

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Інститут енергозбереження та енергоменеджменту  
Кафедра електропостачання

«На правах рукопису»  
УДК \_\_\_\_\_

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ В.А. Попов

«\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

## Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

зі спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка спеціалізації Системи електропостачання

на тему: «Підвищення точності визначення показників якості електричної енергії»

Виконав:

студент VI курсу, групи ОЕ-61м

Суржиков Михайло Вікторович \_\_\_\_\_

Керівник:

д.т.н., доц. Волошко А.В. \_\_\_\_\_

Консультант з нормоконтролю:

ас. Прокопенко І.Д. \_\_\_\_\_

Рецензент:

доцент кафедри ЕМОЕВ ІЕЕ

НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського»

к.н.т., доцент Мейта О.В. \_\_\_\_\_

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент (-ка) \_\_\_\_\_

Київ – 2018 року



## РЕФЕРАТ

**Структура та обсяг роботи:** дисертація складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел, який містить 65 найменувань, з них 38 іноземних. Загальний обсяг роботи складає 110, містить 44 рисунків, 11 таблиць. Для виконання роботи використовувалось програмне забезпечення: MS Office.

**Актуальність теми.** Технологічні процеси будь-якого виробництва в значній мірі залежать від якості електроенергії. У загальному випадку низька якість електроенергії може бути охарактеризована як будь-які зміни в енергопостачанні, що призводять до порушень нормального ходу виробничого процесу або до пошкодження обладнання, трансформаторів, електродвигунів.

Так за даними зарубіжних досліджень втрати країн Європи від неякісної електричної енергії щорічно сягають десятки млрд. євро. Аналогічні дані по Україні на даний час відсутні, оскільки проблемою якості електричної енергії систематично займаються тільки науковці, і це при тому, що збитки від неякісної електричної енергії мають тенденцію щорічного зросту (в США, наприклад, за останні десять років вони подвоїлись).

Окрім цього широке впровадження розосереджених джерел енергії як приватними споживачами та корпоративним сектором, так і безпосередньо генеруючими компаніями, формування віртуальних електростанцій пов'язано із необхідністю підтримання динамічного балансу між споживанням та генерацією електричної енергії на мікро- і макрорівнях. Це обумовлює появу принципово нових задач, вирішення яких не можна здійснити спираючись виключно на традиційні підходи, які використовуються для побудови електроенергетичних мереж централізованого характеру.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Представлена робота є продовженням багаторічної традиційної тематики Інституту енергозбереження та енергоменеджменту НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського» щодо інформаційного забезпечення задач вимірювання, обліку, планування та управління енерговикористанням.

**Мета дослідження.** – підвищення швидкодії та точності визначення наявності спотворень якості електроенергії за рахунок розробки (модифікації) методу їх визначення.

Сформована мета вимагає наступні завдання дослідження:

1. Оцінити вплив розосереджених джерел енергії на якість електропостачання в інтегрованих електричних мережах.
2. Проаналізувати сучасний стан методів і засобів оцінювання якості електричної енергії.
3. Визначити характерні ознаки вимірювального сигналу для ідентифікації спотворення при оцінюванні якісних характеристик електропостачання у реальному часі.

**Об'єкт дослідження** – процес оцінювання якісних характеристик режимів електропостачання в інтегрованих системах.

**Предмет дослідження** – методи та засоби оцінювання якісних характеристик режимів електропостачання в інтегрованих системах

**Методи дослідження.** Основу виконаних досліджень склали такі методи:

- Системний аналіз показників якості електричних мереж, фактори впливу на показники якості.
- Математичне моделювання впливу показників якості на електричні мережі для формування задачі підвищення швидкодії та точності вимірювань показників якості електроенергії.

### **Наукова новизна одержаних результатів.**

1. Проведено порівняльну характеристику методів виявлення аномалій в інформаційних сигналах.

2. Модифіковано модель ідентифікації спотворень інформаційних сигналів.

3. Розроблено алгоритм підвищення точності визначення показників якості електроенергії.

**Практичне значення одержаних результатів.** Отримані в роботі наукові результати мають практичне значення для побудови систем моніторингу якості електричної енергії, що є необхідною складовою реформування електроенергетичної галузі України.

**Ключові слова:** ВЕЙВЛЕТ-АНАЛІЗ, ЛІФТИНГОВА СХЕМА, ШВИДКОДІЯ, ТОЧНІСТЬ, ІНДЕФІКАЦІЯ СПОТВОРЕНЬ, ВИЗНАЧЕННЯ СПОТВОРЕНЬ.

## ABSTRACT

**Structure and scope of work:** the dissertation consists of an introduction, four sections, conclusions, list of used sources, which contains 65 titles, of which 38 are foreign. The total volume of work is 110, contains 44 figures, 11 tables. Software was used to perform the work: MS Office.

**Actuality of theme.** Technological processes of any production largely depend on the quality of electricity. In general, the low quality of electricity can be characterized as any change in power supply, which leads to violations of the normal course of the production process or damage to equipment, transformers, electric motors.

So, according to foreign studies, tens of billions of euros annually go down in Europe from low-quality electricity. Similar data for Ukraine are currently absent, as only scientists are systematically engaged in the problem of electric energy quality, despite the fact that losses from low-quality electrical energy tend to grow annually (in the US, for example, they have doubled over the past ten years).

In addition to the widespread introduction of distributed energy sources both by private consumers and the corporate sector as well as by directly generating companies, the formation of virtual power plants is linked to the need to maintain a dynamic balance between consumption and generation of electricity at micro and macro levels. This leads to the emergence of fundamentally new tasks, the solution of which can not be made solely on the basis of traditional approaches that are used to build centralized electricity networks.

**Relationship of work with scientific programs, plans, themes.** The presented work is the continuation of many years of traditional topics of the Institute of Energy Saving and Energy Management of NTUU "KPI named after Igor Sikorsky" concerning the information provision of measurement, accounting, planning and management of energy use.

**The aim of the study.** - ensuring the quality of electric energy in integrated electric networks, increasing the speed and accuracy of determining the characteristics of modes of power supply systems based on the introduction of a generalized index of distortion of quality of electric energy and the establishment of a monitoring system.

The current goal requires the following research objectives:

1. To analyze the current state of methods and means of estimating the quality of electric energy.
2. Develop a new approach to monitoring the quality of electrical energy.
3. Determine the characteristic signs of the measuring signal for the identification of distortion when evaluating the quality characteristics of power supply in real time.
4. To introduce a single generalized index of distortion of the quality of electric energy, regardless of its type, duration and time of occurrence.
5. Assess the impact of distributed energy sources on the quality of electricity supply in integrated electricity networks.

**The object of research** is the process of evaluation and monitoring of quantitative and qualitative characteristics of power supply regimes in integrated systems.

**Subject of research** - methods and means of estimating the quantitative and qualitative characteristics of power supply regimes in integrated systems

**Research methods.** The basis of the research carried out were the following methods:

- System analysis of electrical network quality indicators, factors influencing quality indices.
- Mathematical modeling influences quality indicators on electric networks for forming the task of increasing the speed and accuracy of measurements of electricity quality indices.

### **Scientific novelty of the obtained results.**

1. For the first time, determination of the presence of distortion of the quality of electric energy, regardless of its type, duration and time of occurrence, was introduced by introducing a single generalized distortion index.

2. A comparative description of methods of detecting anomalies in information signals is carried out.

3. Creation of a model for identification of distortions of information signals.

4. Methods have been developed to increase the accuracy of measurement of electricity quality indicators and increase the speed of data collection and processing.

5. For the first time the approach to increasing the efficiency of monitoring of the modes of integrated power supply systems has been substantiated.

**The practical value of the results.** The scientific results obtained in the work are of practical importance for the construction of systems for monitoring the quality of electrical energy, which is a necessary component of the reform of the electricity industry in Ukraine.

**Key Words:** WAVELET ANALYSIS, LIFTING SCHEME, SPEEDCODY, ACCURACY, INDUSTRY OF SPATIALS, DETERMINATION OF SPOTLIGHT.



## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	10
ВСТУП.....	11
1.1 Показники якості електроенергії в електричних мережах.....	14
1.2. Основні типи спотворень якості електричної енергії.....	36
1.3.Засоби вимірювання та покращення якості електричної енергії.....	38
Висновки до розділу 1.....	64
<b>РОЗДІЛ 2 РОЗРОБКА СПОСОБУ ВИЗНАЧЕННЯ НАЯВНОСТІ</b>	
<b>СПОТВОРЕНЬ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ .....</b>	<b>65</b>
2.1. Методи визначення параметрів якості електричної енергії.....	65
2.2 Розробка способу виявлення та ідентифікації спотворень якості електроенергії.....	69
Висновок до розділу 2.....	81
<b>РОЗДІЛ 3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ</b>	
<b>ЗАСТОСУВАННЯ РОЗРОБЛЕНОГО СПОСОБУ ВИЯВЛЕННЯ</b>	
<b>НАЯВНОСТІ СПОТВОРЕНЬ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ.....</b>	<b>83</b>
Висновки до розділу 3.....	88
<b>4 РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЕКТУ.....</b>	
4.1 Опис ідеї проекту .....	89
4.2 Пропозиція впровадження інформаційної моделі для контролю показників ЯЕЕ генеруючих ВДЕ.....	90
4.3 Технологічний аудит проекту.....	95
4.4 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту .....	98
4.5 Розроблення ринкової стратегії проекту.....	101
4.6 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту .....	102
Висновки до розділу 4.....	103
<b>ВИСНОВКИ .....</b>	<b>105</b>
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....</b>	<b>108</b>

**ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ**

АДЕ – альтернативні джерела енергії;

ВДЕ – відновлювані джерела енергії;

ВЕС – вітрова електростанція;

ЕЕС – електроенергетичні системи;

ЕС – Європейський Союз;

ЯЕЕ – якість електричної енергії;

ЛЕП – лінія електропередачі;

НВДЕ – нетрадиційні та відновлювані джерела енергії;

ОЕС – об'єднана енергетична система;

РГ – розосереджена генерація;

СЕЗ – система енергозабезпечення;

СЕП – система електропостачання;

СЕС – сонячна електростанція;

США – Сполучені Штати Америки;

ФН – функція належності.

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Технологічні процеси будь-якого виробництва в значній мірі залежать від якості електроенергії. У загальному випадку низька якість електроенергії може бути охарактеризовані як будь-які зміни в енергопостачанні, що призводять до порушень нормального ходу виробничого процесу або до пошкодження обладнання, трансформаторів, електродвигунів.

Так за даними зарубіжних досліджень втрати країн Європи від неякісної електричної енергії щорічно сягають десятки млрд. євро. Аналогічні дані по Україні на даний час відсутні, оскільки проблемою якості електричної енергії систематично займаються тільки науковці, і це при тому, що збитки від неякісної електричної енергії мають тенденцію щорічного зросту (в США, наприклад, за останні десять років вони подвоїлись).

Окрім цього широке впровадження розосереджених джерел енергії як приватними споживачами та корпоративним сектором, так і безпосередньо генеруючими компаніями, формування віртуальних електростанцій пов'язано із необхідністю підтримання динамічного балансу між споживанням та генерацією електричної енергії на мікро- і макрорівнях. Це обумовлює появу принципово нових задач, вирішення яких не можна здійснити спираючись виключно на традиційні підходи, які використовуються для побудови електроенергетичних мереж централізованого характеру.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Представлена робота є продовженням багаторічної традиційної тематики Інституту енергозбереження та енергоменеджменту НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського» щодо інформаційного забезпечення задач вимірювання, обліку, планування та управління енерговикористанням.

**Мета дослідження.** – підвищення швидкодії та точності визначення наявності спотворень якості електроенергії за рахунок розробки (модифікації) методу їх визначення.

Сформована мета вимагає наступні завдання дослідження:

4. Оцінити вплив розосереджених джерел енергії на якість електропостачання в інтегрованих електричних мережах.

5. Проаналізувати сучасний стан методів і засобів оцінювання якості електричної енергії.

6. Визначити характерні ознаки вимірювального сигналу для ідентифікації спотворення при оцінюванні якісних характеристик електропостачання у реальному часі.

**Об’єкт дослідження** – процес оцінювання якісних характеристик режимів електропостачання в інтегрованих системах.

**Предмет дослідження** – методи та засоби оцінювання якісних характеристик режимів електропостачання в інтегрованих системах

**Методи дослідження.** Основу виконаних досліджень склали такі методи:

- Системний аналіз показників якості електричних мереж, фактори впливу на показники якості.

- Математичне моделювання впливу показників якості на електричні мережі для формування задачі підвищення швидкодії та точності вимірювань показників якості електроенергії.

**Наукова новизна одержаних результатів.**

4. Проведено порівняльну характеристику методів виявлення аномалій в інформаційних сигналах.

5. Модифіковано модель ідентифікації спотворень інформаційних сигналів.

6. Розроблено алгоритм підвищення точності визначення показників якості електроенергії.

**Практичне значення одержаних результатів.** Отримані в роботі наукові результати мають практичне значення для побудови систем

моніторингу якості електричної енергії, що є необхідною складовою реформування електроенергетичної галузі України.

## РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ МЕТОДІВ ОЦІНЮВАННЯ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

### 1.1 Показники якості електроенергії в електричних мережах

Технологічні процеси будь-якого виробництва в значній мірі залежать від якості електроенергії. У загальному випадку низька якість електроенергії може бути охарактеризоване як будь-які зміни в енергопостачанні, що призводять до порушень нормального ходу виробничого процесу або до пошкодження обладнання, трансформаторів, електродвигунів.

Так за даними зарубіжних досліджень втрати країн Європи від неякісної електричної енергії щорічно сягають десятки млрд. євро. Аналогічні дані по Україні на даний час відсутні, оскільки проблемою якості електричної енергії систематично займаються тільки науковці, і це при тому, що збитки від неякісної електричної енергії мають тенденцію щорічного зросту (в США, наприклад, за останні десять років вони подвоїлись) [1].

Як відомо, існує дві основні групи спотворень якості електричної енергії: стаціонарні (або квазістаціонарні) і спотворення, що змінюються у часі. Гармоніки та інтергармоніки, коливання напруги і небаланс напруг відносяться до першої групи, а перехідні процеси напруги (voltage transient), зниження/перевищення напруги, переривання напруги та інші високочастотні спотворення складають другу групу.

#### 1.1.1 Показники якості електроенергії в електричних мережах

Розрізняють основні і додаткові показники якості електроенергії. До основних показників якості електроенергії, що визначає властивості електричної енергії, які характеризують її якість, відносяться:

- 1) відхилення напруги ( $\delta U$ , %);

- 2) розмах зміни напруги ( $\delta U_t, \%$ );
- 3) доза коливань напруги ( $\psi, \%$ );
- 4) коефіцієнт несинусоїдальності кривої напруги ( $k_{\text{НСU}}, \%$ );
- 5) коефіцієнт n-й гармонійної складової напруги непарного (парного) порядку ( $k_U(n), \%$ );
- 6) коефіцієнт зворотної послідовності напруги ( $k_{2U}, \%$ );
- 7) коефіцієнт нульової послідовності напруг ( $k_{0U}, \%$ );
- 8) тривалість провалу напруги ( $\Delta t_{\text{пр}}, \text{с}$ );
- 9) імпульсна напруга ( $U_{\text{імп}}, \text{кВ}$ );
- 10) відхилення частоти ( $\Delta f, \text{Гц}$ ).

Додаткові показники якості електроенергії, що представляють собою форми записи основних показників якості електроенергії та використовувані в інших нормативно-технічних документах:

- 1) коефіцієнт амплітудної модуляції напруги ( $k_{\text{мод}}$ );
- 2) коефіцієнт небалансу міжфазних напруг ( $k_{\text{неб.м}}$ );
- 3) коефіцієнт небалансу фазних напруг ( $k_{\text{неб.ф}}$ ).

