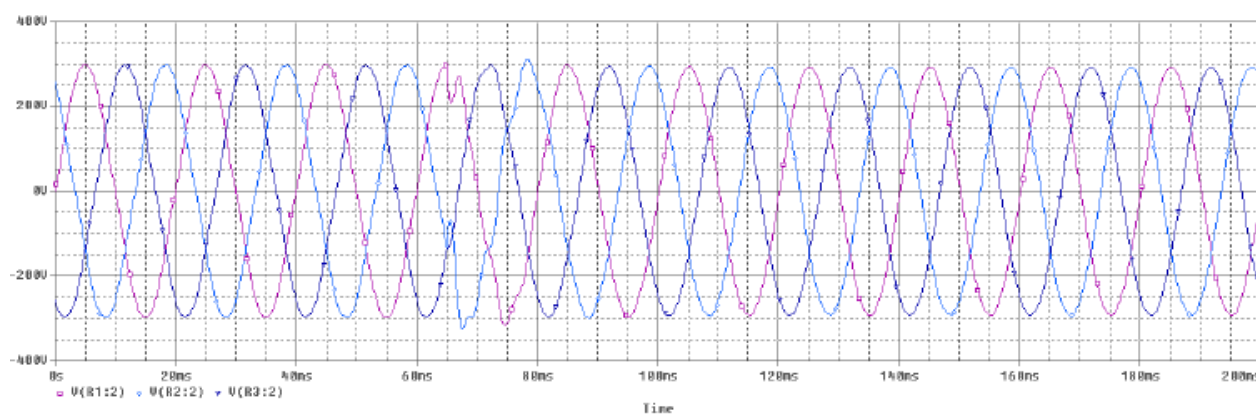
Рисунок 3.13 – Осцилограми струму

Осцилограми кривих струму демонструють, що струм мережі $I(R1)$, $I(R2)$, $I(R3)$ має синусоїдальну залежність у той час, як струм споживання $I(R4)$, $I(R5)$, $I(R6)$ має значні спотворення через вплив гармонійних складових струму емісії.

Комутаційні процеси при несиметричному навантаженні також вимагають аналізу, оскільки вони можуть викликати перенапруги в електромережах. На рисунках 3.14, а та 3.14, б приведено перехідний процес при одночасному включенні фільтрів аналіз яких показав, що процес зміни струму припинився через 35 мс (від 65 мс до 100 мс), зміни напруги через – 30 мс (від 65 мс до 95 мс).



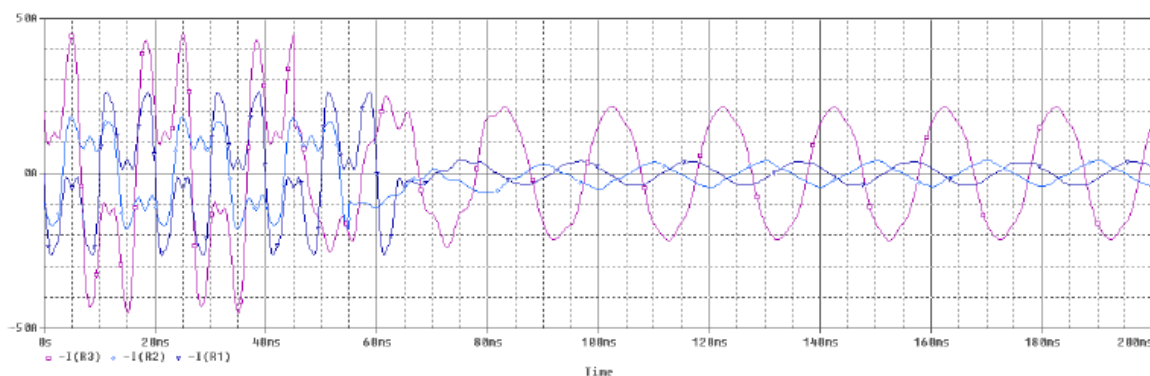
а) осцилограма зміни струму



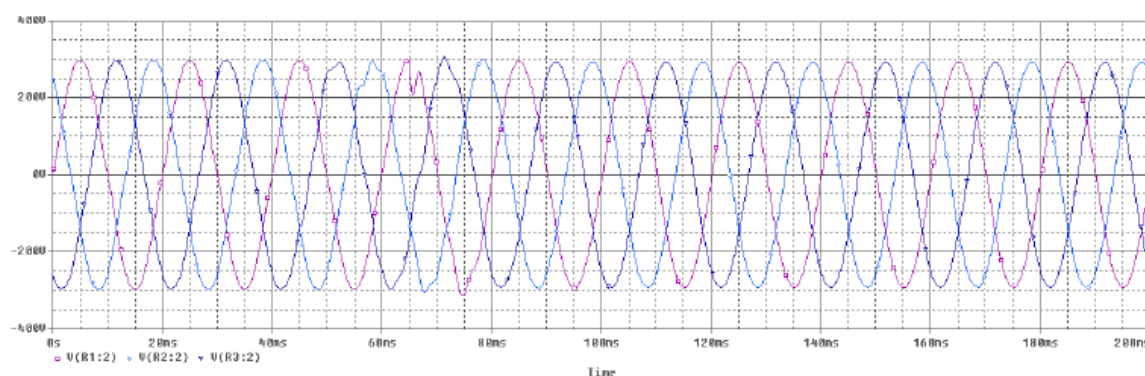
б) осцилограма зміни напруги

Рисунок 3.14 - Осцилограми перехідного процесу при одночасному включенні фільтрів та несиметричному навантаженні

На рис. 3.15, а та 3.15, б продемонстровано перехідний процес при неодноразовому включенні фільтрів. Аналіз показав, що перехідний процес струму тривав 40 мс (від 45 мс до 85 мс), а напруги – 50 мс (від 45 мс до 95 мс).



а) осцилограма зміни струму



б) осцилограма зміни напруги

Рисунок 3.15 – Осцилограми перехідного процесу при неодноразовому (А: 65 мс, В: 55 мс, С: 45 мс) включенні фільтрів та несиметричному навантаженні

На базі цієї моделі мережі виконано визначення допустимої кратності несиметрії, коли 3-я гармоніка рівна 5% основної гармоніки [28]. На рис. 3.16 приведено спектр струму при 2-кратній несиметрії (фаза: А = 15 А, В = 15 А, С = 30 А). Гармоніка 0-ї послідовності частотою 150 Гц рівна 1,7% від основної гармоніки.

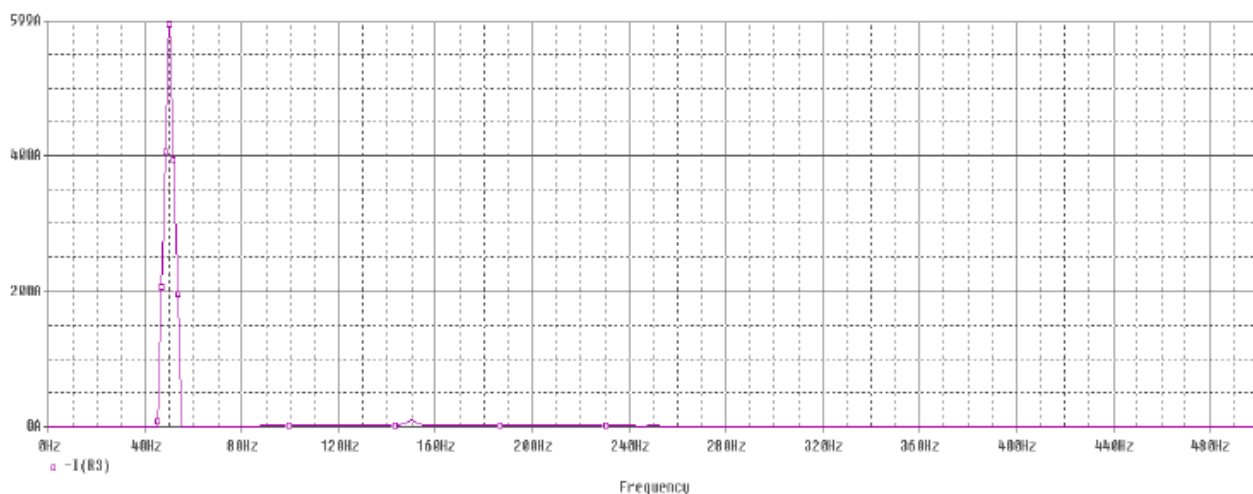


Рисунок 3.16 - Осцилограма спектру струму мережі при 2-кратній несиметрії

На рис. 3.17 приведено спектр струму при 6-кратній несиметрії (фаза: A=15 A, B = 15 A, C = 30 A). Гармоніка 0-ї послідовності частотою 150 Гц рівна 6% від основної гармоніки.