Відзначимо допустимі значення названих показників якості електроенергії, вирази для їх визначення і області застосування. Протягом 95% часу доби (22,8 ч) показники якості електроенергії не повинні виходити за межі нормально допустимих значень, а протягом всього часу, включаючи післяаварійні режими, вони повинні знаходитися в межах максимально допустимих значень.

Контроль якості електроенергії в характерних точках електричних мереж здійснюється персоналом підприємства електричних мереж. При цьому тривалість вимірювання показника якості електроенергії повинна становити не менше доби.

### **Відхилення напруги**

Відхилення напруги це один з найважливіших показників якості електроенергії. Відхилення напруги знаходиться за формулою:

$$\delta U_t = \frac{U(t) - U_n}{U_n} \cdot 100\%,$$

де  $U(t)$  – діюче значення напруги прямої послідовності основної частоти, або просто діюче значення напруги (при коефіцієнті несинусоїдальності, меншому або рівному 5%), в момент часу  $t$ , кВ;  $U_n$  – номінальна напруга, кВ.

Величина  $U_t = \frac{1}{3}(U_{AB(1)} + U_{BC(1)} + U_{AC(1)})$ , де  $U_{AB(1)}$ ,  $U_{BC(1)}$ ,  $U_{AC(1)}$  – діючі значення міжфазних напруг основної частоти.

Через зміни навантажень в часі, зміни рівня напруги та інших факторів змінюється величина падіння напруги в елементах мережі і, отже, рівень напруги  $U_t$ . В результаті виявляється, що в різних точках мережі в один і той же момент часу, а в одній точці – в різні моменти, відхилення напруги різні.

Нормальна робота електроприймачів вістях напругою до 1 кВ забезпечується за умови, що відхилення напруги на їх вході рівні  $\pm 5\%$  (нормальне значення) і  $\pm 10\%$  (максимальне значення). У мережах напругою 6 - 20 кВ встановлюється максимальне відхилення напруги  $\pm 10\%$ .

Потужність, споживана лампами розжарювання, прямо пропорційна підведеної напруги в мірою 1,58, світлова віддача ламп - певною мірою 2,0, світловий потік - певною мірою 3,61, термін служби ламп - певною мірою – 13,57. Робота люмінесцентних ламп від відхилення напруги залежить менше. Так термін їх служби змінюється на 4% при відхиленні напруги на 1%.

Зниження освітленості робочих місць відбувається при зменшенні напруги, що призводить до зниження продуктивності праці працюючих і погіршення їх зору. При великих зниженнях напруги люмінесцентні лампи не загоряються або блимають, що призводить до скорочення терміну їх служби. При підвищенні напруги термін служби ламп розжарювання різко знижується [2].



Від рівня напруги залежить швидкість обертання асинхронних електродвигунів і, отже, їх продуктивність, а також споживана реактивна потужність. Останнє відбивається на величині втрат напруги і потужності на ділянках мережі.

Зниження напруги призводить до збільшення тривалості технологічного процесу в електротермічних і електролізних установках, а також до неможливості стійкого прийому в комунальних мережах телевізійних передач. В останньому випадку застосовуються так звані стабілізатори напруги, які самі споживають значну реактивну потужність і у яких є втрати потужності в сталі. На їх виготовлення витрачається дефіцитна трансформаторна сталь.

Для забезпечення необхідного напруги на шинах низької напруги всіх ТП застосовують так зване зустрічну регулювання напруги в центрі живлення. Тут в режимі максимальних навантажень підтримується максимально допустима напруга на шинах ЦП, а в режимі мінімальних навантажень - мінімальна напруга.

При цьому застосовується і так зване місцеве регулювання напруги в кожному трансформаторному пункті шляхом установки перемикача відгалужень розподільних трансформаторів в відповідне положення. У поєднанні з централізованим (в ЦП) і зазначеним місцевим регулюванням напруги застосовуються регульовані і нерегульовані конденсаторні установки, також відносяться до засобів місцевого регулювання напруги.

### **Діапазон зміни напруги**

Діапазон зміни напруги є різницею між амплітудними або діючими значеннями напруги до і після одиночного зміни напруги і визначається за формулою:

$$\delta U_t = \frac{U_i - U_{i+1}}{\sqrt{2} \cdot U_H} \cdot 100\%,$$

де  $U_i$  і  $U_{i+1}$  значення наступних один за одним екстремумів або екстремуму по горизонталі обвідної амплітудних значень напруги.

До розмахів зміни напруги відносять поодинокі зміни напруги будь-якої форми з частотою повторення від двох разів на хвилину (1/30 Гц) до одного разу на годину, що мають середню швидкість зміни напруги більше 0,1% в секунду (для ламп розжарювання) і 0,2% в секунду для інших приймачів [7].

Швидкі зміни напруги викликаються ударним режимом роботи двигунів металургійних прокатних станів тягових установок залізниць, лугових сталеплавильних печей, зварювальної апаратури, а також частими пусками потужних короткозамкнених асинхронних електродвигунів, коли їх пускова реактивна потужність становить кілька відсотків потужності короткого замикання.

Число змін напруги в одиницю часу, т. Е. Частота зміни напруги, знаходиться за формулою  $F = m/T$ , де  $m$  – число змін напруги за час  $T$ ,  $T$  – загальний час спостереження розмахів напруги.

Основні вимоги, що пред'являються до коливань напруги, обумовлюються міркуваннями захисту зору людини. Встановлено, що найбільша чутливість ока до мерехтіння світла знаходиться в області частоти, рівної 8,7 Гц. Тому для ламп розжарювання, які забезпечують робоче освітлення при значних зорових напруженнях, розмах напруги допускається не більше 0,3%, для ламп накачування в побуті - 0,4%, для люмінесцентних ламп та інших електроприймачів - 0,6 [3].

Допустимі розмахи коливань наведені на рисунку 1.1.

Область I відповідає роботі насосів і побутових приладів, II – кранів, підйомників, III – дугових печей, ручний контактному зварюванню, IV - роботі поршневих компресорів і автоматичної контактному зварюванню.

Для зниження діапазону зміни напруги в освітлювальній мережі застосовують роздільне харчування приймачів освітлювальній мережі і силового навантаження від різних силових трансформаторів, поздовжню ємнісною компенсацію мережі живлення, а також синхронні електродвигуни та штучні джерела реактивної потужності (реактори або

конденсаторні батареї, струм яких формується за допомогою керованих вентилів для отримання необхідної реактивної потужності).

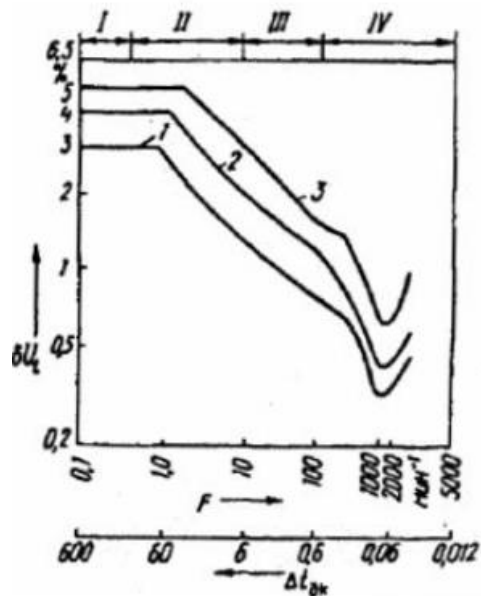


Рисунок 1.1 – Допустимі розмахи коливань напруги: 1 – робоче освітлення лампами розжарювання при великому зорової напрузі, 2 – побутові лампи розжарювання, 3 – люмінесцентні лампи.

### Доза коливань напруги

Доза коливань напруги ідентична розмаху зміни напруги і в діючих електричних мережах вводиться в міру їх оснащення відповідними приладами. При використанні показника "доза коливань напруги" оцінка допустимості розмаху зміни напруги може не проводитися, тому що розглядаються показники взаємозамінні.

Доза коливань напруги також є інтегральну характеристику коливань напруги, що викликають у людини накопичується за встановлений період часу роздратування через мерехтіння світла в діапазоні частот від 0,5 до 0,25 Гц.

Допустиме максимальне значення дози коливань напруги ( $\psi$ , (%)) 2) в електричній мережі, до якої приєднуються освітлювальні установки, не повинно перевищувати: 0,018 – з лампами розжарювання в приміщеннях, де

потрібна значна зорова напруга; 0,034 – з лампами розжарювання в усіх інших приміщеннях; 0,079 – з люмінесцентними лампами [3].

## Коефіцієнт несинусоїдальності кривої напруги

При роботі в сет потужних випрямних і перетворювальних установок, а також дугових печей і установок для зварювання, т. Е. Нелінійних елементів, відбувається перекручування кривих струму і напруги. Несинусоїдальні криві струму і напруги є гармонійні коливання, що мають різні частоти (промислова частота – це нижча гармоніка, всі інші по відношенню до неї – вищі гармоніки).

Вищі гармоніки в системі електропостачання викликають додаткові втрати енергії, скорочують термін служби конденсаторних батарей, електродвигунів і трансформаторів, призводять до труднощів при налагодженні релейного захисту та сигналізації, а також експлуатації електроприводів з тиристорним керуванням і т. д.

Зміст вищих гармонік в електричній мережі характеризується коефіцієнтом несинусоїдальності кривої напруги  $k_{нсU}$  який визначається за виразом

$$k_{нсU} = \frac{1}{U_n} \sqrt{\sum_{n=2}^N U_n^2} \cdot 100 \%,$$

де  $N$  – порядок останньої з врахованих гармонійних складових,  $U_n$  – діюче значення  $n$ -й ( $n = 2, \dots, N$ ) гармонійної складової напруги, кВ.

Нормальні і максимальних значень  $k_{нсU}$  не повинні відповідно перевищувати: в електричній мережі напругою до 1 кВ – 5 і 10%, в електричній мережі 6 – 20 кВ – 4 і 8%, в електричній мережі 35 кВ – 3 і 6%, в електричній мережі 110 кВ і вище 2 і 4%.

Для зниження вищих гармонік застосовуються силові фільтри, що представляють собою послідовне з'єднання індуктивного і ємнісного опорів, налаштованих в резонанс на певну гармоніку. З метою виключення гармонік нижчих частот застосовують перетворюючі установки з великим числом фаз.

### **Коефіцієнт $n$ -й гармонійної складової напруги непарного (парного) порядку**

Коефіцієнт  $n$ -й гармонійної складової напруги непарного (парного) порядку представляє собою відношення діючого значення  $n$ -ї гармонійної складової напруги до діючого значенням напруги основної частоти,

$$k_U(n) = \frac{U_n}{U_H} \cdot 100\%,$$

За значенням коефіцієнта  $k_U(n)$  визначається спектр  $n$ -х гармонійних складових, на придушення яких повинні бути розраховані відповідні силові фільтри [4].

Нормальні і максимальних значень не повинні відповідно перевищувати: в електричній мережі напругою до 1 кВ – 3 і 6%, в електричній мережі 6 – 20 кВ 2,5 і 5%, в електричній мережі 35 кВ – 2 і 4%, в електричній мережі 110 кВ і вище 1 і 2%.

### **Несиметрія напруг**

Несиметрія напруг виникає через навантаження однофазних електроприймачів. Так як розподільні мережі напругою вище 1 кВ працюють з ізольованою або компенсованою нейтраллю, то несиметрія напруг обумовлена появою напруги зворотної послідовності. Несиметрія проявляється у вигляді нерівності лінійних і фазних напруг і характеризується коефіцієнтом зворотної послідовності напруг:

$$k_{2U} = \frac{U_{2(1)}}{U_H} \cdot 100\%,$$

де  $U_{2(1)}$  – діюче значення напруги зворотної послідовності основної частоти трифазної системи напруг, кВ. Значення величини  $U_{2(1)}$  можна отримати виміром трьох напруг основної частоти,  $U_{A(1)}$ ,  $U_{B(1)}$ ,  $U_{C(1)}$ . Тоді

$$U_{2(1)} = \frac{\sqrt{3} (U_{A(1)}y_A + U_{B(1)}y_B + U_{C(1)}y_C)}{y_A + y_B + y_C},$$

де  $y_A$ ,  $y_B$  і  $y_C$  - провідності фаз  $A$ ,  $B$  і  $C$  приймача.

У мережах напругою вище 1 кВ несиметрія напруг проявляється в основному через однофазних електротермічних установок (дугових печей непрямого дії, печей опору, індукційних каналних печей, установок електрошлакової переплавки і ін.

Наявність напруги зворотної послідовності призводить до додаткового нагрівання обмоток порушення синхронних генераторів і збільшення їх вібрації, до додаткового нагрівання електродвигунів і різкого скорочення терміну служби їх ізоляції, зниження реактивної потужності, що генерується силовими конденсаторами, додатковому нагріванню ліній і трансформаторів, збільшення кількості помилкових спрацьовувань релейного захисту та т д.

На затискачах симетричного електроприймачів нормально допустимий коефіцієнт несиметрії дорівнює 2%, а максимально допустимий - 4% [5].

Вплив несиметрії значно зменшується при харчуванні однофазних електроприймачів від окремих трансформаторів, а також при застосуванні керованих і некерованих симетруючих пристроїв, що компенсують еквівалентний струм зворотної послідовності, споживаний однофазними навантаженнями.

У чотирьох провідних мережах напругою до 1 кВ несиметрія, обумовлена однофазними приймачами, підключеними до фазним напруженням, супроводжується проходженням струму в нульовому проводі і, отже, появою напруги нульової послідовності.

#### **Коефіцієнт нульової послідовності напруг**

$$k_{0U} = \frac{U_{0(1)}}{U_{\text{нф}}} \cdot 100\%,$$

де  $U_{0(1)}$  - Дія значення напруги нульової послідовності основної частоти, кВ;  $U_{\text{нф}}$  - номінальне значення фазної напруги, кВ.

Величина  $U_{0(1)}$  визначається виміром трьох фазних напруг основної частоти,

$$U_{0(1)} = \frac{y_A U_{A(1)} + y_B U_{B(1)} + y_C U_{C(1)}}{y_A + y_B + y_C + y_0},$$

де  $y_A, y_B, y_C, y_0$  - провідності фаз  $A, B, C$  приймача і провідність нульового проводу;  $U_{A(1)}, U_{B(1)}, U_{C(1)}$  - діючі значення фазних напруг.

Допустиме значення  $U_{0(1)}$  обмежується вимогами, що пред'являються до відхилення напруги, які задовольняються коефіцієнтом нульової послідовності, рівним 2% в якості нормального рівня і 4% максимального рівня [6].

Зниження значення може бути досягнуто раціональним розподілом однофазного навантаження між фазами, а також збільшенням перетину нульового проводу до перетину фазних проводів і застосуванням трансформаторів в розподільній мережі з групою з'єднання "зірка - зигзаг".

### Провал напруги і інтенсивність провалів напруги

Провал напруги – це раптове значне пониження напруги в точці електричної мережі, за яким слід відновлення напруги до початкового або близького до нього рівня через проміжок часу від кількох періодів до декількох десятків секунд.

Тривалість провалу напруги  $\Delta t_{пр}$  – інтервал часу між початковим моментом провалу напруги і моментом відновлення напруги до початкового або близького до нього рівня (рис. 1.2), тобто  $\Delta t_{пр} = t_{вос} - t_{нач}$ .

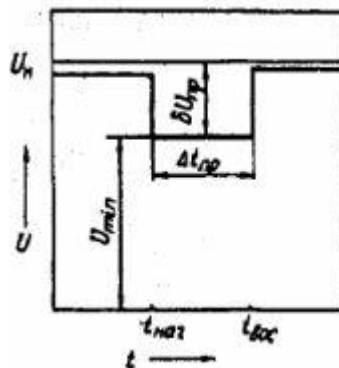


Рисунок 1.2 – Тривалість і глибина провалу напруги

Значення  $\Delta t_{пр}$  становить від декількох періодів до декількох десятків секунд. Провал напруги характеризується інтенсивністю і глибиною провалу  $\delta U_{пр}$ , що представляє собою різницю між номінальним значенням



напруги і мінімальним діючим значенням напруги  $U_{\min}$  протягом провалу напруги, і виражається у відсотках номінального значення напруги або в абсолютних одиницях [7].

Величина  $\delta U_{\text{пр}}$  визначається наступним чином:

$$\delta U_{\text{пр}} = \frac{U_{\text{н}} - U_{\min}}{U_{\text{н}}} \cdot 100\%, \text{ або } \delta U_{\text{пр}} = U_{\text{н}} - U_{\min}.$$

Інтенсивність провалів напруги  $m^*$  являє собою частоту появи в мережі провалів напруги певної глибини і тривалості

$$M^* = \frac{m(\delta U_{\text{пр}}, \Delta t_{\text{пр}})}{M} \cdot 100\%,$$

де  $m(\delta U_{\text{пр}}, \Delta t_{\text{пр}})$  - число провалів напруги глибиною  $\delta U_{\text{пр}}$  і тривалістю  $\Delta t_{\text{пр}}$  за час  $T$ ;  $M$  - сумарна кількість провалів напруги за час  $T$ .

До провалів напруги, що виникають в більшості випадків при коротких замиканнях в мережі, чутливі деякі види електроприймачів (ЕОМ, силова електроніка), тому в проектах електропостачання таких приймачів повинні бути передбачені заходи щодо зниження тривалості, інтенсивності та глибини провалів напруги. Допустимі значення тривалості провалів напруги ГОСТ не вказує.

### Імпульсна напруга

Імпульсна напруга - це різка зміна напруги, за яким слід відновлення напруги до звичайного рівня за проміжок часу від кількох мікросекунд до 10 мілісекунд. Воно являє собою максимальне миттєве значення напруги імпульсу  $U_{\text{імп}}$  (рис. 1.3).

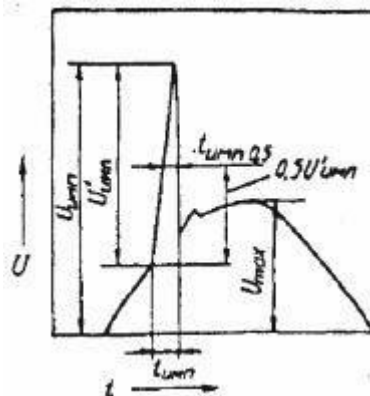


Рисунок 1.3 – Імпульсна напруга

Імпульсна напруга характеризується амплітудою імпульсу  $U'_{\text{імп}}$ , що представляє собою різницю між імпульсом напруги і миттєвим значенням напруги основної частоти, відповідним моменту початку імпульсу. Тривалість імпульсу  $t_{\text{імп}}$  - інтервал часу між початковим моментом імпульсу напруги і моментом відновлення миттєвого значення напруги до звичайного рівня. Може бути обчислена тривалість імпульсу  $t_{\text{імп}0,5}$  за рівнем 0,5 його амплітуди (див. Рис. 1.3) [8].

Імпульсна напруга визначається у відносних одиницях за формулою

$$\Delta U_{\text{імп}} = \frac{U_{\text{імп}}}{\sqrt{2} \cdot U_{\text{н}}},$$

До імпульсам напруги чутливі також такі електроприймачі, як ЕОМ, силова електроніка та ін. Імпульсні напруги з'являються внаслідок комутацій в електричній мережі. Заходи щодо зниження імпульсних напруг повинні передбачатися при розробці конкретних проектів електропостачання. Допустимі значення імпульсної напруги ГОСТ не вказує [19].

### **Відхилення частоти**

Зміни частоти обумовлені змінами сумарного навантаження і характеристиками регуляторів частоти обертання турбін. Великі відхилення частоти виникають в результаті повільного регулярного зміни навантаження при недостатньому резерві активної потужності.

Частота напруги на відміну від інших явищ, що погіршують якість електроенергії, є загальносистемним параметром: всі генератори, підключені до однієї системи, генерують електроенергію на напрузі однаковою частоти - 50 Гц [9].

Відповідно до першого закону Кірхгофа завжди існує строгий баланс між виробленням і генерацією потужності. Тому будь-яка зміна потужності навантаження викликає зміну частоти, що призводить до зміни вироблення активної потужності генераторів, для чого блоки "турбіна - генератор"

обладнають пристроями, що дозволяють регулювати надходження енергоносія в турбіну в залежності від змін частоти в електричній системі.

При певному зростанні навантаження виявляється, що потужність блоків "турбіна - генератор" вичерпана. Якщо навантаження продовжує збільшуватися, баланс встановлюється при зниженій частоті - виникає відхилення частоти. У цьому випадку говорять про дефіцит активної потужності для підтримки номінальної частоти.

Відхилення частоти  $\Delta f$  від номінального значення  $f_n$  визначається за формулою  $\Delta f = f - f_n$ , де  $f$  - поточне значення частоти в системі

Зміни частоти, що перевищують 0,2 Гц, істотно впливають на техніко-економічні показники роботи електроприймачів, тому нормально допустиме значення відхилення частоти одно  $\pm 0,2$  Гц, а максимально допустиме значення відхилень частоти складає  $\pm 0,4$  Гц. У післяаварійних режимах допускається відхилення частота від +0,5 Гц до - 1 Гц протягом не більше 90 ч в рік.

Відхилення частоти від номінальної призводить до збільшення втрат енергії в мережі, а також до зниження продуктивності технологічного устаткування.

### **Коефіцієнт амплітудної модуляції напруги і коефіцієнт небалансу міжфазних і фазних напруг**

Коефіцієнт амплітудної модуляції напруги характеризує коливання напруги і дорівнює відношенню найбільшої і найменшої амплітуд модульованої напруги, взятих за певний інтервал часу, до номінального або базового значення напруги,

$$k_{\text{мод}} = \frac{U_{\text{нб}} - U_{\text{нм}}}{2\sqrt{2}U_n},$$

де  $U_{\text{нб}}$  і  $U_{\text{нм}}$  - відповідно найбільша і найменша амплітуди модульованого напруги. [10].

Коефіцієнт небалансу міжфазних напруг  $k_{\text{неб.мф}}$  характеризує несиметрію міжфазних напруг і дорівнює відношенню розмаху небалансу міжфазних напруг до номінального значення напруги:

$$k_{\text{неб.мф}} = \left( (U_{\text{нб}} - U_{\text{нм}}) / U_{\text{н}} \right) \cdot x \cdot 100\%$$

де  $U_{\text{нб}}$  і  $U_{\text{нм}}$  - найбільше і найменше значення, що діють з трьох міжфазних напруг.

Коефіцієнт небалансу фазних напруг  $k_{\text{неб.ф}}$  характеризує несиметрію фазних напруг і дорівнює відношенню розмаху небалансу фазних напруг до номінального значення фазної напруги:

$$k_{\text{неб.ф}} = \left( (U_{\text{нб.ф}} - U_{\text{нм.ф}}) / U_{\text{н.ф}} \right) \cdot x \cdot 100\%$$

де  $U_{\text{нб}}$  і  $U_{\text{нм}}$  - найбільше і найменше значення, що діють з трьох фазних напруг,  $U_{\text{н.ф}}$  - номінальне значення фазної напруги.

### **Нормативно-правова база контролю за показниками якості електроенергії**

Якість електричної енергії - це ступінь відповідності фактичних значень параметрів електричної енергії встановленим ГОСТ 13109-97 значенням, основні з яких наведено у таблиці 1.1.

Проблеми живлення - будь-які відхилення параметрів напруги від встановлених стандартом значень якості електроенергії.

Основні неполадки живлення, які становлять небезпеку для роботи електрообладнання відповідно наведеної класифікації (у дужках наведені найбільш поширені англомовні еквіваленти) відображає вимоги міжнародного стандарту ГОСТ 13109-97, термінологічних стандартів ГОСТ 30372-95 та ДСТУ 3466-96 \*:

1. Зникнення напруги (Power Failure, Loss of Voltage) - відсутність напруги в електромережі протягом більше двох періодів (40 мс). Наслідками зникнення напруги можуть бути: втрата, пошкодження даних на серверах і поточної інформації на робочих станціях, пошкодження файлової системи, порушення технологічного процесу, вихід з ладу апаратури.



Таблиця 1.1 – Допустимі значення відхилень показників якості електроенергії

Найменування показника	Допустиме значення показника	
	нормальне	граничне
Відхилення напруги	$\pm 5$ *	$\pm 10$ *
Доза флікера, відн. од.:		
короткочасна		1,38
тривала		1,00
Коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої напруги, %, не більше,	8	12
Коефіцієнт гармонійної складової напруги непарного (парного) порядку, %, не більше	5 (2)	7,5 (3)
Несиметрія напруги, %	2	4
Тривалість провалу напруги, с		30
Відхилення частоти, Гц	$\pm 0,2$	$\pm 0,4$

Примітки: \* Встановлюються в договорах на користування електроенергією між електропостачальною організацією і споживачем. Наведено величини, за визначенням нормальних допустимих та гранично допустимих значень показників, відносяться до розрахункового періоду 24 години в електричній мережі напругою до 1 кВ.

2. Провал напруги (Power Sag, Voltage Dip) - раптове зниження напруги в електричній мережі нижче величини 90% від номінального значення, за яким слідує відновлення напруги до початкового або близького до нього рівня за проміжок часу від десяти мілісекунд до декількох десятків секунд. Причиною провалу напруги можуть бути: включення енергоємного обладнання, запуск потужних електродвигунів, робота зварювальних апаратів і т.д. Можливі наслідки: скидання оперативної пам'яті; виникнення помилок, вихід з ладу апаратури, мерехтіння освітлення.

3. Перенапруга (Power Surge, Over Voltage) - раптове підвищення напруги в електричній мережі вище величини 110% від номінального

значення, за яким слід відновлення напруги до початкового або близького до нього рівня за проміжок часу від десяти мілісекунд до декількох десятків секунд. Причиною виникнення перенапруг може бути відключення енергоємного обладнання. Можливі наслідки: скидання оперативної пам'яті; виникнення помилок, вихід з ладу апаратури, мерехтіння освітлення.

4. Відхилення напруги (Brownout, Voltage Deviation) - відхилення (зниження / підвищення) напруги в мережі від допустимих стандартом значень на тривалий час (більше десятків секунд). Виникає зазвичай через зростання споживання електроенергії в певні періоди часу при обмеженій потужності джерела електроенергії або довгих лініях електроживлення. Можливі негативні наслідки: додаткові втрати потужності в стабілізаторах, скорочення терміну служби блоків живлення, збої у виконанні програм.

5. Електромагнітна перешкода (Electrical Line Noise) - виникнення у мережі високочастотних імпульсів, що накладаються на синусоїдальну форму напруги. Основними причинами виникнення електромагнітних перешкод є робота потужних електродвигунів, перемикання релейної апаратури і силової комутаційної електроніки, мовлення суміжних станцій, магнітні бурі. Можливі наслідки - виникнення помилок, скидання оперативної пам'яті, "зависання" операційної системи, вихід з ладу накопичувачів на жорстких дисках. У [1,2] цей термін відсутній;

6. Імпульс напруги (High Voltage Spikes, Voltage Impulse) - це короткочасне перевищення напруги вище 110% від номінального значення тривалістю 10-50 мкс (з часом фронту імпульсу 1-10 мкс). При цьому, амплітуда імпульсів перенапруги може досягати величин 6000 В. Причиною їх появи можуть бути удари блискавок, розряди статичної електрики. Такі високовольтні імпульси з дуже крутим переднім фронтом без перешкод минають захисні фільтри блоків живлення ПЕОМ і потрапляючи в ланки системних плат, викликають скидання оперативної пам'яті і вихід з ладу мікросхем.

7. Відхилення частоти (Frequency Variations, Frequency Deviation) - відхилення частоти на величину більше 0,2 Гц від номінального значення (50 Гц). Причиною появи можуть бути: нестабільність джерела електроенергії, нестабільність частоти обертання ротора дизель-генератора. Можливі наслідки: перегрів і вихід з ладу блоків живлення, «зависання» операційної системи, програмні збої, втрата даних.

8. Тимчасове перенапруга (Switching Transient) - це короткочасне перевищення напруги вище 110% від номінального значення тривалістю 1000-5000 мкс. При цьому, амплітуда імпульсів перенапруги може досягати величин 4500 В. Причиною їх появи є комутаційні процеси потужнострумів ланцюгів електропостачання, іскріння комутаційних апаратів. Можливі наслідки: скидання оперативної пам'яті і вихід з ладу мікросхем.

9. Несинусоїдальність напруги (Harmonic Distortion) - характеризується двома основними показниками:

а) коефіцієнтом спотворення синусоїдальності кривої напруги (струму) - відношення діючих значень суми вищих гармонік напруг (струмів) до діючого значення напруги (струму) основної гармоніки або у спрощеному варіанті до номінальної напруги (струму);

б) коефіцієнтом гармоніки напруги (струму) - відношення діючого значення аналізованої гармоніки напруги (струму) до діючого значення змінної напруги (струму) або у спрощеному варіанті до номінальної напруги (струму). Крім перерахованих використовуються такі показники якості електроенергії, як: коефіцієнти форми і амплітуди кривих змінної напруги (струму), гармоніка напруги (струму), джерело гармонік напруги, струму (Source of Harmonic Voltage, Current), гармонійний резонанс (Harmonic Resonance). Небезпеку для електрообладнання представляють спотворення синусоїдальності кривої напруги більше 8% або наявність в кривій напруги гармонійних складових напруги непарного (парного) порядку, з коефіцієнтом гармонік більше 5%.



Причиною їх появи є наявність споживачів з нелінійним навантаженням, таких як комп'ютери, тиристорні перетворювачі і т.п. При цьому поряд із спотворенням відбувається генерування значного потоку реактивної потужності в зовнішню електромережу, що погіршує якість роботи інших споживачів електроенергії та вимагає використання пристроїв автоматичної компенсації реактивної потужності або інших пристроїв, що коректують форму вхідного струму.

Згідно з частиною п'ятою статті 24 Закону України «Про електроенергетику» (далі – Закон) електропередавальні організації зобов'язані забезпечувати належний технічний стан та організацію експлуатації об'єктів електроенергетики відповідно до вимог нормативно-правових актів, нормативно-технічних документів, нормативних документів з питань технічної експлуатації електричних станцій і мереж та енергетичного обладнання, надійне та якісне постачання (транспортування) енергії згідно з умовами ліцензій та договорів.

Частиною чотирнадцятою статті 24 Закону визначено, що у разі відпуску електричної енергії, параметри якості якої внаслідок дій або бездіяльності енергопостачальника виходять за межі показників, визначених у договорі на постачання електричної енергії, енергопостачальник несе відповідальність у вигляді штрафу в розмірі двадцяти п'яти відсотків вартості такої електроенергії.

В свою чергу, статтею 25 Закону передбачено право споживачів, зокрема, на отримання електричної енергії, якісні характеристики якої визначені державними стандартами.

Так, відповідно до ГОСТ 13109-97 «Норми якості електричної енергії в системах електропостачання загального призначення», норми встановлені даним Стандартом, підлягають включенню в технічні умови на приєднання користувачів електричної енергії та в договори на постачання електричної енергії між електропередавальною організацією і користувачами електричної енергії.

Взаємовідносини, які виникають в процесі продажу і купівлі електричної енергії між виробниками або постачальниками електричної енергії та споживачами (на роздрібному ринку електричної енергії), регулюються Правилами користування електричною енергією, затвердженими постановою Національної комісії регулювання електроенергетики України від 31.07.1996 № 28, зареєстрованими в Міністерстві юстиції України 02.08.1996 за № 417/1442 (із змінами) (далі – ПКЕЕ).