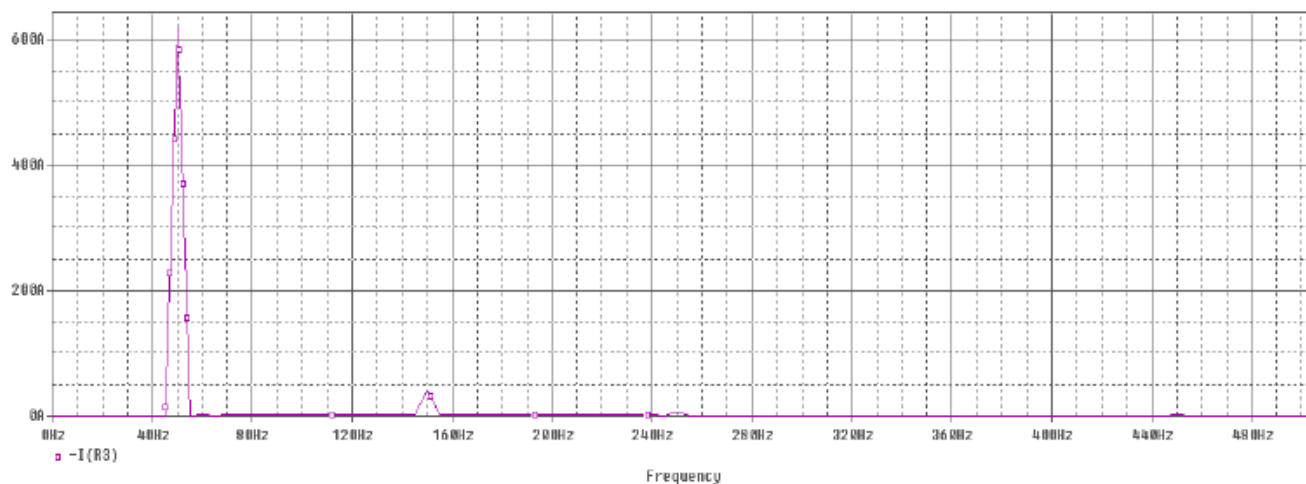


Рисунок 3.17 - Осцилограма спектру струму мережі при 6-кратній несиметрії

На рис. 3.18 приведено струм споживання світлодіодного освітлення залізничного моста Тернопільської залізниці по вул. Руська. Характер струму визначається впливом 3, 5, 7 і 9 гармонік, які є домінуючими складовими струму споживання. При моделюванні спектрального складу за основу було взято відносні значення гармонік, які отримали експериментальним шляхом (табл. 3.3).

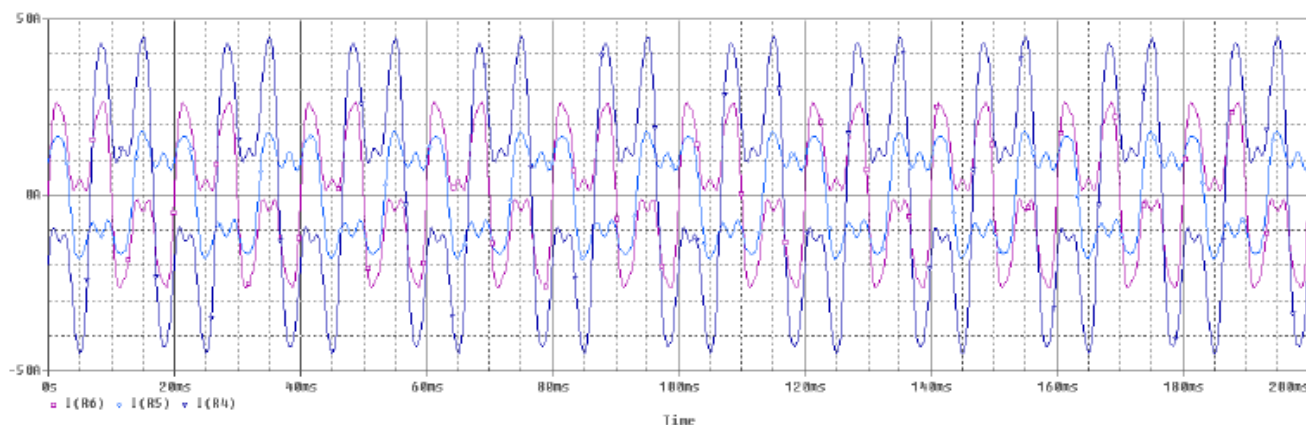


Рисунок 3.18 - Модель струму споживаного струму
в системі освітлення залізничного моста

Таблиця 3.3 - Значення гармонік при несиметричному навантаженні

№ гармоніки	Амплітуда відносно основної гармоніки			Частота, Гц	Генератор частоти
	A (15A)	B (15A)	C (30A)		
1	1	1	1	50	IA1
3	1,2	0,58	0,9	150	IA3
5	0,35	0,27	0,25	250	IA5
7	0,02	0,06	0,04	350	IA7
9	0,18	0,08	0,07	450	IA9

При моделюванні струму споживання (рис. 3.18) освітлення залізничного моста Тернопільської залізниці з використанням 4-променевих фільтрів струм мережі зберіг синусоїдальну форму (рис. 3.19), що підтверджується діаграмою частот (рис. 3.17).

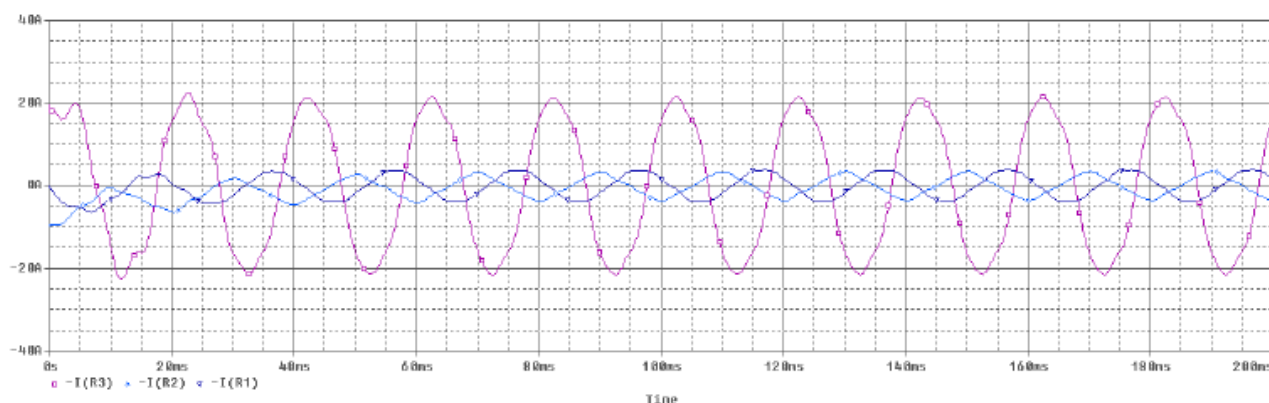


Рисунок 3.19 - Струм у мережі живлення освітлення залізничного моста

В результаті проведених досліджень, яких виконані у другому розділі кваліфікаційної роботи, були виявлені характерні гармоніки освітлювальних мереж - 3, 5, 7 та 9 порядків. Виконаний аналіз демонструє, що у 3-фазних мережах найкраще застосовувати чотирипроменеві пасивні фільтри гармонік, оскільки рівень фільтрації гармонійних складових дозволяє забезпечити значне зниження несинусоїдності струму живлення та поліпшити якість електропостачання мереж з нелінійним споживанням.