Дія цих Правил поширюється на всіх юридичних осіб та фізичних осіб (крім населення) (абзац другий пункту 1.1 ПКЕЕ).

Згідно з підпунктом 2 пункту 8.2 ПКЕЕ постачальник електричної енергії за регульованим тарифом зобов'язаний: забезпечувати постачання електричної енергії, якісні характеристики якої відповідають параметрам, визначеним державними стандартами, та зазначені в договорі.

Пунктом 8.5 ПКЕЕ визначено, що у разі постачання електричної енергії, параметри якості якої перебувають поза межами показників, зазначених у договорі про постачання електричної енергії, постачальник електричної енергії за регульованим тарифом несе відповідальність перед споживачем у розмірі двадцяти п'яти відсотків вартості обсягу такої енергії.

Відносини між побутовими споживачами та енергопостачальниками регулюються Правилами користування електричною енергією для населення, затвердженими постановою Кабінету Міністрів України від 26.07.99 № 1357 (зі змінами) (далі – ПКЕЕН).

Відповідно до положень пункту 38 ПКЕЕН енергопостачальник, зокрема зобов'язаний забезпечувати надійне постачання електричної енергії згідно з умовами ліцензій та договором; приймати письмові та усні повідомлення (у тому числі засобами зв'язку) побутових споживачів щодо порушення електропостачання або порушення параметрів якості електричної енергії, а також вживати заходів до відновлення

електропостачання та приведення показників якості у відповідність з вимогами нормативних документів.

Згідно з положеннями пунктів 49 – 51 ПКЕЕН у разі порушення енергопостачальником умов договору побутовий споживач викликає представника енергопостачальника для складання та підписання акта-претензії побутового споживача, в якому зазначаються терміни, види, відхилення показників з надання послуг тощо (форму типового акта-претензії наведено у додатку 2 до ПКЕЕН).

Акт-претензія складається побутовим споживачем та представником енергопостачальника і скріплюється їхніми підписами. У разі неприбуття представника енергопостачальника протягом 3 днів з дня звернення у містах або 7 днів - у сільській місцевості побутовий споживач має право скласти акт-претензію у довільній формі. У разі відмови представника енергопостачальника від підписання акта, акт вважається дійсним, якщо його підписали не менше ніж три побутові споживачі або побутовий споживач і виборна особа будинкового, вуличного, квартального чи іншого органу самоврядування.

Акт-претензія побутового споживача подається енергопостачальнику, який у десятиденний термін усуває недоліки або надає побутовому споживачеві обґрунтовану відмову щодо задоволення його претензій.

Відповідно до положень пункту 52 ПКЕЕН у разі відмови енергопостачальника провести необхідні заміри параметрів якості електричної енергії побутовий споживач має право сам організувати проведення таких замірів. Проводити заміри параметрів якості електроенергії може організація, яка має відповідні повноваження або дозволи. У цьому випадку енергопостачальник повинен відшкодувати витрати побутового споживача.

Слід також зазначити, що згідно з положеннями пункту 5.1 ГОСТу 13109-97 оцінка відповідності якості електричної енергії вказаним нормам проводиться протягом розрахункового періоду, рівному 24 годинам.

Відповідно до пункту 6.1 ГОСТу 13109-97 для визначення відповідності значень вимірюваних показників якості електричної енергії, за винятком тривалості провалу напруги, імпульсної напруги, коефіцієнта тимчасового перенапруги, нормам цього стандарту встановлюється мінімальний інтервал часу вимірювань, рівний 24 годинам, що відповідає розрахунковому періоду пункту 5.1.

Разом з тим, відповідно до положень підпунктів 11 та 15 пункту 4 Положення про державний енергетичний нагляд за режимами споживання електричної і теплової енергії, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 07.08.96 № 929 (зі змінами), одними із завдань та функцій Державної інспекції з енергетичного нагляду за режимами споживання електричної і теплової енергії (далі – Держенергонагляд), є здійснення в межах своєї компетенції нагляду за відповідністю показників якості електричної енергії вимогам нормативних документів та технічним станом та організацією експлуатації, зокрема, електричних установок та мереж суб'єктів електроенергетики і споживачів електричної енергії.

Таким чином, здійснення контролю за показниками якості електричної енергії належить до компетенції Держенергонагляду [11].

## **1.2. Основні типи спотворень якості електричної енергії**

Спотворення, що знижують якість напруги, можуть виникати як при передачі, так і при розподілі електроенергії:

- Спотворення при передачі. Через значної протяжності повітряні лінії електропередачі схильні до дії атмосферних явищ. Різні види розрядів атмосферної електрики (блискавок) є причинами різних типів спотворень, кидків, посадок напруги, повного припинення подачі електроенергії. Тривалість і ступінь спотворень залежать від структури мережі і часу, необхідного на її реконфігурацію. Причини виникнення перенапруг через удари блискавок зазвичай розглядаються як зовнішні по відношенню до мережі.

Інші види спотворень виникають в процесі управління мережею, при скидах або несподіваних наростаннях навантаження. Хоча останній вид спотворень досить рідкісний, оскільки зазвичай великі навантаження підключаються до мережі поступово. Це не відноситься до раптових скидах навантаження, які найчастіше є наслідком аварій [12].

Внутрішньомережеві джерела спотворень:

а) Резонанс. Сюди відносяться характерні для даної мережі коливання або коливання, що виникають між різними елементами мережі, наприклад, фільтрами. Зрозуміло, для їх запобігання вживаються всі можливі заходи, але вони можуть тимчасово виникати при змінах конфігурації мережі.

б) Нестійкість при передачі. Найбільш часто вона пов'язана з кутом передачі  $\delta$  (або внутрішнім кутом, або транспортним кутом). Можливо також виникнення підсинхронних коливань, що може надати катастрофічний вплив на силові генератори електростанцій.

в) Ферорезонанс. Нелінійні коливання, що виникають при насиченні силових або вимірювальних трансформаторів.

г) Комутації. Перенапруги виникають внаслідок підключення або відключення елементів мережі, фільтрів, конденсаторних батарей або трансформаторів.

д) Пошкодження «фаза / земля».

- Спотворення при розподілі. Зараз ми маємо справу з усе зростаючою кількістю електричних навантажень, що погіршують якість енергії в мережі як на побутовому, так і на промисловому рівні, і з активною діяльністю по стандартизації якості енергії. Остання тенденція досить неоднозначна, так як на початковому етапі вона призводить до штрафних санкцій по відношенню до виробників і навіть до споживачів, в той час як організації, зайняті розподілом енергії, як правило, не несуть ніякої відповідальності щодо потужності короткого замикання або структури повного опору мережі [13].

Силова електроніка викликає погіршення якості енергії, але в порівнянні з іншими видами перетворення вона характеризується наявністю власних коштів боротьби з цим погіршенням.

Протягом багатьох років пасивні фільтри використовувалися в зв'язці з високопотужними тиристорними або діодними перетворювачами.

Зараз на ринку з'явилися замикаються електронні елементи - IGBT (біполярний транзистор з ізольованим затвором), GTO (тиристор, що замикається) або IGCT (тиристор, що замикається з інтегрованим блоком управління), які зробили можливим виробництво перетворювачів, здатних підвищувати якість енергії. Стали реальністю активні фільтри для низьких напруг, доведена можливість їх застосування на середніх напружених, і ця технологія в найближчі роки буде активно розвиватися [14].

Погіршення якості електроенергії не зводиться тільки до гармонік. Сюди ж входять зміни напруги, посадки напруги і спотворення, пов'язані з коливаннями напруги, звані «мерехтінням» або «мерехтіння ефектом», з частотою від 1 до 30 Гц і максимумом спотворень при частоті 9 Гц. Електроніка великих потужностей в змозі запропонувати рішення по боротьбі з останніми трьома видами спотворень.

### **1.3.Засоби вимірювання та покращення якості електричної енергії**

Коротко кажучи, при передачі енергії виникають три основні проблеми:

- стійкість передачі, в значній мірі пов'язана з величиною транспортного кута;
- контроль напруги і зростання напруги при відсутності навантаження;
- підсинхронних резонанс, який може привести до виходу з ладу генераторних установок електростанцій[15].

Будівництво нових ліній електропередачі пов'язано зі значними витратами і часто просто неможливо з причин екологічного характеру. Тому

доводиться збільшувати потужність енергії, що передається по існуючих лініях, в основному за рахунок збільшення сили струму. Це можна досягти тільки за таких умов:

- відсутність теплових обмежень;
- наявність надійного управління розподілом потоків енергії між лініями, що живлять певну місцевість.

При дотриманні цих умов можна проводити підвищення переданої потужності в режимі максимальної надійності, залишаючись в межах допустимої стійкості, тобто при значеннях транспортного кута, що не перевищують 40°. Для управління величиною транспортного кута використовуються різні пристрої, наприклад, поперечні (шунтуючі) компенсатори і поздовжні компенсатори.

Для підвищення параметрів якості електроенергії часто використовують спеціальне обладнання та методи.

- Поздовжня компенсація. Лінії високої напруги мають індуктивний опір, і чим вище падіння напруги на ньому, тим вище транспортний кут. Ідея збільшення переданої потужності проста. Величина індуктивного опору повинна компенсуватися послідовно включеною ємністю. В даний час використовується кілька конструктивних рішень.



Рисунок 1.4 - Конденсатор постійної ємності

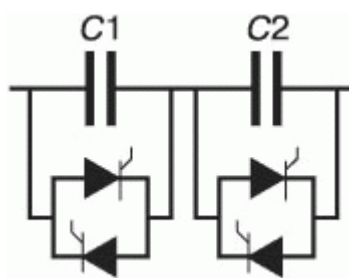


Рисунок 1.5 - Конденсаторна батарея з тиристорним перемиканням

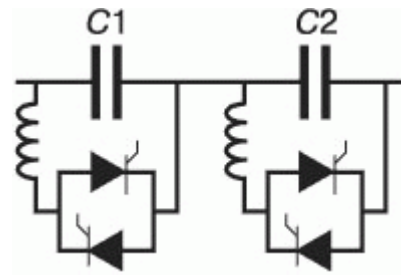


Рисунок 1.6 - Конденсаторна батарея з тиристорним керуванням

- Конденсатор постійної ємності (рис. 1.4). Ступінь компенсації постійна. Цей принцип дозволяє підвищувати передану по лінії потужність, поки не будуть досягнуті обмеження по тепловиділенню. Такі системи не здатні пригнічувати поява підсинхронних коливань генераторів електростанцій, навпаки, при такому способі компенсації можуть створюватися умови, сприятливі для їх виникнення. [16].

- Конденсаторна батарея з тиристорним перемиканням (рис. 1.5).

Ступінь компенсації змінюється східчасто. Всі зауваження до рішення на рис. 1.4 залишаються справедливими і для цього рішення.

- Конденсаторна батарея з тиристорним керуванням (рис. 1.6).

Ступінь компенсації регулюється практично в будь-яких межах. Це рішення також дозволяє управляти стабільністю передачі і пригнічувати виникнення підсинхронних коливань. Тиристри працюють в режимі підлаштування фази. Модуль TCSC (Thyristor Controlled Series Capacitor - конденсаторна батарея з тиристорним керуванням) в процесі роботи являє собою або конденсатор змінної ємності, або дросель змінної індуктивності. Однак перемикання з режиму ємності в режим індуктивності і назад неможливо без проміжного відключення через резонансних явищ.

Модулі TCSC зазвичай мають достатню динаміку для придушення підсинхронних коливань.

- Поперечна компенсація

Пристрій, включене в середню точку лінії і здатне поглинати й повертати реактивну потужність, забезпечує сталість напруги в цій точці.



При цьому транспортний кут знижується вдвічі і відповідно може бути збільшена передана потужність [17].

Такі пристрої були розроблені більше 30 років тому. Рішення полягає в підключенні до лінії ємності, а паралельно їй - регульованого пристрою, здатного компенсувати надлишкову реактивну потужність для підтримки постійного значення напруги в точці підключення (рис. 1.7).

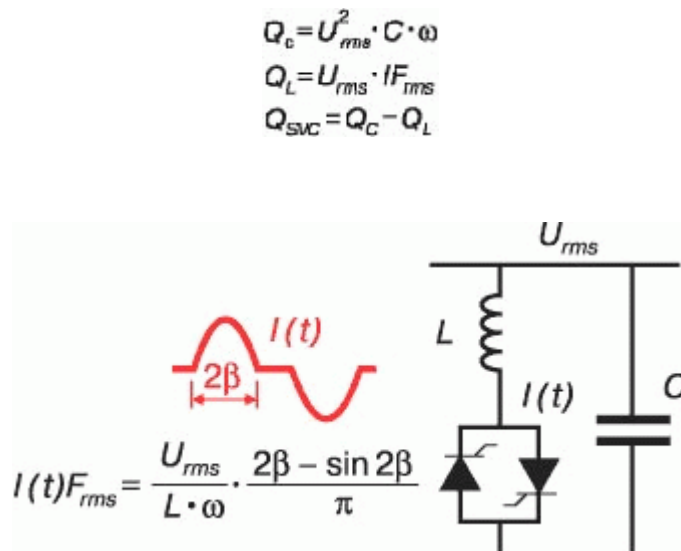


Рисунок 1.7 - Схема пристрою поперечної компенсації в лінії

$I(t) \cdot F_{rms}$  - діюче значення струму;

$U_{rms}$  - діюче значення напруги;

$L$  - індуктивність реактора;

$C$  - ємність батареї конденсаторів;

$\omega$  - кутова частота;

$\beta$  - кут пропускання струму;

$Q_C$  - потужність конденсаторної батареї;

$Q_L$  - потужність реактора;

$Q_{SVC}$  - потужність статичного тиристорного компенсатора

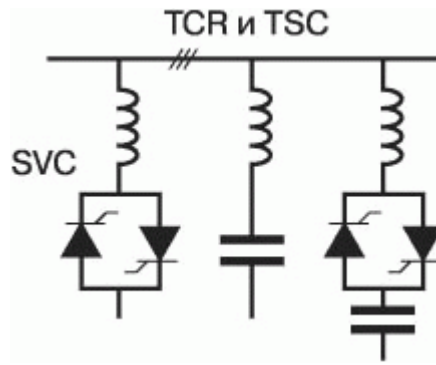


Рисунок 1.8 - Схема установки SVC

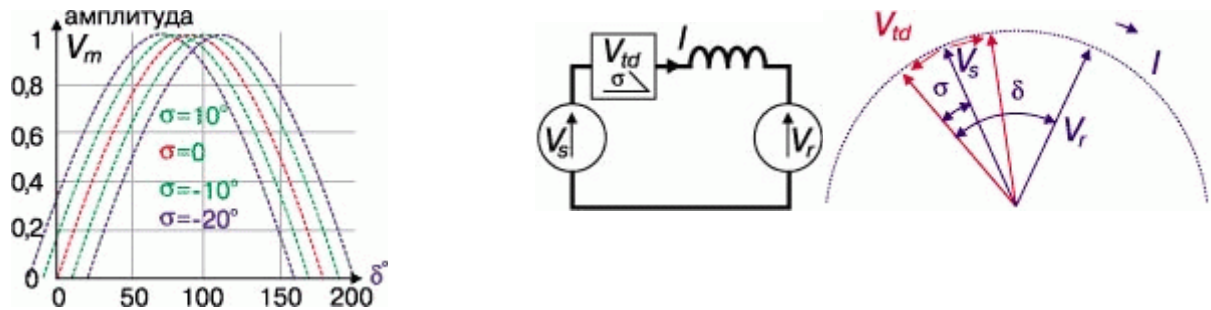


Рисунок 1.9 - Залежність потужності від кута.

$V_s$  – напруга джерела;  $V_r$  – напруга приймача;

$X$  - реактор, який має чисто індуктивний опір

Індуктивність змінюється за рахунок використання тиристорів. Такі системи називаються SVC (Static VAR Compensator) - ССКРМ (система статичної компенсації реактивної потужності).

Статичний контактор, керуючий силою струму в реакторі, генерує в мережі гармоніки. Це послужило першою причиною для організації ємностей в систему фільтрів. Існують і інші причини, пов'язані зі структурою мережі, в основному з виникненням паралельного резонансу, через наявність ємностей в установці SVC.

У загальному вигляді схема установки SVC показана на рисунку 1.8. У неї входять ланцюг управління реактором TCR (Thyristor Controlled Reactor - реактор з тиристорним керуванням) та ланцюг ступеневої підключення елементів конденсаторної батареї TSC (Thyristor Switched Capacitor - конденсаторна батарея з тиристорним перемиканням) [18].

З причин економічного характеру часто буває важко встановити фіксовану значну ємність. Це зажадає також установки модуля TCR великої

потужності. Тому використовують кілька конденсаторних батарей. TSC можуть підключатися або відключатися окремо, а TCR значно меншої потужності має функцію для забезпечення постійного керування реактивною потужністю.

Необхідно відзначити, що мережеві SVC зазвичай мають достатню динаміку для того, щоб придушувати виникнення підсинхронних коливань. Коли в мережі відсутнє навантаження, через розподіленої ємності лінії відбувається зростання напруги. Для його обмеження необхідно здійснювати поглинання реактивної потужності. Саме тому установки SVC часто проектуються з урахуванням необхідності служити і поглинальними пристроями. [19].

- Фазоздвигаючий трансформатор.

Кут (між напруженнями) є найважливішим параметром регулювання потужності (рис. 1.9).

Фазоздвигаючі трансформатори використовуються починаючи з 80-х років для управління енергопотоками в мережах. У зв'язку зі скороченням державного втручання в управління енергомережами, з розвитком торгівлі електроенергією та зв'язків між енергосистемами різних країн, в даний час завдання управління енергопотоками стає особливо актуальною.

Залежність величини переданої потужності  $P$  від кута зсуву фаз, що забезпечується фазоздвигаючим трансформатором, виражається в такий спосіб:

$$P = \frac{V_2}{X \cdot \sin \varphi}.$$

Регулювання кута зсуву фаз дозволяє управляти активною потужністю. При подальшому ускладненні технології можливе регулювання і амплітуди, що дозволяє управляти реактивною потужністю. На рисунку 1.10 показана схема фазоздвигаючого трансформатора.

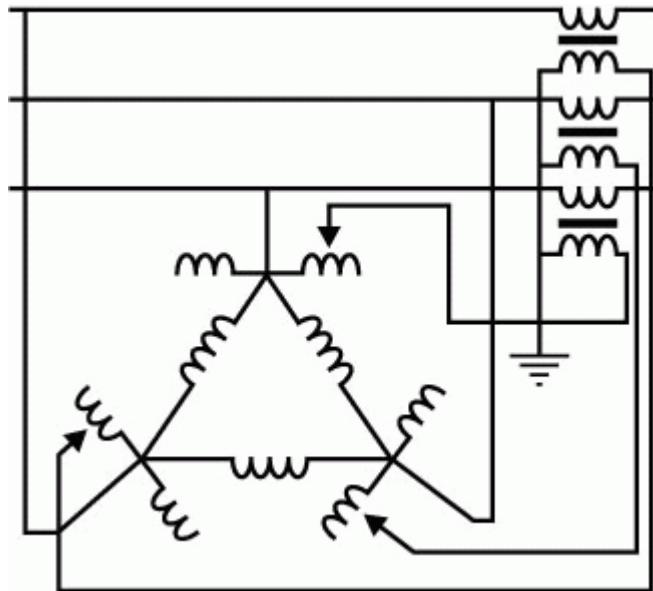


Рисунок 1.10- Схема фазоздвигающего трансформатора

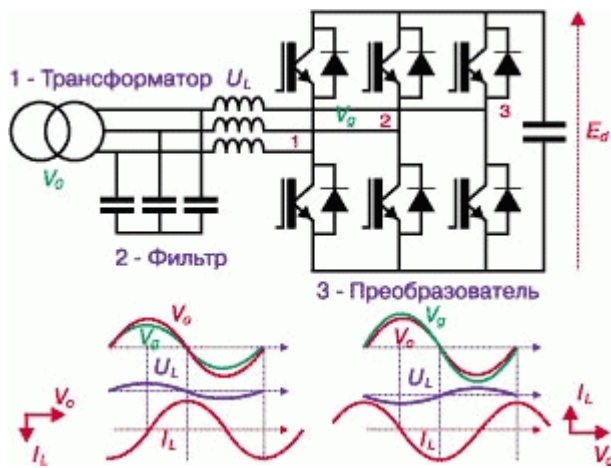
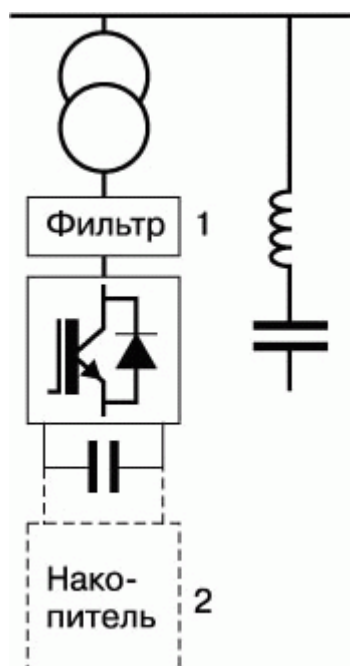


Рисунок 1.11 - Принцип работы FACTS



### Рисунок 1.12 - Схема STATCOM

Системи FACTS з'явилися близько 15 років тому. Передумовами їх розробки послужила поява на ринку замикаються електронних компонентів високої потужності - IGBT, GTO, IEGT.

До сих пір широко застосовуються класичні системи FACTS, засновані на використанні тиристорів (управління по струму). Сучасні системи FACTS використовують компоненти, які можуть управлятися командами по напрузі. Найважливіша властивість FACTS - їх здатність поглинати або повертати реактивну потужність - показано на рисунку. 1.11 [20].

На малюнку  $V_0$  - напруга вторинної обмотки трансформатора,  $V_g$  - основна гармоніка напруги на виході перетворювача. Перетворювач управляється в режимі PWM (Pulse Width Modulation - широтно-імпульсної модуляції - ШІМ). Це виправдовує наявність фільтра між перетворювачем і мережею.

Напруга мережі  $V_0$  і напруга на виході перетворювача знаходяться в фазі. Виникнення будь-якого відмінності між цими напругами викликає падіння напруги на відповідному реакторі поздовжньої компенсації, також збігається за фазою з напругою мережі ( $U_L$ ). Знак цієї напруги відповідає знаку різниці  $V_0 - V_g$ . Результуючий струм  $I_L$  має зрушення щодо цієї напруги на  $90^\circ$ .

При  $V_g < V_0$  система працює в індуктивному режимі, при  $V_g > V_0$  - в ємнісному.

Відповідно до описаної структурою розроблялися і вже застосовуються сучасні пристрої поздовжньої і поперечної компенсації.

- Поперечна компенсація – STATCOM (STATic synchronous COMPensator - Статичний синхронний компенсатор)

Хоча компенсатори STATCOM (рис. 1.12) здатні поглинати й повертати реактивну потужність  $Q$ , їх застосування зазвичай обмежується статичною компенсацією з причин економічного характеру.

Зазвичай  $Q_{\max} = Q_F + Q_{\text{STATCOM}}$  і  $Q_{\min} = Q_F - Q_{\text{STATCOM}}$ , причому  $Q_{\text{STATCOM}}$  трохи вище величини  $Q_F$ , щоб забезпечити можливість поглинання реактивної потужності при відсутності навантаження в мережі.

Коли напруга в точці підключення залишається постійним, компенсатор STATCOM поводить себе як компенсатор SVC. Однак в режимі обмеження потужності компенсатор STATCOM стає джерелом струму, тоді як компенсатор SVC набуває властивостей конденсатора. Компенсатори STATCOM можуть також вести себе як активні фільтри. Зрозуміло, за додаткову функціональність компенсаторів STATCOM доводиться і додатково платити [21].

Серед безлічі функцій цих компенсаторів класичними є наступні:

- регулювання напруги шляхом поглинання або повернення реактивної потужності;
- придушення підсинхронних коливань.

При зниженні напруги SVC поводить себе як конденсатор, і реактивна потужність падає пропорційно квадрату напруги. Система STATCOM в такій же ситуації переходить в режим постійного джерела струму. Напруга на виводах конденсатора може підтримуватися постійним.

- Поздовжня компенсація – SSSC (Static Synchronous Series Compensator - Статичний синхронний поздовжній компенсатор)

У цих системах вдається виключити недолік систем TCSC (конденсаторна батарея з тиристорним керуванням), що складається в неможливості плавного переходу від ємнісного режиму до індуктивного.

SSSC (рис. 1.13) може повертати тільки реактивну потужність, за винятком випадків, коли контур постійного струму отримує підживлення від накопичувача енергії [22].

У розподілі енергії використовується цей же принцип, який отримав назву DVR (Dynamic Voltage Restorer - система динамічного відновлення напруги), хоча по функціональності вони дещо відрізняються. Тут метою є підтримка мережі щодо її найбільш вразливих споживачів при

короткочасних викривлення. Потужність наявних на ринку установок DVR не перевищує 1 МВА.

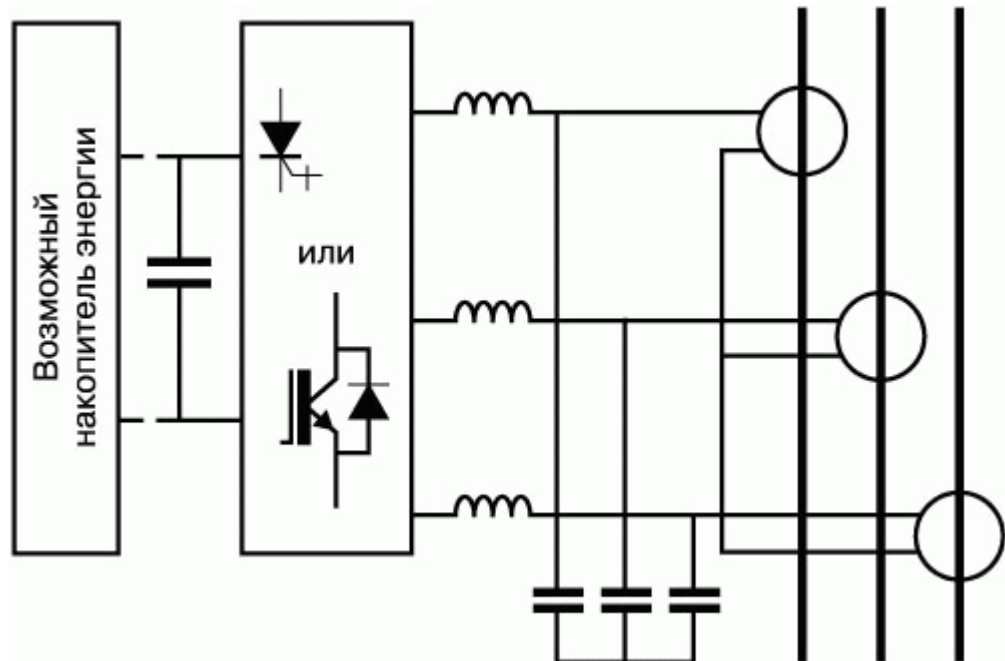


Рисунок 1.13 - Схема SSSC

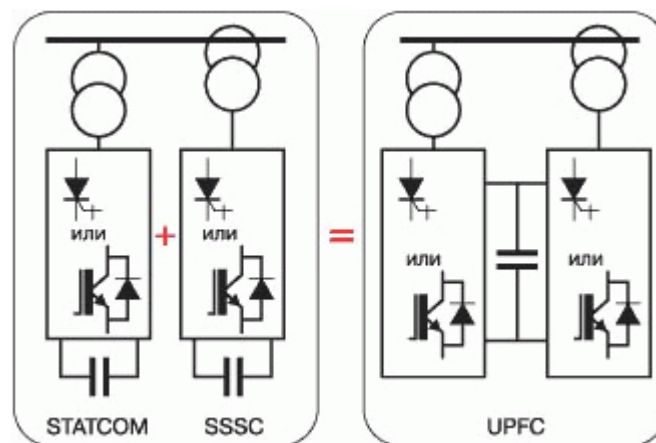


Рисунок 1.14 - Схема UPFC

- Універсальна компенсація - UPFC

(Unified Power Flow Controller - Уніфікована система управління енергопотоками)

Потужності систем STATCOM і інших типів SSSC настільки високі, що використання їх без застосування накопичувачів енергії достатньої ємності важко. Якщо така можливість відсутня, ми повинні бути в змозі управляти величиною транспортного кута, як у випадку використання

фазоздвигаючого трансформатора, але зі значно більш високою швидкістю. Система UPFC втілює цю мрію в реальність без використання будь-якого накопичувача енергії. Система UPFC являє собою не що інше, як об'єднання систем STATCOM і SSSC (рис. 1.14).

Це найбільш складна з систем FACTS. Вона дозволяє здійснювати наступні функції:

безпосереднє управління напругою. Додавання або віднімання напруг, фазовим вузлом поперечної компенсації. Ці дії проводяться над реактивною потужністю;

а) поперечний компенсатор - шляхом управління поперечним перетворювачем з переведенням останнього в режим поглинання або повернення реактивної потужності. Напруга має підтримуватися постійним;

б) поздовжній компенсатор: шляхом додавання послідовного напруги, із зсувом на 90° стосовно струму зв'язку. При цьому необхідно управляти вихідною напругою і реактивною потужністю на виході;

в) фазоздвигаючі пристрої: якщо величина і фаза поздовжньої напруги такі, що при підтримці такого ж напруги на виході модуля воно зменшує величину зсуву фаз по відношенню до входу. Це має важливе значення при управлінні переданою активною потужністю, або, нарешті, одночасне використання всіх функцій - число ступенів свободи системи дозволяє це робити, - коли необхідно управляти і реактивною, і активною потужністю.

Переваги системи UPFC очевидні. Хоча в даний час система не особливо поширена, в найближчі роки ця технологія буде активно розвиватися, в основному в містах, де особливо складно здійснити будівництво додаткових ліній. Число систем UPFC, які знаходяться в експлуатації на сьогоднішній день, можна перелічити на пальцях однієї руки. Одна система UPFC потужністю 2x160 МВА знаходиться в експлуатації з 1998 року в системі посилення, що складається з подвійної



ЛЕП 135 кВ від АЕС в США. Вона дозволяє підвищити передану потужність на 100 МВт [23].

У наступному номері журналу Жак Куро зупиниться на проблемах розподілу електроенергії. Він розгляне технології відновлення навантаження, усунення флуктуації напруги, способи компенсації посадок напруги, питання вибору напруги промислової розподільної мережі.