Для визначення усталеності робочої характеристики при нестабільності значень елементів фільтра від зовнішніх впливів (на рівні 3%) було виконано

моделювання за методом Монте-Карло. На рис. 3.20 показано діапазон зміни АЧХ фільтра при зміні параметрів елементів на 3%.

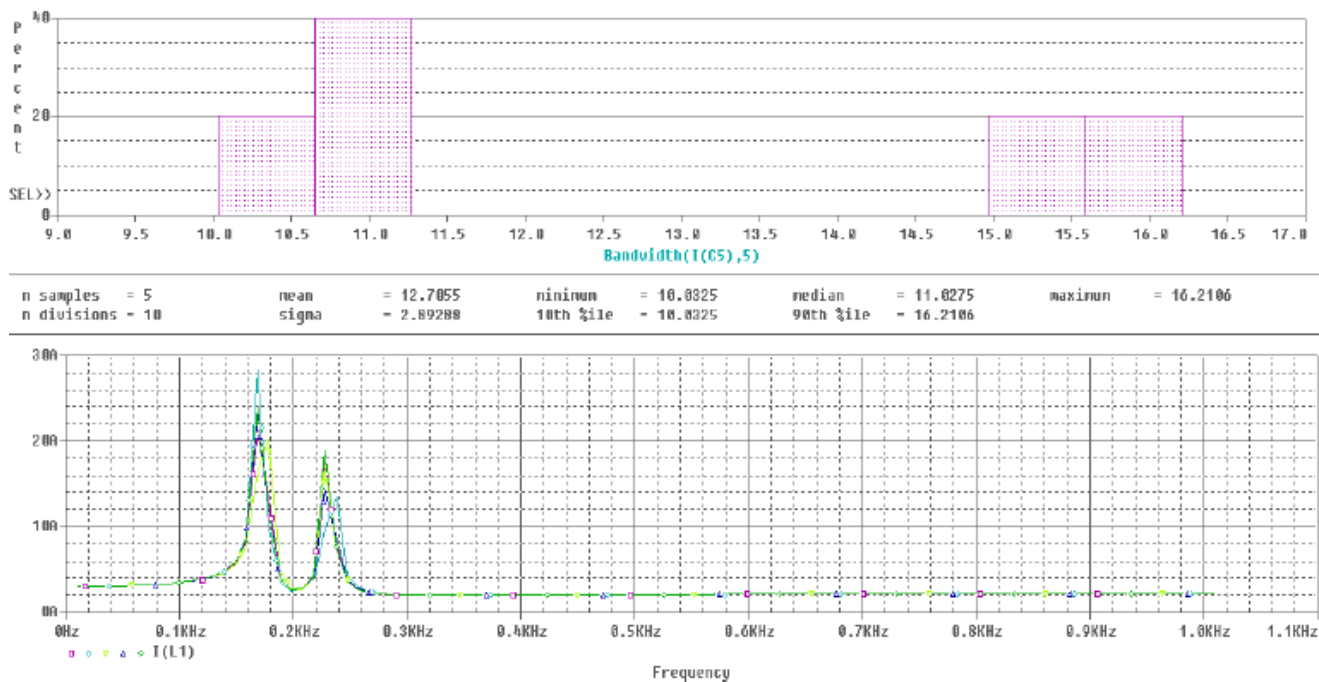


Рисунок 3.20 – Осцилограма діапазону зміни АЧХ

Для того, щоб оцінити надійність 4-променевого фільтра, виконано розрахунок величини напрацювання на відмову залежно від конструктивного виконання.

3.2 Розрахунок надійності фільтрокомпенсуючого пристрою

Для оцінки показників надійності фільтрокомпенсуючих пристроїв доцільно використовувати рекомендації «Основи теорії надійності, контролю та діагностування засобів вимірювальної техніки» [34]. Згідно до цієї методикою розрахунок здійснюється методом λ -характеристик, що базуються на інтенсивності відмов комплектуючих виробів, поправочних коефіцієнтах та врахуванні реальних умов і режимів експлуатації. При цьому беруть до уваги наступні припущення:

- відмови комплектуючих виробів є випадковими незалежними подіями;
- одночасно два і більше комплектуючі вироби не відмовляють;
- інтенсивність відмов комплектуючих виробів під час роботи в подібних робочих режимах та умовах експлуатації є постійною.

Інтенсивність відмов блоку з m комплектуючих виробів можна визначити за наступною формулою:

$$\Lambda = \sum_1^m \lambda_i, \quad (3.1)$$

де λ_i – значення інтенсивності відмов i -го комплектуючого виробу в робочих режимах та умовах.

Середнє напрацювання блоку на відмову можна визначити за формулою:

$$T = \frac{1}{\Lambda}. \quad (3.2)$$

Інтенсивність відмов комплектуючого виробу можна визначити як

$$\lambda_i = \lambda_0 \cdot a_1 \cdot a_2 \cdot \dots \cdot a_n,$$

де λ_0 – інтенсивність відмов комплектуючого виробу в нормальних режимах та умовах експлуатації;

$a_1, a_2, \dots, a_n$ – значення поправочних коефіцієнтів.

Значення λ_0 та поправочні коефіцієнти можна за таблицями, які приведені в посібнику [34].

Фільтрокомпенсуючий пристрій має в своєму складі такі блоки:

- блок керування струмом (рис. 3.21);

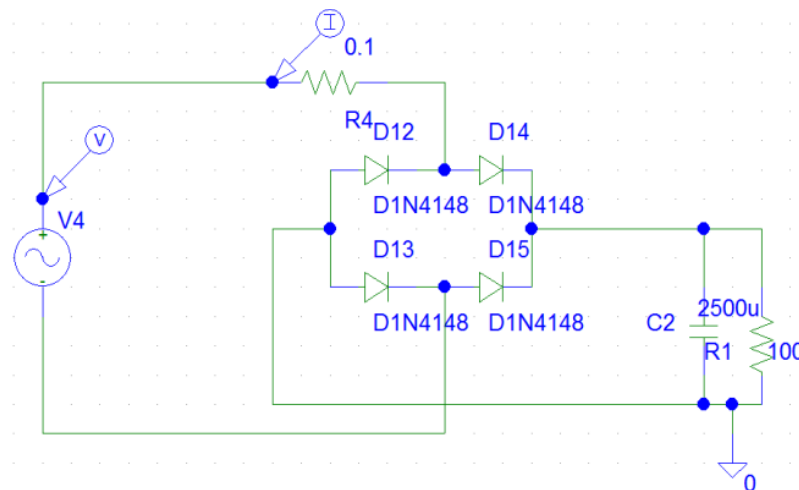


Рисунок 3.21 – Схема блоку керування струмом

- блок фільтрації (однофазний – рис. 3.22 і трифазний - рис. 3.23).