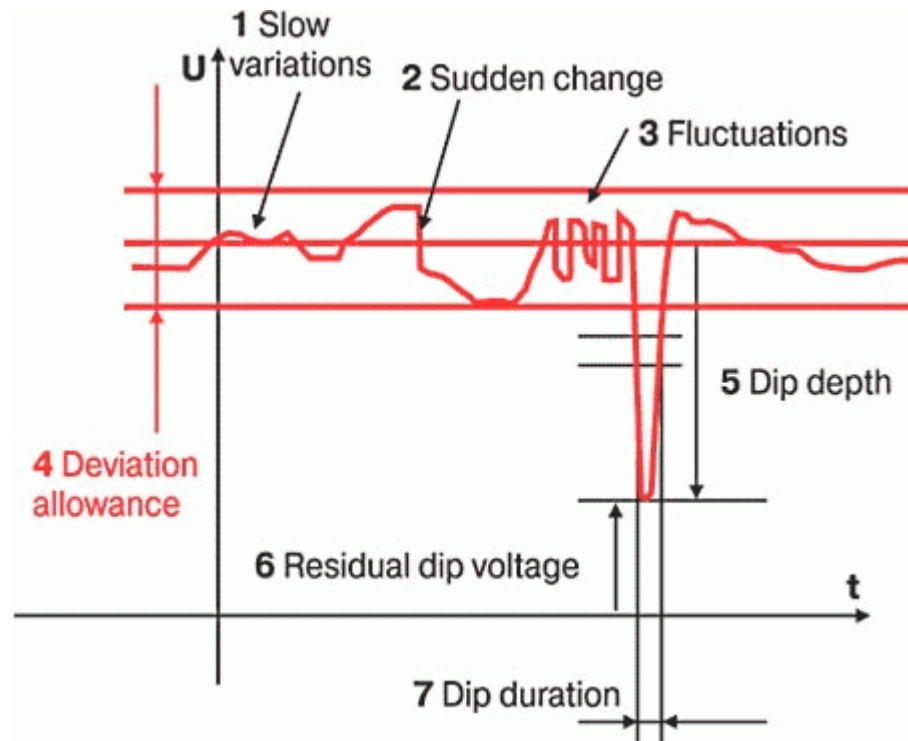


Рисунок 1.15 - Різні види змін напруги в мережі

- 1 Повільні зміни
- 2 Різка зміна (стрибок)
- 3 Коливання
- 4 Допустимі зміни
- 5 Глибина посадки
- 6 Залишкова напруга при посадці
- 7 Тривалість посадки

Природно, що прийняте рішення залежить від типу мережі та виду підключених споживачів. Якщо величина флуктуацій напруги не виходить за рамки допустимих меж, абсолютно ясно, що ніякої корекції проводити не потрібно. Можливі повільні зміни напруги, що виходять за ці рамки. Це,

скоріше, проблема енергопостачальної компанії, ніж споживача, пов'язана з довжиною лінії, недостатньою потужністю короткого замикання (потужністю джерела). Посадки напруги також відносяться до питань енергопостачальної компанії і пов'язані з затримками у відключенні коротких замикань і відмовами обладнання. Флуктуації напруги, з іншого боку, відбуваються в основному через погане узгодження потужності джерела з швидко змінюється в ході виробничих процесів навантаженням у споживачів [24].

- Відновлення електропостачання навантаження (самозапуску)

Відновлення електропостачання навантаження (наприклад, після АВР), більш відоме як самозапуск, створює значні струми. Рівень напруги при цьому знижується, що може чинити серйозний вплив на стійкість роботи всієї мережі.

При зниженні напруги деякі споживачі зберігають рівень споживаної потужності, що призводить до зростання споживаного струму. Типовим прикладом є асинхронні електричні машини (рис. 1.16). При зниженні напруги їх швидкість зберігається постійною, що призводить до зростання споживаного струму. При поверненні напруги до нормального значення спостерігається зростання споживаного струму за рахунок протікання перехідних процесів.

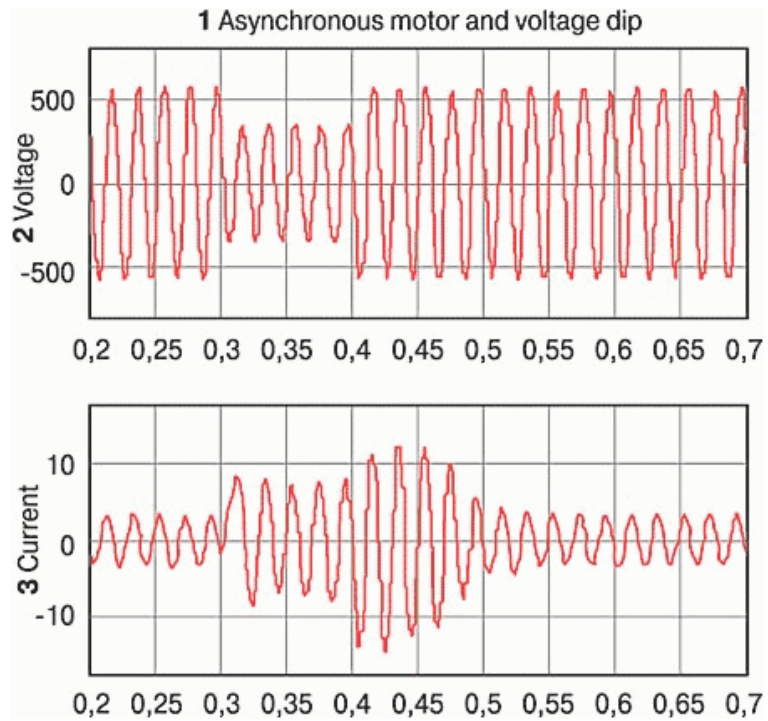


Рис. 1.16. Асинхронний двигун і посадка напруги

1 Асинхронний двигун і посадка напруги

2 Напруга

3 Струм

- Оцінка посадок напруги в розподільній мережі

Зміни напруги в мережі відбуваються через змін не стільки активною, скільки реактивної потужності.

Наведемо майже точну формулу відносної зміни напруги (по відношенню до напруги холостого ходу розподільчої мережі) відповідно до рис. 1.17.

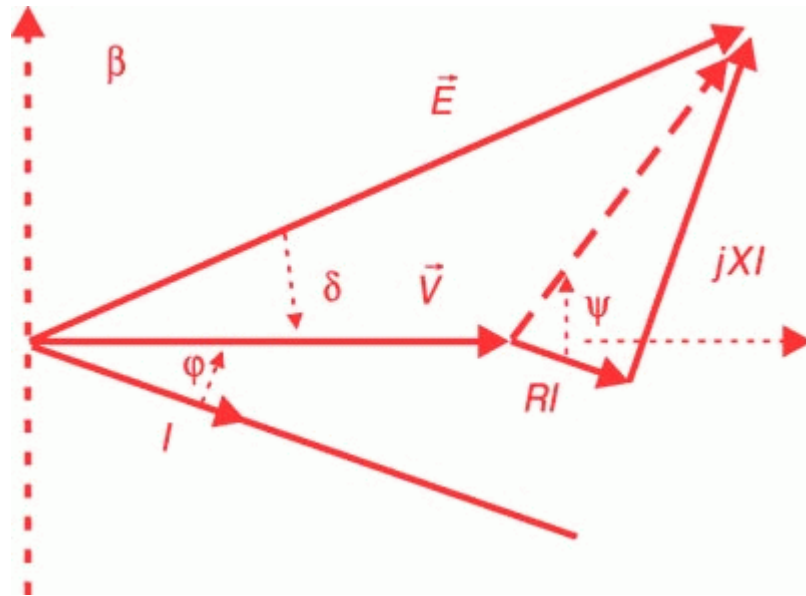


Рисунок 1.17- «Майже точна» формула розрахунку посадки напруги

$E$  - напруга джерела;

$V$  - напруга;

$DV$  - відхилення напруги;

$S_{кз}$  - потужність короткого замикання;

$P$  - активна потужність;

$Q$  - реактивна потужність;

$tgj$  - кут між струмом і напругою;

$X$  - індуктивний опір;

$R$  - активний опір.

$$\left| \frac{E-V}{E} \right| = \Delta V = \frac{1}{SCC} \cdot \left( Q + \frac{P}{\operatorname{tg}\psi} \right) + \frac{1}{2SCC^2} \cdot \left( P + \frac{Q}{\operatorname{tg}\psi} \right)^2$$

Де

$$SCC = \frac{3 \cdot E^2}{X}$$

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{X}{R}$$

$SCC$  є потужність короткого замикання, а  $\operatorname{tg}$  зазвичай має значення в межах від 7 до 10. На рівні розподілу це в основному зміна напруги, викликане зміною навантаження, яке можна оцінити, використовуючи формули

$$\Delta v1 = \frac{1}{SCC} \cdot \left( Q1 + \frac{P1}{\operatorname{tg} \psi} \right) + \frac{1}{2SCC^2} \cdot \left( P1 + \frac{Q1}{\operatorname{tg} \psi} \right)^2$$

$$\Delta v2 = \frac{1}{SCC} \cdot \left( Q2 + \frac{P2}{\operatorname{tg} \psi} \right) + \frac{1}{2SCC^2} \cdot \left( P2 + \frac{Q2}{\operatorname{tg} \psi} \right)^2$$

$$\frac{V2 - V1}{V1} = \frac{\Delta v1 - \Delta v2}{1 - \Delta v1}$$

Якщо SCC перевищує значення виразу  $Q1 - P1 / a \operatorname{tg}$ , можна записати:

$$\frac{V2 - V1}{V1} \approx \frac{1}{SCC} \cdot \left( \Delta Q - \frac{\Delta P}{\operatorname{tg} \psi} \right) \approx \frac{\Delta Q}{SCC}$$

На першому етапі точність, що забезпечується цією формулою, часто вважається задовільною. З метою уникнути перевантаження мереж (ліній, трансформаторів, іншого обладнання), які відчують основні навантаження, завжди заохочувалося прагнення користувачів компенсувати використання реактивної потужності. У таких випадках слід встановлювати пасивне компенсує обладнання, що складається в основному з конденсаторних батарей з підлаштування дроселями, іноді з демпфірувальними резисторами для гасіння паралельного резонансу. Починаючи з 1987 р, наприклад, споживання реактивної потужності, дозволене EDF (Electricite de France - французької мережевою компанією), обмежена величиною

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{Q}{P} \leq 0,4$$

Більш того, EDF виставляє рахунки за надмірне використання реактивної потужності. У Бельгії це обмеження становить

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{Q}{P} \leq 0,33$$

Необхідно відзначити, що фіксована компенсація не впливає на зміни напруги, викликані флуктуаціями реактивної потужності. Якщо рівень фіксованої компенсації занадто великий по відношенню до мінімального

витраті реактивної потужності, виникає ризик надлишкової компенсації, яка може привести до підвищення напруги у споживачів [25].

Для мало мінливих навантажень в минулому часто використовувалися синхронні компенсатори, синхронні електричні машини з перепорушенням, здатні генерувати реактивну потужність. З плином років, з ростом динаміки процесів і жорсткістю вимог до стабільності мереж, набули поширення засоби статичної компенсації - системи SVC і STATCOM, про які ми розповідали в першій частині матеріалу.

- Флуктуації напруги

Для стабілізації напруги розподільних мереж використовуються ті ж засоби, що і в мережах передачі, хоча цілі їх застосування не однакові. Постає питання про управління напругою і підвищенні коефіцієнта потужності. Складнощі в основному виникають через швидко мінливих навантажень, таких, як прокатні стани, зварювальні агрегати і найбільше дугові печі. На рисунку 1.18 наведено характерний приклад узагальненої розподільної мережі з спотвореннями, які усуваються за допомогою установки SVC. На малюнку показані конденсатори, встановлені в складі фільтрів для придушення гармонік; ємність конденсаторів підібрана таким чином, щоб повертати реактивну потужність, необхідну для підтримки заданого значення  $\text{tg } j$ ; є також поглинач (TCR-дросьель з тиристорним керуванням), призначений для компенсації надлишкової ємності в необхідних випадках. Ясно, що для підтримки постійного значення напруги в мережі або хоча б для виключення змін, надходження реактивної потужності в розподільну мережу повинно бути нульовим або постійним [26].

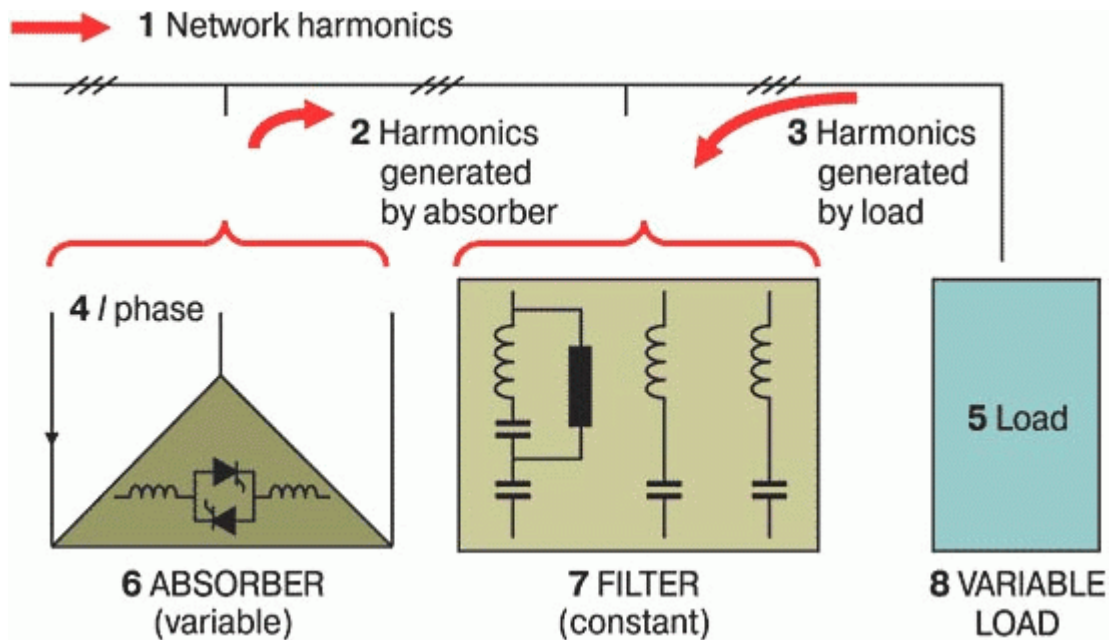


Рисунок 1.18. Приклад узагальненої розподільної мережі з спотвореннями, які усуваються за допомогою установки SVC

1. Мережеві гармоніки;
  2. Гармоніки, породжені поглиначем;
  3. Гармоніки, породжені навантаженням;
  4. Струм фази;
  5. Навантаження;
  6. Поглинач (змінний);
  7. Фільтр (постійний);
  8. Змінне навантаження.
- Мерехтіння ефект

Проблеми, викликані змінами напруги, відомі під назвою мерехтіння ефекту (мерехтіння). Цей ефект визначається  $P_t$  (дозою Фліккер). Слід нагадати, що  $P_t$  не є ні миттєвою, ні середньою величиною. Це оцінка серйозності проблем, що викликаються мерехтіння ефектом, а не самого мерехтіння ефекту. Необхідно відзначити, що жодна з існуючих нині рекомендацій за попередньою оцінкою мерехтіння ефекту не є повністю задовільною.

UIE розробила міжнародний виміривач мерехтіння ефекту, який використовує два критерії для оцінки його серйозності:  $PS_t$  - короткочасну

дозу Фліккер і  $PL_t$  - тривалу дозу Фліккер. Цей прилад, таким чином, заснований на моделюванні, використовувався в ході досліджень, і на контрольних вимірах.

Рівень мерехтіння ефекту був стандартизований включенням в специфікацію рекомендацій ІЕС Це миттєве вимір флуктуацій напруги в діапазоні частот 0,5-35 Гц з зважуванням за методикою «lamp-eye».

Після цього отримане таким чином значення рівня мерехтіння ефекту піддається аналізу (розрахунків  $PS_t$  і  $PL_t$ ) для проведення статистичної обробки, яка і дозволяє оцінити серйозність впливу фліккер-ефекту. На цьому етапі статистичний підхід дозволяє вивести функцію, яка відображатиме кореляцію між видимим рівнем мерехтіння ефекту і відповідними частками його тривалості. Серйозність впливу фліккер-ефекту розраховується для стандартних проміжків часу (10 хв для коротких спотворень і 2 години для тривалих спотворень).

Проведені в Європі, США і Японії дослідження промислових установок, включаючи дугові печі, показали, що використання систем SVC дозволяє знизити  $PS_t$  до 1,5-2,6. Цей діапазон ефективності сильно залежить від потужності печі, потужності короткого замикання, проведеної оптимізації і від якості управління.