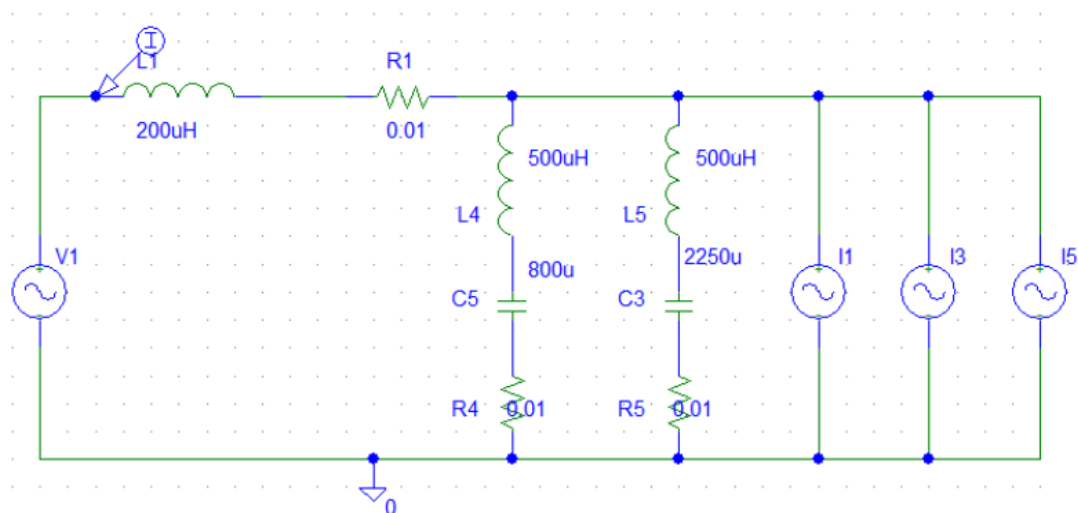


Рисунок 3.23 – Схема однофазного блоку фільтрації

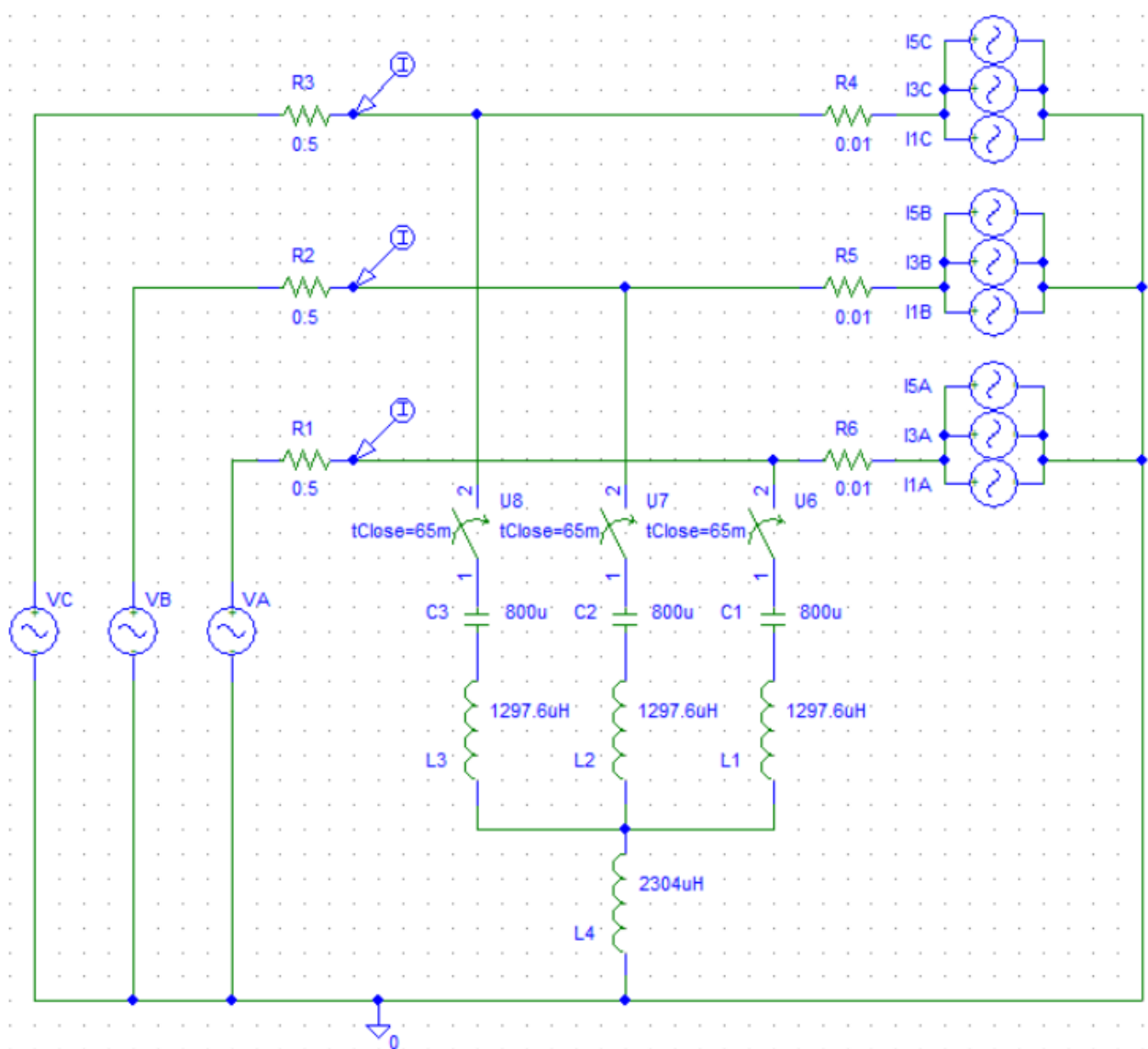


Рисунок 3.24 – Схема трифазного блоку фільтрації

Блок управління струмом складається з конденсатора, 2 резисторів, 4 діодів та 8 пайок, які забезпечення надійне послідовне з'єднання. Блок фільтрації

однофаз-ний складається з 5 дроселів, 5 конденсаторів, 5 резисторів і 10 болтових з'єднань, а трифазний – з 4 дроселів, 3 конденсаторів та 8 болтових з'єднань, які також забезпечують надійне послідовне з'єднання.

Час активної роботи фільтрокомпенсуючого пристрою за добу становить 12 годин, коефіцієнт навантаження елементів $K_n = 0,7$, умови експлуатації – поле з коефіцієнтом 1,0, клімат – холодний із коефіцієнтом 1,0, якість обслуговування – керування агрегатами з коефіцієнтом 2.

Загальний коефіцієнт поправки: $a = 0,7 \cdot 1,0 \cdot 1,3 \cdot 2 = 1,82$.

Інтенсивність відмов блоку керування струмом:

діоди - $0,1 \cdot 10^{-6} \cdot 4 = 0,4 \cdot 10^{-6}$,

резистори - $0,008 \cdot 10^{-6} \cdot 2 = 0,016 \cdot 10^{-6}$,

конденсатор - $0,3 \cdot 10^{-6} \cdot 1 = 0,3 \cdot 10^{-6}$,

пайки - $0,001 \cdot 10^{-6} \cdot 8 = 0,008 \cdot 10^{-6}$.

Разом: $0,724 \cdot 10^{-6} \cdot 1/\text{год.}$

Разом с урахуванням коефіцієнт поправки

$$\Lambda_1 = 1,82 \cdot 0,724 \cdot 10^{-6} = 1,32 \cdot 10^{-6} \cdot 1/\text{год.}$$

Напрацювання на відмову становить $T = \frac{10^6}{1,32} = 0,76 \cdot 10^6 \text{ годин.}$

Інтенсивність відмов однофазного блоку фільтрації:

індуктивності - $0,15 \cdot 10^{-6} \cdot 5 = 0,75 \cdot 10^{-6}$,

конденсатори - $0,15 \cdot 10^{-6} \cdot 5 = 0,75 \cdot 10^{-6}$,

болтові з'єднання - $0,1 \cdot 10^{-6} \cdot 10 = 1,0 \cdot 10^{-6}$.

Разом: $2,5 \cdot 10^{-6} \cdot 1/\text{год.}$

Разом с урахуванням коефіцієнт поправки

$$\Lambda_2 = 1,82 \cdot 2,5 \cdot 10^{-6} = 4,55 \cdot 10^{-6} \cdot 1/\text{год.}$$

Напрацювання на відмову становить $T = \frac{10^6}{4,55} = 0,22 \cdot 10^6 \text{ годин.}$

Інтенсивність відмов трифазного блоку фільтрації:

індуктивності - $0,15 \cdot 10^{-6} \cdot 4 = 0,6 \cdot 10^{-6}$,

конденсатори - $0,15 \cdot 10^{-6} \cdot 3 = 0,45 \cdot 10^{-6}$,

болтові з'єднання - $0,1 \cdot 10^{-6} \cdot 8 = 0,8 \cdot 10^{-6}$.

Разом: $1,95 \cdot 10^{-6} \cdot 1/\text{год.}$

Разом с урахуванням коефіцієнт поправки

$$\Lambda_3 = 1,82 \cdot 1,95 \cdot 10^{-6} = 3,55 \cdot 10^{-6} \cdot 1/\text{год.}$$

Напрацювання на відмову становить $T = \frac{10^6}{3,55} = 0,28 \cdot 10^6 \text{ годин.}$

Інтенсивність відмов фільтрокомпенсуючого пристрою з блоком керування струмом та однофазним блоком фільтрації:

$$\Lambda = \Lambda_1 + \Lambda_2 = 1,32 \cdot 10^{-6} + 4,55 \cdot 10^{-6} = 5,87 \cdot 10^{-6} \cdot 1/\text{год.}$$

Напрацювання на відмову: $T = \frac{1}{\Lambda} = \frac{10^6}{5,87} = 170358 \text{ годин}$ або 19 років.

Інтенсивність відмов фільтрокомпенсуючого пристрою з блоком керування струмом та трифазним блоком фільтрації:

$$\Lambda = \Lambda_1 + \Lambda_3 = 1,32 \cdot 10^{-6} + 3,55 \cdot 10^{-6} = 4,87 \cdot 10^{-6} \cdot 1/\text{год.}$$

Напрацювання на відмову: $T = \frac{1}{\Lambda} = \frac{10^6}{4,87} = 205339 \text{ годин}$ або 23 роки.

В результаті наближених розрахунків надійності фільтрокомпенсуючого пристрою на початковому етапі було виявлено, що напрацювання на відмову в залежності від конструктивного виконання становить від 19 до 23 років, що співрозмірно з терміном служби основного електроустаткування систем електропостачання. Коефіцієнти навантажень елементів блоків рекомендується встановлювати не більше прийнятих під час розрахунків надійності значень.

3.3 Висновок до розділу 3

1. Проведені моделювання амплітудно-частотних характеристик 4-променевих частотних фільтрів показали, що вони забезпечують необхідну якість фільтрації вищих гармонік.

2. Проведені моделювання також продемонстрували, що фільтруючі властивості 4-променевих частотних фільтрів зберігаються на однаковому рівні при симетричному та несиметричному навантаженні.

3. Змодельоване 6-разове несиметричне навантаження є граничним за рівнем допустимого вмісту гармонік, які кратні трьом.

4. Результати моделювання підтверджують, що 4-променева структура частотного фільтра має високу стабільність робочої характеристики при зміні параметрів від впливу зовнішніх факторів.

5. Проведені розрахунки засвідчили, що напрацювання на відмову 4-променевої структури є більшою у порівнянні з традиційною однолінійною.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1 Охорона праці як складова безпеки життєдіяльності

Умови та безпека праці, їх стан та покращення – самостійна і важлива задача соціальної політики будь-якої сучасної промислово розвинутої держави, яку вирішує така невід’ємна складова БЖД, як охорона праці. Рівень безпеки будь-яких робіт у суспільному виробництві значною мірою залежить від рівня правового забезпечення цих питань, тобто від якості та повноти викладення відповідних вимог в законах та інших нормативно-правових актах [36].

Для вирішення існуючих проблем в сфері охорони праці необхідна ефективна взаємодія всіх органів державної влади та громадськості, а також реалізація як на державному, так і на місцевих рівнях відповідних програм, спрямованих на корінне покращення умов і охорони праці.

Реалізація цих програм дозволить розробити і впровадити науково обґрунтовану державну систему наглядової, навчально-методичної та контрольної діяльності у сфері охорони праці; адаптувати нормативно-правову базу з питань охорони праці до вимог директив Європейського Союзу; вирішити питання науково-методичного та інформаційного забезпечення з питань охорони праці на національному та регіональному рівнях та багато іншого, що дозволить здійснити комплексне вирішення задач охорони праці, забезпечити пріоритет життя і здоров’я працюючих по відношенню до результатів виробничої діяльності і створити безпечні та здорові умови праці на підприємствах і в організаціях усіх форм власності.

Охорона праці водночас вирішує два основних завдання. Одне з них – інженерно-технічне – передбачає запобігання небезпечним подіям під час трудового процесу шляхом [37]:

- заміни небезпечних матеріалів менш небезпечними,
- переходу на нові технології, які зменшують ризик травмування і захворювання;
- проектування і конструювання устаткування з урахуванням вимог безпеки праці;
- розробки засобів індивідуального та колективного захисту.

Друге – соціальне – пов’язане з відшкодуванням матеріальної, моральної чи соціальної шкоди, завданої внаслідок нещасного випадку або професійного захворювання, тобто це захист працівника та його прав.

Виходячи з поставлених перед нею завдань, охорона праці, ґрунтуючись на правових та організаційних основах, вирішує питання виробничої санітарії, виробничої та пожежної безпеки [37].

4.2 Аналіз причин ураження людини електричним струмом

Наслідки ураження людини електричним струмом залежить від ряду факторів, які умовно можна поділити на три групи: фактори електричного характеру, фактори неелектричного характеру і фактори довкілля [38].

Фактори електричного характеру. У випадку отримання електротравми, основним уражаючим фактором є *електричний струм*, що протікає через людину. Від величини (сили) цього струму залежать наслідки ураження. Виділяють наступні порогові значення сили струму, тобто ті мінімальні значення, що викликають певні наслідки:

- поріг чутливості – це мінімальна сила струму, яку людина сприймає у вигляді ледь відчутних подразнень (для змінного струму це значення 0,7-1,5 мА, для постійного – 5-7 мА);
- пороговий невідпускаючий струм – це мінімальна сила струму, що викликає судомне скорочення м’язів, і людина не може самостійно звільнитися від струмовідних частин (для змінного струму це значення 10-15 мА, для постійного – 50-80 мА);
- пороговий фібриляційний струм – це мінімальна сила струму, що викликає фібриляцію серця (для змінного струму це значення 100 мА, для постійного – 300 мА).

Напруга на тілі людини впливає на тяжкість ураження лише в тій мірі, в якій вона визначає силу струму, що протікає через тіло людини.

Опір кола людини. Розглядаючи випадки включення людини в електричне коло (наприклад, дотику людини до струмопровідної частини), бачимо, що

послідовно з опором тіла людини «включені» опори інших елементів: опір одягу, опір взуття і опір опорної поверхні ніг (рис. 4.1) [39].