Зазвичай використовують кілька формул. Всі вони, природно, включають потужність короткого замикання печі (SCCF) і мережі (SCCR) в загальній точці підключення. Формули ці мають подвійне походження, теоретичне і емпіричне. У них входять емпіричні коефіцієнти, значення яких визначаються на основі досвіду користувача.

Перша серйозна спроба оцінити проблеми, викликані мерехтіння ефектом, була зроблена в Японії на основі критерію, який використовується іноді і тепер:  $\Delta v_{10}$ .

Можна встановити залежність цього критерію зі змінами напруги в мережі  $\Delta v_{10} = \Delta v_{\max} / 3,6$  і з максимальною  $PS_t$ :



$PS_t = 3 \cdot \Delta v10$ ,  $\Delta v10$  виражається в%; отже, максимальну  $PS_t$  можна виразити таким чином:

$$PSt_{max} \approx 3 \cdot \frac{\Delta Q_{max} \cdot d \cdot 100}{3,6 SCCR}$$

де  $d$  - емпіричний коефіцієнт, який має значення в інтервалі 1-1,3.

Для  $PS_t$  99% також можна вивести формулу для оцінки мерехтіння ефекту від дугового печі в загальній точці підключення  $P_{кз}$ :

$$PSt_{99\%} = KSt \cdot \frac{SCCF}{SCCR}$$

де  $KSt$  - типове значення (50-85) коефіцієнта передачі для розрахунку  $PSt$ .

Якщо максимальна зміна реактивної потужності не перевищує потужності короткого замикання печі, то обидві формули стають практично ідентичними.

Розрахунки  $PSt$  за цими формулами показують, що параметри SVC тісно пов'язані з потужністю короткого замикання мережі в точці загального підключення. Використовуючи TCR (реактор з тиристорним керуванням), ми можемо керувати реактором і побічно конденсатором.

Відновлення балансу мережі в цьому випадку стає можливим незалежно від величин  $P$  і  $Q$  однієї фази, тільки за рахунок впливу на активну і реактивну потужність.

На рисунок 1.19 показано зниження величини  $PSt$  промислової установки при наявності SVC (внизу) в порівнянні з роботою без SVC (вгорі). З малюнка добре видно поліпшення ситуації в мережі, при цьому виникає і приріст продуктивності дугового печі. Досягається зниження рівня мерехтіння ефекту майже в 2 рази [27].

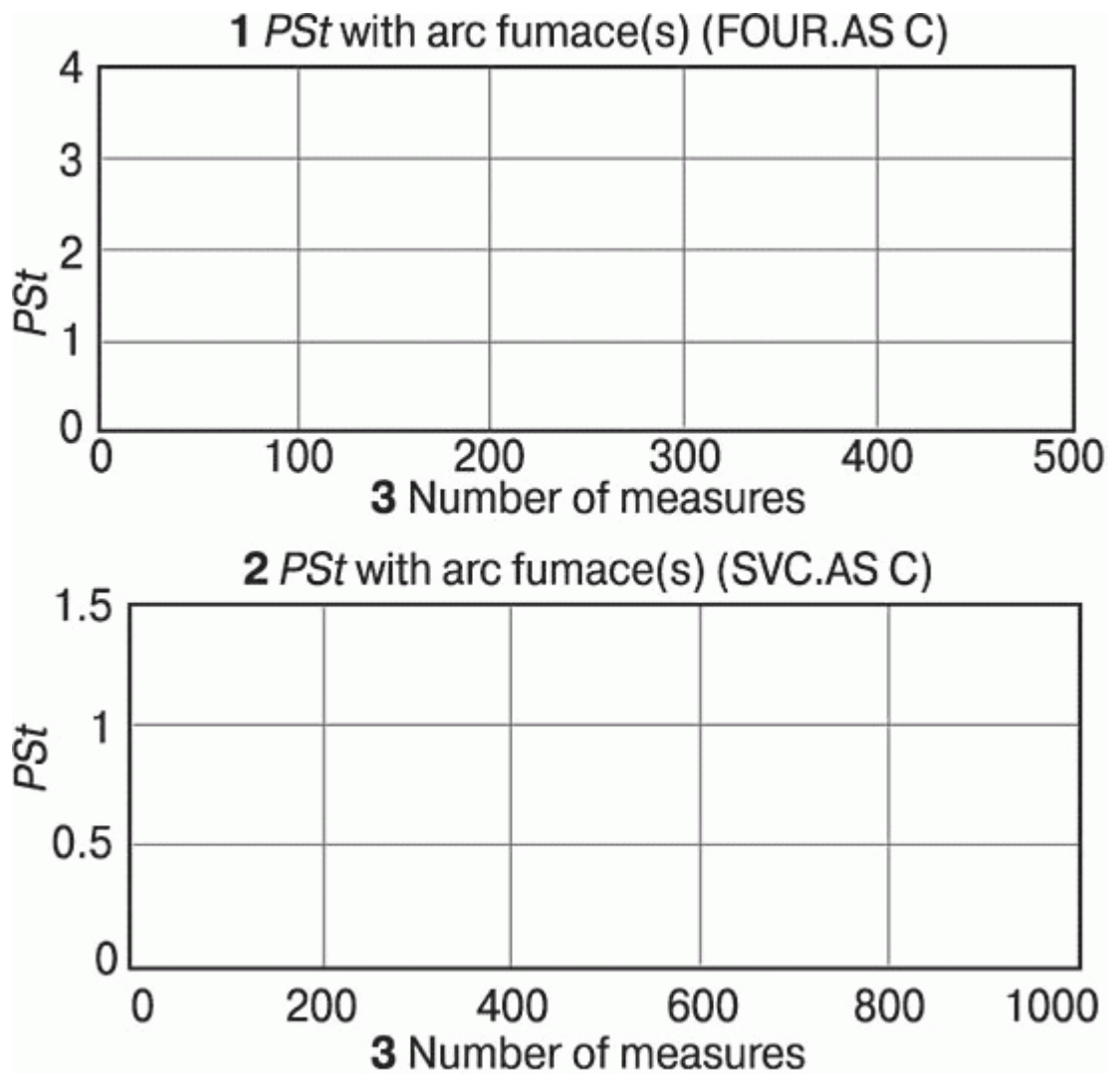


Рисунок 1.19. Зниження величини  $PSt$  промислової установки

1 Значення  $PSt$  для дугових печей

2 Значення  $PSt$  для дугових печей з SVC

3 Число вимірювань

Навряд чи можна досягти більшого при використанні класичної тиристорної SVC. Це в основному пов'язано з тим, що при визначенні  $PSt$  для оцінки мерехтіння ефекту брали до уваги тільки досить високі частоти (20-35 Гц). Однак часто виникає необхідність домогтися зниження мерехтіння ефекту в 4 рази. У цих умовах найбільш простим рішенням є збільшення потужності короткого замикання. Але підвищення SCC не завжди дається легко. Якщо необхідно будівництво нових ліній, це рішення може виявитися досить дорогим.

Звідси виникає пропозиція по використанню систем STATCOM. Маючи більш високим у порівнянні з SVC швидкодією, вони здатні компенсувати швидкі зміни навантаження. Оскільки вартість систем STATCOM істотно вище, ніж систем SVC, були запропоновані гібридні рішення (рис. 1.20):

- потужність від 70 до 80% забезпечується класичним SVC;
- потужність від 20 до 30% - забезпечується STATCOM.

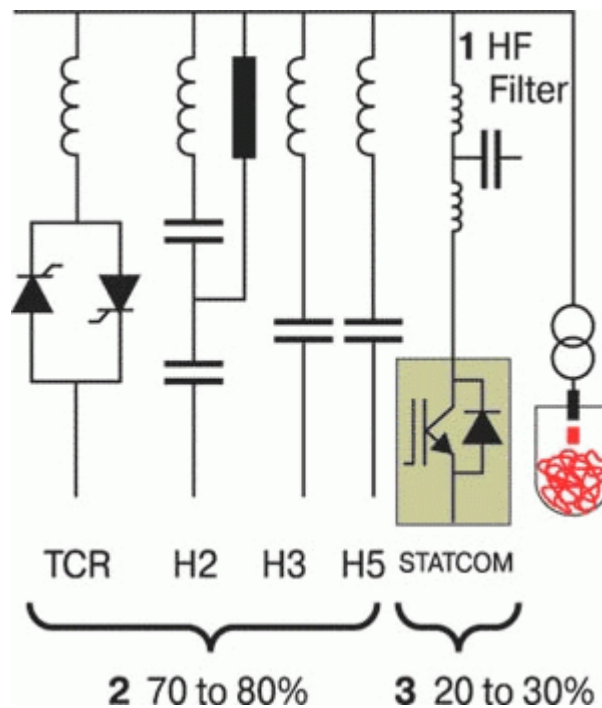


Рисунок 1.20. Схема промислової установки з системами SVC і STATCOM

1 Високочастотний фільтр

2 Від 70 до 80% потужності

3 Від 20 до 30% потужності

Це рішення розроблено недавно, для того щоб можна було оцінити його експлуатаційні характеристики, однак воно явно має велике майбутнє. Для дугового печі потужністю 100 МВА необхідне джерело регульованої напруги потужністю 20-30 МВА, заснований на IGBT або GTO. Потужність судових силових установок становить близько 20 МВт. У нафтохімії використовуються установки парового крекінгу потужністю 30 МВт. Ці

цифри характеризують можливі напрямки промислового застосування такого рішення

- Компенсація посадок напруги

Для захисту малопотужних споживачів відповідального призначення завжди можливе застосування автономних перетворювачів. Проблема ускладнюється при більш високих споживаних потужностях, що сягають сотень кіловат і навіть десятків мегават (наприклад, варіатори швидкості в нафтохімічній промисловості).

Оскільки для забезпечення безперебійного перебігу технологічного процесу при відключенні електроенергії завжди потрібні накопичувачі енергії, було б нерозумно думати, що використовуються в даний час зворотні перетворювачі здатні зберігати кількість енергії, достатню для компенсації посадок напруги, тривалість яких перевищує кілька мс.

Для того щоб забезпечити 1 МВт протягом однієї секунди при зниженні напруги на 100 В за рахунок перетворювача напруги потужністю 1 МВт з проміжним напругою 800 В постійного струму, він повинен мати батарею конденсаторів ємністю 10 фарад, що абсолютно нереально. Необхідно шукати інші рішення. Деякі з них щодо універсальні, оскільки діють на рівні мережі, решта обумовлюється типом технологічного процесу споживача [28].

- Шини постійного струму

Використання шин постійного струму має дві причини: розвиток перетворювачів напруги і необхідність зменшити забруднення внутрішньої мережі підприємства гармоніками. Ця технологія набула найбільшого поширення в металургії і паперової промисловості. Якщо виникає необхідність перерозподіляти енергію між різними приводами, які беруть участь у виробничому процесі, логічно знайти таке рішення, яке дозволить виробляти перерозподіл без виходу в мережу змінного струму, що виключить забруднення останньої.

Рисунок 1.21 ілюструє принцип дії шин постійного струму. Деякі установки включають в себе до 20 приводів, об'єднаних лише спільною кінцевим продуктом, наприклад, листовим металом. Наслідки збою електропостачання в такому випадку досить важкі. Тільки на видалення зіпсованого при відключенні продукту з установки може знадобитися кілька годин. Отже, необхідно мати хоча б мінімальний запас енергії, яка повинна бути доступна в інерційній формі всередині самого технологічного процесу. Якщо процес не володіє достатніми ресурсами енергії, їх необхідно надати. Можна розглянути кілька рішень.

На рисунку 1.21 показані два варіанти накопичення енергії: один - класичний, з використанням акумуляторної батареї, другий - інерційний. У другому випадку необхідно використовувати декілька систем управління, які будуть живити двигун з великою швидкістю обертання, наприклад, 6000 об / хв, щоб мати необхідний запас інерції для забезпечення енергією при збоях електропостачання.

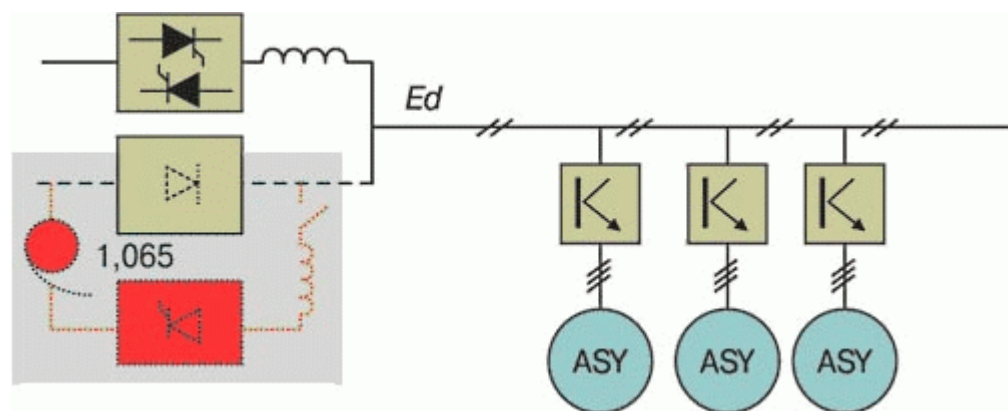


Рисунок 1.21. Принцип дії шин постійного струму

Перетворювач і електродвигун повинні бути оптимізовані в сенсі повертається потужності і інерційного запасу енергії. Слід зазначити, що інерційний принцип може сприяти вирівнюванню рівня потужності, що забирається з розподільних мереж циклічними технологічними процесами [29].

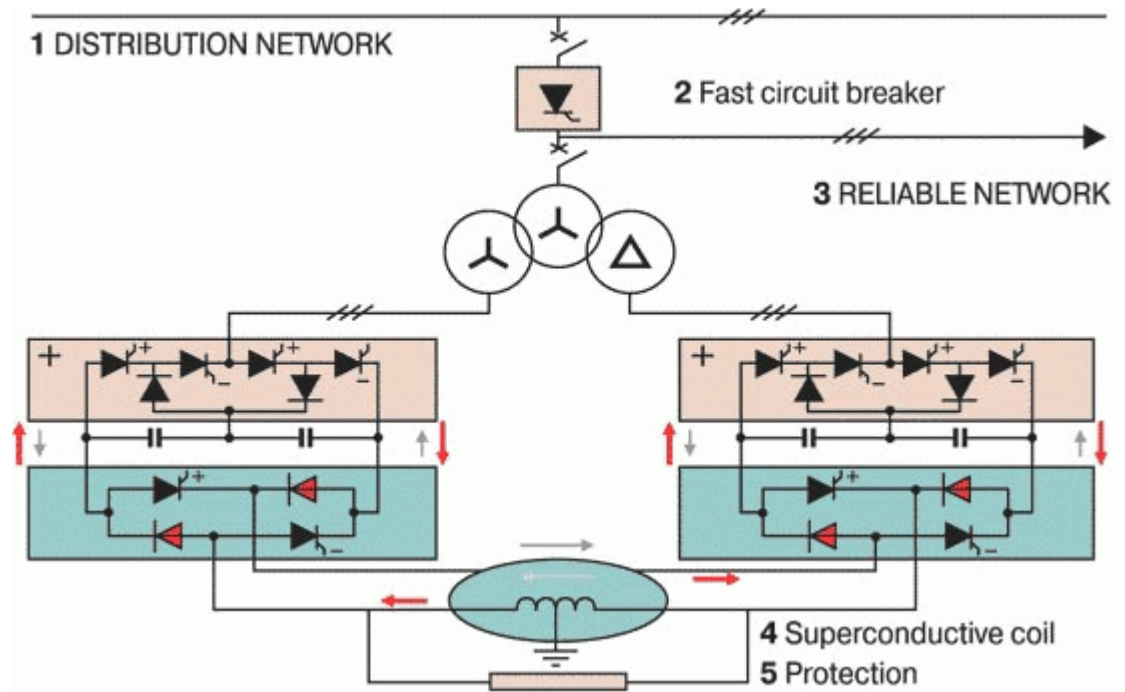


Рисунок 1.22. Класична компоновка системи зі збереженням енергії в надпровідній обмотці

- 1 Розподільна мережа
  - 2 Швидкодіючий роз'єднувач
  - 3 Надійна мережу
  - 4 Надпровідна обмотка
  - 5 Захист
- Надпровідності

Накопичувачі енергії використовуються для компенсації посадок напруги. Надпровідність є одним з найбільш багатообіцяючих способів зберігання електроенергії, хоча в даний час в Європі практично не використовується. Протягом останніх декількох років нині широко використовується явище високотемпературної надпровідності отримало практичне застосування в декількох установках в Канаді і в США - або для підвищення надійності роботи відповідальних споживачів, або для стабілізації мереж.