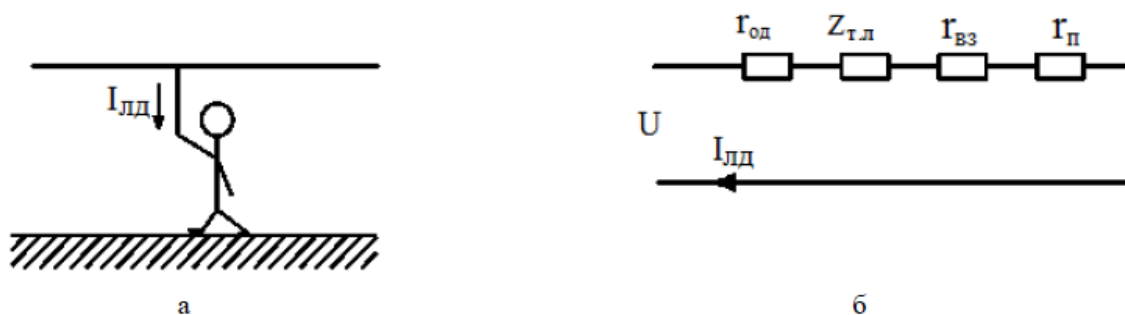


Рисунок 4.1. Схема дотику людини до струмопровідної частини:
а – загальна схема; б – еквівалентна схема: $r_{од}$ - опір одягу, $Z_{тл}$ - опір тіла людини,
 $r_{вз}$ - опір взуття, $r_{оп.п}$ - опір опорної поверхні ніг

Опір одягу «включається» у коло людини, якщо людина дотикається до обладнання під напругою частиною тіла, покритою одягом (наприклад, плечем, рукою у рукавичці чи ін.). Опір одягу залежить від товщини матеріалу та вологості; так, опір сухого одягу має приблизно 3-5 кОм, вологого – до 1 кОм, а мокрого – не враховується. Опір взуття «включається» у коло людини, якщо струм проходить через людину і у землю. Слід враховувати, що опори кожної ділянки підошви взуття «включаються» паралельно, якщо струм протікає так, як показано на рис. 4.1 а, і послідовно, якщо людина попадає під напругу кроку. Опір підошви взуття залежить від матеріалу, товщини і вологості підошви. Дуже високий опір має підошва з гуми та натуральної шкіри. Суха підошва має опір до 20 кОм, волога – декілька кОм, опір мокрої підошви не враховується.

Опір опорної поверхні ніг – це опір підлоги чи ґрунту, на яких стоїть людина. Опір опорної поверхні ноги на дерев'яній підлозі сягає 3-5 кОм, а підлоги з інших матеріалів, крім неспеціальних, мають менший опір. Опір опорної поверхні ніг на ґрунті теж залежить від виду, вологості і розміщення ніг на ґрунті та визначається залежностями:

- однієї ноги на ґрунті – $r_{гр.1}=3,1\rho$;
- двох ніг, «включених паралельно» і розміщених поряд – $r_{гр.2}= 2,2\rho$;
- те ж саме, розміщених на відстані кроку – $r_{гр.2}=1,6\rho$;
- двох ніг, «включених послідовно» – $r_{гр.2}= 6,2\rho$,

де ρ – питомий опір ґрунту, Ом·м.

Опір тіла людини. Тіло людини являє собою складний комплекс тканин, електричні параметри яких розрізняються у широкому діапазоні. Найбільшу провідність має кров, м'язи, мозок, а найменшу – шкіра, кістки, жирова тканина. Прийнята еквівалентна схема електричного опору тіла людини складається з двох послідовно сполучених складових: опору шкіри і опору внутрішніх органів. Опір шкіри представляється у вигляді двох складових: активного і ємнісного опорів ($R_{\text{шк}}$ і $C_{\text{шк}}$) сполучених паралельно, а опір внутрішніх органів – тільки у вигляді активного опору ($R_{\text{вн}}$), тобто характер електричного опору тіла людини є активно-ємнісним. Опір шкіри залежить від її стану, щільності та площі контактів, прикладеної напруги, сили струму та тривалості протікання цього струму. Найбільший опір має суха чиста непошкоджена шкіра. Збільшення площі та щільності контактів зі струмопровідними частинами зменшує опір шкіри. Зі збільшенням прикладеної напруги опір шкіри зменшується у результаті пробоя верхнього шару. Збільшення величини струму або тривалості його протікання зумовлює збільшення нагріву верхнього шару шкіри і потовиділення у місці контакту, що також зменшує електричний опір шкіри. Ємність шкіри залежить від площі контакту і складає близько 0,02 мкФ/дм².

Опір внутрішніх органів також має активно-ємнісний характер, але ємнісна складова незначна і нею можна знехтувати. Опір активної складової залежить в основному, від прикладеної напруги і складає 600-300 Ом. Зі збільшенням напруги загальний опір тіла зменшується. Опір тіла людини залежить від статі і віку людей: у жінок цей опір менший, ніж у чоловіків; у дітей менший, ніж у дорослих; у молодих людей менше, ніж у людей у віці.

Оскільки опір тіла людини електричному струму є *нелінійним і нестабільним*, а проводити розрахунки з такими опорами достатньо складно, прийнято вважати для наближених розрахунків, що опір тіла людини електричному струму – величина стабільна, лінійна і складає 1000 Ом (рис. 4.2). Це відповідає більшості випадків включення людини у електричне коло (близько 150 В).

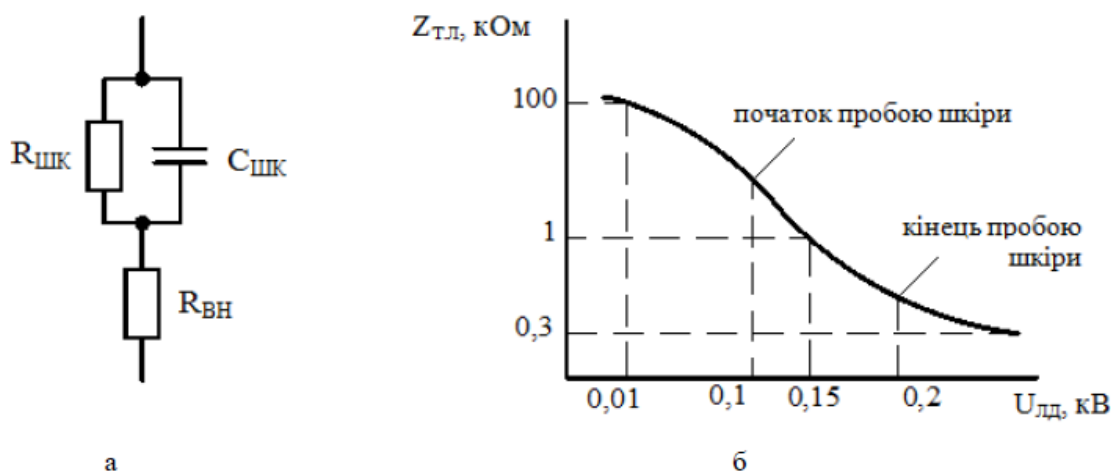


Рисунок 4.2. Електричний опір тіла людини:

а - еквівалентна електрична схема ($R_{шк}$ і $C_{шк}$ – активний опір і ємність шкіри відповідно; $R_{вн}$ – опір внутрішніх органів); б – залежність величини опору тіла людини від напруги, прикладеної до людини

Вважається, що постійний струм, який проходить через тіло людини, порівняно зі змінним, викликає менш неприємні відчуття (справедливо для напруг до 300 В). Із збільшенням напруги небезпека постійного струму зростає і в інтервалі напруг 400-600 В практично дорівнює небезпеці змінного струму з частотою 50 Гц, а за напруг понад 600 В навіть перевищує її (рис. 4.3 а).

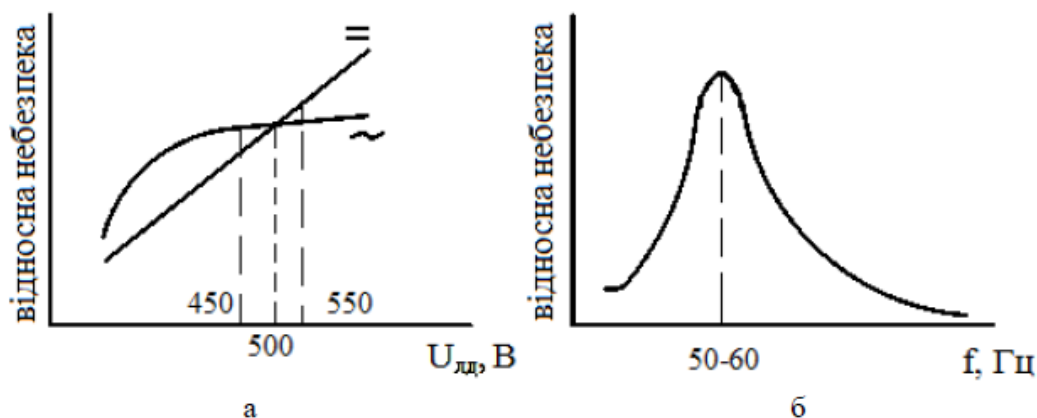


Рисунок 4.3. Залежність небезпеки ураження людини електрострумом від:
а – виду струму; б – частоти змінного струму

Частота змінного струму. Найбільш небезпечними для людини є струми з частотою 20-200 Гц (рис. 4.3 б). Із зменшенням чи підвищенням частоти небезпека зменшується і зовсім зникає за частоти 450 кГц та вище. Найбільш небезпечним вважається струм з частотою 50-60 Гц (промислові частоти) через те, що деякі внутрішні органи мають власні частоти коливання у цьому діапазоні, і протікання таких струмів може викликати резонансні явища.

4.3 Заходи безпеки життєдіяльності в електроустановках

З метою забезпечення нормальних умов праці і життєдіяльності технічного персоналу та студентів при використанні технічних в системи міського зовнішнього освітлення були застосовні такі технічні захисні заходи: мала напруга, контроль пошкодження ізоляції, забезпечення недоступності струмопровідних частин, захисне заземлення і занулення, подвійна ізоляція і захисне відключення [40].

Мала напруга - це напруга не більше 42 В між фазами і відносно землі, що застосовується для зменшення небезпеки ураження електричним струмом. У виробничих умовах ПУЕ передбачають застосування двох малих напруг 12 і 36 або 42 В [41]. Напруга до 42 В включно повинна застосовуватися в приміщеннях з підвищеною небезпекою і особливо небезпечних для живлення таких електроприймачів: ручних електрифікованих інструментів без подвійної ізоляції, переносних ламп, світильників місцевого стаціонарного освітлення з лампами розжарювання, світильників загального освітлення звичайної конструкції з лампами розжарювання, розміщених над підлогою на висоті менше 2,5 м. Напруга до 12 В повинна застосовуватися для живлення ручних переносних ламп в особливо небезпечних приміщеннях при особливо несприятливих умовах роботи: в обмежених умовах або при зіткненні працюючого з великими металевими заземленими конструкціями.

Електрична ізоляція - це шар діелектрика або конструкція, виконана з діелектрика, якими покривають поверхні струмопровідних елементів або якими струмопровідні елементи відокремлюють від інших частин. В електроустановках застосовують такі види ізоляції [42]:

робоча ізоляція - електрична ізоляція струмопровідних частин електроустановки, що забезпечує її нормальну роботу і захист від ураження електричним струмом;

додаткова ізоляція - електрична ізоляція, передбачена додатково до робочої ізоляції для захисту від ураження електричним струмом на випадок пошкодження робочої ізоляції;

подвійна ізоляція - електрична ізоляція, що складається з робочої та додаткової ізоляції;

посилена ізоляція - поліпшена робоча ізоляція, що забезпечує таку ж ступінь захисту від ураження електричним струмом, як і подвійна ізоляція.

Блокування безпеки - це пристрої, що запобігають потраплянню технічного персоналу і студентів під напругу внаслідок помилкових дій. В кваліфікаційній роботі було використано електричне і електромагнітне блокування.

Електричне блокування застосовується в технологічних електроустановках напругою до 1000 В і випробувальних стендах при будь-яких напругах. Блокування відключає напругу від електроустановки при відкриванні дверей огорожень і дверцят кожухів або при знятті кришок. Для відключення напруги служать блокувальні контакти, які можуть включатися безпосередньо в силове коло або в коло управління пускового апарату, якщо управління електроустановкою дистанційне.

Електромагнітне блокування (ЕМБ) вимикачів, роз'єднувачів і заземлювальних ножів широко застосовується при різних схемах з'єднання обладнання і забезпечує певну послідовність включення і відключення цих апаратів. ЕМБ дозволяє виключити виникнення небезпечних ситуацій: включення або відключення роз'єднувача під навантаженням, включення заземлювальних ножів на ділянку лінії під напругою, подачу напруги на заземлений ділянку лінії.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

В кваліфікаційній роботі вирішена актуальна наукова задача – проведено схемотехнічне дослідження якості електроенергії в мережах з нелінійними електро-приймачами. За результатами проведених в кваліфікаційній роботі досліджень та розрахунків були отримано наступні результати.

1. Активний та масовий перехід до застосування електроприймачів з нелінійними вольтамперними характеристиками визначає необхідність застосування пристроїв для підвищення електромагнітної сумісності елементів електромережі.

2. Проведені експериментальні дослідження якості електроенергії в системах електропостачання електроспоживачів різного функціонального призначення з переважанням освітлювального навантаження показали наявність вищих гармонік великої потужності, що істотно знижують коефіцієнт синусоїдальності струму та напруги в мережі живлення.

3. Виконані дослідження показали, що для забезпечення необхідної якості електроенергії в системах електропостачання з нелінійними вольтамперними характеристиками доцільно застосовувати пасивний фільтр за схемою 4-променевої зірки, яка дозволяє частково компенсувати реактивну потужність мережі.

4. Запропоновано алгоритм методики визначення оптимального порядку фільтра за умовами допустимого рівня гармонік, що імітуються в мережу навантаженням.

5. Проведена оцінка надійності фільтрокомпенсуючих пристроїв показала, що запропоновані схемні рішення у вигляді пасивних фільтрів не знижують загальної надійності систем електропостачання та забезпечують достатнє напруження на відмов.

7. Результати виконаних досліджень можна використати при модернізації системи освітлення Тернопільської залізниці, мережі супермаркетів «АТБ», а також у навчальному процесі студентів ТНТУ ім І. Пулюя, які навчаються за напрямом «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Бурбело, М. Й. Електромагнітна сумісність і керування якістю електроенергії в системах електропостачання : електронний навчальний посібник комбінованого (локального та мережного) використання / Бурбело М. Й. – Вінниця : ВНТУ, 2023. – 159 с.
2. Про внесення змін до деяких законів України щодо розвитку установок зберігання енергії» (15 лютого 2022 року). [Електронний ресурс]. – URL: <https://www.rada.gov.ua/news/razom/221882.html> (дата звернення 23.02.2025)
3. План розвитку об'єднаної енергосистеми України на 2017–2026 рр. [Електронний ресурс]. – URL: <https://ua.energy/wp-content/uploads/2016/12/Proekt-Planu-rozvytku-OES-Ukrayiny-na-2017-2026-roky.pdf>. (дата звернення 23.02.2025)
4. «Укренерго». План розвитку системи передачі на 2020–2029 роки. [Електронний ресурс]. – URL: <https://ua.energy/wp-content/uploads/2019/11/Plan-rozvytku-systemy-peredachi-na-2020-2029-roky-.pdf>. (дата звернення 23.02.2025)
5. Переваги та недоліки світлодіодного освітлення. [Електронний ресурс].– URL: <https://ua.benweilighting.com/info/advantages-and-disadvantages-of-led-lighting-84522376.html> (дата звернення 23.02.2025)
6. Єгорова О.Ю. Перспективи використання світлодіодних джерел світла / О.Ю. Єгорова, О.О. Аблецов // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних сил. — 2010. — Вип. 3. — С. 152—156
7. Оробчук Б., Євтух П., Рафалюк О., Піскун С. Інтелектуальна система керування вуличним освітленням міста // Збірник праць ТО НТШ. Видавництво ТОВ «Джура». – Тернопіль, 2012. - С.164-173
8. Оробчук Б., Балящук О. Дослідження стану якості електричної енергії за відхиленням напруги // Збірник тез доповідей XIII Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених та студентів „Актуальні задачі сучасних технологій“. М-во освіти і науки України, Терн. націон. техн. ун-т ім. І. Пулюя [та ін.]: ТНТУ, 2024.- С. 275-276
9. Лупенко А.М., Лацік І.Б. Комбінований коректор коефіцієнта потужності / Матеріали XIX наукової конференції ТНТУ ім. І. Пулюя, 2016

10. Оробчук Б., Соловко А. Система управління регулятором якості електроенергії. VII Міжнародна науково-технічна конференція молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій» – Тернопіль, ТНТУ ім. Івана Пулюя, 2018 р.
11. Галат, О. Б., Романенко, О. О. (2020) Дослідження світлодіодної системи освітлення // IV International Scientific and Practical Conference «Priority directions of science and technology development». Kyiv - 20-22 December, 2020. - Pp. 347-349
12. How to Successfully Implement a National LED Lighting Upgrade Program. [Електронний ресурс]. – URL: <https://chateaux.com/elements-of-a-successful-national-led-lighting-program/> (дата звернення 25.02.2025)
13. Міжнародна програма використання світлодіодів для освітлення міських вулиць і приміщень «LEDCity». [Електронний ресурс]. – URL: <http://www.magazinesvet.u/analytics/33195/> (дата звернення 25.02.2025)
14. Компанія «Філіпс» – Нідерланди. [Електронний ресурс]. – URL: http://www.newscenter.philips.com/ua/standard/about/news/pressreleases_2010/Article-2010-04-20.wpd (дата звернення 25.02.2025)
15. Сорокін, В.М. (Ред.). (2016) Енергоефективні світлодіодні освітлювальні системи, НАН України, Ін-т фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова. Київ: Авіцена.
16. Аналіз ринку світлодіодного освітлення України. 2020 рік. [Електронний ресурс]. – URL: <https://pro-consulting.ua/ua/> (дата звернення 26.02.2025)
17. Захаренко О.О., Чернишов В.Г., Коротинський О.Є., Свириденко А.О. Освітимо Україну по-новому. Техніко-економічна ефективність впровадження світлодіодних світильників // Коллега. — 2010. — № 2. — С. 16—21.
18. Основи електротехніки та електроніки: Джерела вторинного електроживлення [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студентів спеціальності 144 «Теплоенергетика» / КПІ ім. І. Сікорського; уклад. В.П. Грудська, О.М. Скринник – Київ : КПІ ім. І. Сікорського, 2020. – 120 с.

19. Оробчук Б., Розмірчук О. Система моніторингу якості електроенергії на базі навчального тренажера. Світлотехніка й електроенергетика: історія, проблеми, перспективи: зб. тез доповідей міжн. наук.-техн. конф., (Тернопіль, 29-31 травня 2024) // М-во освіти і науки України, Терн. націон. техн. ун-т ім. І. Пулюя [та ін.]: ТНТУ, 2024.
20. Джерела безперебійного живлення. [Електронний ресурс]. – URL: <http://www.sven.fi/ua/press/publications/detail.php?id=6925> (дата звернення 26.02.2025)
21. ГОСТ 13109-97. Електрична енергія. Сумісність технічних засобів електромагнітна. Норми якості електричної енергії в системах електропостачання загального призначення.
22. Волошко А. В., Філянин Д. В. Визначення джерел гармонічних спотворень в точці загального підключення на прикладі спрощеної моделі розподільної мережі. Енергетика: економіка, технології, екологія. 2015. №1. С. 35–43.
23. Деменчук Е.В., Шайда В.П., Шилкова Л.В., Юр'єва О.Ю. Дослідження впливу вищих гармонік струму в мережі живлення на роботу асинхронних двигунів з використанням приладів діагностики // ISSN 0235-3474. Техн. Діагностика та неруйнівний контроль, 2021, №2.
24. Chaladying S., Charlangsut A., Rugthaichareoncheep N. Вплив паралельного резонансу на поліпшення коефіцієнта потужності в енергосистемі з гармонійними спотвореннями. TENCON 2015 - 2015 IEEE Region 10 Conference, Macao, 2015, ст. 1-5
25. Власенко Р. Порівняння методів компенсації неактивної потужності трифазним силовим активним фільтром з адаптивним релейним регулятором струму / Р. Власенко, О. Бялобржеський // Електротехніка та електроенергетика. – 2014. – № 2. – С. 20-27.
26. Якість електроенергії та її вплив на електроспоживання і надійність роботи електроустаткування // Patriot-NRG. Міжнародний портал з енергозбереження [Веб-сайт]. - Київ. URL: <https://patriotnrg.com/content/yakist-elektroenergiyi-ta-yiyi-vplyv-na-elektrospozhyvannya-inadiynist-roboty> (дата звернення: 08.03.2025).

27. Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності: ДСТУ EN 50160:2014 [Чинний з 1.10.2014]. К.: Держстандарт України, 2014. 27 с.
28. ГОСТ Р 51317.4.30-2008 (МЭК 61000-4-30:2008). Електромагнітна сумісність (ЕМС) [Текст] / Частина 4-30. Методи випробувань та вимірювань. Методи вимірювання якості електричної енергії, 2008. – 59 с.
29. Оробчук Б., Прокопчук В. Бартошевський Р. Методи зниження втрат електричної енергії в розподільчих мережах. Актуальні задачі сучасних технологій: зб. тез доповідей міжнар. наук.-техн. конф. молодих учених та студентів, (Тернопіль, 6-7 грудня 2023) // М-во освіти і науки України, Терн. націон. техн. ун-т ім. І. Пулюя [та ін.]: ТНТУ, 2023
30. Світильники зі світлодіодними джерелами світла. Загальні технічні умови. ДСТУ 8546:2015
31. Бондаренко В.М., Бондаренко Н.О. Моделювання радіоелектронних кіл. Навчальний посібник // Київ. - КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022.
32. IPS [Електронний ресурс]. – URL: www.intas-electro.ua (дата звернення: 13.03.2025)
33. Current Harmonics Cancellation in Three-Phase Four-Wire Systems by Using a Four-Branch Star Filtering Topology // IEEE transactions on Power Electronics. – 2009. – Vol. 24. – No. 8. – P. 1939–1950.
34. Основи теорії надійності, контролю та діагностування засобів вимірювальної техніки: Навч. посібник/ Ю.П. Белокурський, та ін; за ред. А.Б. Єгорова. Х: ХНУРЕ, 2011. – 174с.
35. Оробчук Б., Антонюк К. Вибір методів підвищення ефективності електропостачання на промислових підприємствах. VII Міжнародна науково-технічна конференція молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій» – Тернопіль, ТНТУ ім. Івана Пулюя, 2018 р.
36. Закон України «Про охорону праці». <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/>
37. Ткачук К.Н., Зацарний В.В., Третьякова Л.Д., Мітюк Л.О. Охорона праці і промислова безпека: навчальний посібник. Київ: Лібра, 2010. - 425 с.

38. Кухаровський П. П. Електробезпека на виробництві та в побуті. Хмельницький: [б.в.], 2007. 240 с.
39. Серіков Я.О. Основи охорони праці: Навчальний посібник для студентів вищих закладів освіти. - Харків, ХНАМГ, 2007. - 227 с.
40. Методичний посібник для здобувачів освітнього ступеня «магістр» всіх спеціальностей денної та заочної (дистанційної) форм навчання «Безпека в надзвичайних ситуаціях» / В.С. Стручок –Тернопіль: ФОП Паляниця В.А., –156 с.
Отримано з <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/39196>
41. ПУЕ Правила улаштування електроустановок (перше переглянуте, перероблене, доповнене та адаптоване до умов України видання)/ Наказ від 21.07.2017 № 476 Про затвердження Правил улаштування електроустановок
42. Правила експлуатації електрозахисних засобів. Вид. офіц. Київ: Міністерство енергетики, 2002. 46 с.
43. Оробчук Б.Я., Буняк О.А., Бабюк С.М., Сисак І.М., Вакуленко О.О. Методичні вказівки щодо виконання та оформлення дипломної роботи за ступенем «магістр». Тернопіль, ТНТУ імені Івана Пулюя, 2017 р