На рисунку 1.22 показана класична компоновка системи зі збереженням енергії в надпровідній обмотці. Принцип дії простий: ток циркулює в надпровідній обмотці, енергія з мережі споживається тільки для

відшкодування втрат. При збої в розподільній мережі (посадці напруги) електромагнітна енергія, що зберігається в обмотці, звільняється для підживлення «рестабілізованої» мережі. Існують установки, здатні видавати 10 МВт протягом декількох секунд, проте типовим є 1 МВт протягом 1-2 с [30].

- Вибір напруги промислової розподільної мережі

Розподільні мережі повинні відповідати потребам споживачів. Деякі виробничі процеси вимагають потужності в кілька сотень МВт. Прикладом є цехи по виробництву алюмінію: 450 кА постійного струму при напрузі 1000В.

До таких підприємств зазвичай приходять ЛЕП з напругою понад 300 кВ. І тут виникає питання вибору напруги для розподільної мережі, до якої будуть підключатися фільтри і компенсаційне обладнання. Відповіддю на це питання може стати організація декількох розподільних мереж, які обслуговують одне й те саме підприємство. Таке рішення досить часто виправдовує себе, хоча б з точки зору надійності електропостачання. При збої в мережі краще втратити 50% потужності, ніж всю. Існують прості правила для проектування розподільних мереж:

а) Струми короткого замикання. Їх значення повинні бути порівнянні з параметрами наявної на ринку комутаційної апаратури (роз'єднувачів). Розробка або застосування унікальних роз'єднувачів під специфічне завдання є стратегічною помилкою, по-перше, через високу вартість і тривалості виготовлення, і по-друге, через можливі проблеми з запасними частинами та обслуговуванням. При заданій потужності чим нижче напруга, тим вище струми короткого замикання.

б) Напруга. При заданій потужності чим вище напруга, тим нижче струм. Це зауваження стосується й гармоникам. В результаті чим нижче напруга, тим потрібні великі конденсаторні батареї-фільтри.

в) Опір короткого замикання. Чим нижче повний опір, тим тонша фільтрація необхідна для нормальної роботи. В цьому випадку для ефективної роботи фільтри повинні мати низький опір на частоті резонансу.

Якщо фільтрація не є повністю задовільною, різні групи, що живлять серію, наприклад, електролітичних ванн, не будуть повністю розділені. Іншими словами, відключення однієї групи впливатиме на інші групи. В результаті оптимальний розрахунок трансформаторів груп стане неможливим і доведеться проводити їх вибір з економічних міркувань [31].

### **Висновки до розділу 1**

1. Аналіз сучасного стану електроенергетичної галузі України свідчить, що її інтеграція з електроенергетичним сектором країн ЄС можлива тільки за умови дотримання жорстких вимог до параметрів якості електричної енергії, які повинні знаходитись у межах допустимих рівнів, встановлених у нормативних документах. При цьому слід зауважити, що якість електричної енергії в значній мірі впливає на надійність функціонування електроенергетики України, і є постійно діючим фактором, який може призводити до необґрунтованих економічних втрат як безпосередньо енергопостачальних компаній, так і багатьох споживачів електричної енергії. Задля досягнення цієї непростой задачі, насамперед, необхідний чіткий контроль за показниками якості електричної енергії.

2. Основною проблемою контролю за показниками ЯЕЕ в Україні є відсутність засобів автоматичного збору та обробки інформації що в свою чергу гостро ставить перед нами питання про підвищення швидкодії збору та обробки інформації. Адже на даний момент перепоною для швидкого визначення та ідентифікації спотворень інформаційних сигналів є досить недосконала методика збору та обробки (систематизації) даних.

3. Нечітка інформація стосовно конкретної величини спотворень сигналу в свою чергу також несе за собою величезні витрати. Що стає передумовою пошуку рішень що до підвищення точності та швидкодії вимірювань показників ЯЕЕ.



## РОЗДІЛ 2 РОЗРОБКА СПОСОБУ ВИЗНАЧЕННЯ НАЯВНОСТІ СПОТВОРЕНЬ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

### 2.1. Методи визначення параметрів якості електричної енергії

Як відомо, існує дві основні групи спотворень якості електричної енергії: стаціонарні (або квазістаціонарні) і спотворення, що змінюються у часі [32]. Гармоніки та інтергармоніки, коливання напруги і небаланс напруг відносяться до першої групи, а перехідні процеси напруги (voltage transient), зниження/перевищення напруги, переривання напруги та інші високочастотні спотворення складають другу групу.

Велика кількість методів обробки інформаційних сигналів використовується для визначення показників якості електричної енергії. Так одним із найбільш поширених є, так званий, метод середньоквадратичних значень на основі апроксимації кривої вхідного сигналу спеціальною функцією, яка забезпечує задовільну апроксимацію амплітуди основної частоти електричної мережі. Перевагою даного методу є його простота, швидкість обчислень, незначний об'єм пам'яті для зберігання результатів обчислень [33]. Але його результати дуже залежать від розміру обчислювального вікна і при цьому не розрізняються гармоніки та компоненти шуму. На даний час цей метод використовується тільки для визначення середньоквадратичного значення напруги електричної мережі та для автоматичної класифікації сигналів.

Необхідно також відмітити широке застосування для визначення показників якості електричної енергії фільтрів Калмана, які визначають просторовий стан моделі сигналу для визначення амплітуди і фази основної частоти і гармонік навіть за наявності шуму [34]. Недоліком є велика похибка при визначенні короткочасних і високочастотних спотворень.

Найбільш широко використовуваним апаратом для аналізу параметрів якості електричної енергії є швидке перетворення Фур'є (ШПФ), яке трансформує сигнал із часового простору у частотний його декомпозицією на декілька частотних компонент [35]. Але алгоритм Фур'є має декілька джерел методичних похибок, які призводять до зниження точності результатів аналізу та його якісного спотворення. Головним недоліком є обмеженість частотної роздільності та недостатня точність оцінки частоти окремої гармонічної компоненти. У першому випадку – це роздільна здатність розділення двох спектральних компонент із близькими частотами, а в другому – правильність визначення частоти відокремленої гармонічної компоненти.

Для збільшення точності проведення перетворення Фур'є використовують цілий ряд додаткових математичних перетворень. Таким чином, задля виключення з розрахунків ефекту розсіювання (коли довжина часової вибірки функції, яка аналізується, не дорівнює періоду) проводиться синхронізація частоти сигналу з частотою дискретизації [36], доповнення нулями вихідної вибірки аналізує мого сигналу [37] та використовуються часові чи спектральні вікна [38]. Діючим способом зменшення спектральних витоків слід вважати застосування віконних функцій у відповідності із інтерполяційним алгоритмом [39, 40].

Але вказані способи не дають збільшення частотної роздільності. Використання часових чи спектральних вікон дає можливість зменшити ефект розсіювання через погіршення частотної роздільності (через виключення частоти інформації про функцію), а у разі доповнення вихідної вибірки нулями зростає вибірність оцінювання частот вузькосмугових спектральних піків через зменшення нерівномірності амплітудно-частотної характеристики і похибок, що пов'язані з її нерівномірністю.

Здебільшого, розглянуті засоби ідентифікації спотворень, використовуються для простих (однотипних) спотворень. Відносно електроенергетичних систем слід зазначити їх особливість – це присутність

в одному інтервалі часу (періоді) кількох видів спотворень сигналу. Ідентифікація двох видів спотворень висвітлена такими дослідниками, Abdel-Galil (2004 p.) [41] та (2006 p.) [42]. Далі Riberio у 2007 році пропонував спосіб поділу електричного сигналу на ряд компонент для класифікації спотворень у електричній мережі [43]. Але цей підхід був досить складним і не давав можливості класифікувати флікер (коливання частоти), інтергармоніки та несиметрію. Lie (2007 p.) запропонував один з варіантів опорних векторів (SVM) для розпізнання складних спотворень. Хоч це і дало можливість ідентифікувати напругу і гармоніки одночасно, але розпізнання потребувало досить багато часу на попередньо зібраних даних для тренування моделі [44]. Нуварінен (1999 p.) [45] запропонував метод ІСА (Independent component analysis), який в (2009 p.) D. Ferreira [46] корегував для розпізнання декількох одночасних спотворень. Данній метод міг виділяти інформацію між незалежними, один від одного, джерелами спотворень для моделювання експериментальних даних. Та його використання в електричній мережі дає досить неточні результати, що обумовлені присутністю шумових компонент та інших інформаційних сигналів.

Використання вейвлет-аналізу для розпізнання і класифікації спотворень ЯЕЕ широко почало розроблятися в 2000 році. Доречно відмітити роботи Yang (2000 p.), Elmitwally та Yang (2001 p.) [47], Gaouda (1999 p.), основною метою яких ставилось знищення шуму спотвореного сигналу, його визначенням та локалізацією. Наступні дослідження показали сильну залежність вектору ознак ідентифікації від шуму. Dwivedi у 2009 році [48] пропонував простий та комплексний методи задля побудови вектору ознак розпізнання спотворень сигналу за наявності шуму. Запропонований метод не потребував складної роботи стосовно видаленню шуму обробкою кожного вейвлет-коефіцієнту та ґрунтувався на техніці Колмогорова-Смирнова [44].

Розбір та аналіз зазначених джерел дозволив описати головні існуючі методи розпізнання типу спотворень ЯЕЕ:

- штучні нейронні мережі (скриті марківські моделі). Досліджувались ученими Perunicic в 1998 році, Santoso в 2000 році, Gaouda в 2002 році, Gaing в 2004 році, Mishra в 2008 році, Zwe-Lee Ching в 2004–2012 роках [49];
- на базі експертних систем – Santoso в 2000 році, Styvaktakis в 2001, 2002 році, Chung в 2002–2009 роках, Reaz в 2007–2011 роках та адаптивної нечіткої системи – Ibrahim в 2001 році [50];
- системи з нечіткою логікою – Dash (2000 р.), Tharak(2003 р.), Zau в 2004 році, Chilukuri в 2004–2008 роках, Ortiz в 2006–2009 роках, Bizjak в 2006–2010 роках [51];
- SVM – методологія навчання за прецедентами (Bishop, Moulin, Lin, Axelberg, Roberts [52];
- комбіновані методи – штучні нейронні мережі та SVM [53];
- вейвлети, моделі Маркова [54], Фур'є-аналіз та експертні системи із нечіткою логікою [55].

Аналіз використанні цих методів дозволив сформувані основні проблеми при класифікації спотворень електричної енергії, що мало вирішені на даний момент. До них відносяться :

- Основна частина методів класифікації розрізняють тип спотворень не проводячи аналіз їх появи в тоді, як однакові типи спотворень можуть з'являтися з різними причинами
- в більшості методів розглядаються окремо спотворення короткочасні і високочастотні чи, спотворення перехідних процесів, що не дозволяє використання уніфікованих методик та методів їх визначення;
- можливо з'ясувати час появи спотворення та його тривалість лише за допомогою кількох методів класифікації;

- на локалізацію і компактність властивостей сигналу у часово-частотному просторі значною мірою впливає вибір базису розкладання сигналу, що призводить до похибок класифікації;
- кількість та місцезоташування джерела спотворення ЯЕЕ у системах електропередачі відомі дуже приблизно, а рівень спотворень, що вони створюють, практично невідомий (при цьому джерел спотворень може бути декілька);
- нормування деяких показників якості електричної енергії (ПЯЕ) проводиться за умови, що в цей момент часу присутній тільки один тип спотворень якості електричної енергії. Отже, одночасна дія кількох типів спотворень не враховується;
- на сьогодні немає безперервного контролю за параметрами ЯЕЕ.

Роблячи висновок з багатьох наукових публікацій моніторинг виявлення наявності спотворень ЯЕЕ у реальному часі на даний час неможливий, так як їх визначення потребує часу для збору даних та їх статистичної обробки. При цьому кожен тип спотворення потребує для своєї ідентифікації окремого алгоритму та математичного апарату.

Через це доречним з науково-практичної точки зору є розробка способу визначення наявності спотворення (не залежно від його класу) в реальному часі, які дозволять:

- визначати та ідентифікувати наявності спотворення напруги і струму;
- забезпечити визначення окремих типів спотворення, які одночасно наявні у електричній мережі.

## **2.2 Розробка способу виявлення та ідентифікації спотворень якості електроенергії**

### **2.2.1 Перетворення Лапласа дискретизованного сигналу**

В лінійних, неперервних (дискретизованих) системах із зосередженими параметрами тимчасові функції часто мають вигляд суми експоненціальних складових:

$$f(t) = a_1 e^{s_1 t} + a_2 e^{s_2 t} + \dots = \sum_{k=1}^{k=m} a_k e^{s_k t}, \quad t > 0,$$

$$f(t) = 0, \quad t < 0,$$

Де  $s_k$  - полю перетвореного в комплексну площину; сигналу, які можуть бути або дійсними, або являти собою комплексно-зв'язані пари, а  $e^{s_k t}$  - звичайна форма цих складових.

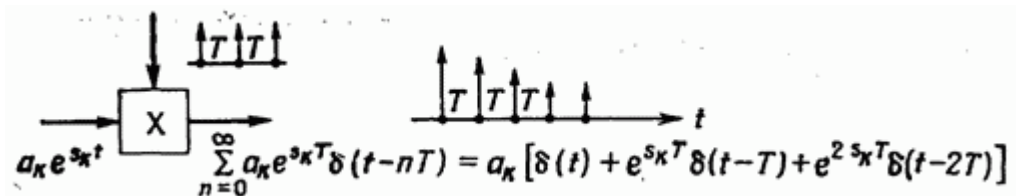


Рисунок 2.1 - Імпульсна дискретизація одиночного експоненціального сигналу.

Розглянемо імпульсну дискретизацію однієї складової  $f_k(t) = a_k e^{s_k t}$  (рис.2.1). Дискретизований сигнал буде описуватися виразом

$$f_k^*(t) = \sum_{n=0}^{n=\infty} a_k e^{s_k n T} \delta(t - nT) =$$

$$= a_k [\delta(t) + e^{s_k T} \delta(t - T) + e^{2s_k T} \delta(t - 2T) \dots],$$

яке являє собою суму затриманих (запізнілих) імпульсів з комплексними коефіцієнтами  $a_k e^{s_k T}$ ,  $a_k e^{2s_k T}$ , ...

Оскільки перетворення Лапласа запізненого імпульсу виражається як

$$\mathcal{L}\delta(t - nt) = e^{-snT},$$

то перетворення дискретизованої експоненти можна записати у вигляді

$$\mathcal{L}f_k^*(t) = F_k^*(s) = a_k [1 + e^{s_k T} e^{-sT} + e^{2s_k T} e^{-2sT} + \dots],$$

Або як

$$F_k^*(s) = \frac{a_k}{(1 - e^{s_k T} e^{-sT})} = \frac{a_k}{1 - e^{(s_k - s) T}}$$

При  $|e^{(s_k - s)T}| < 1$  Отриманий результат можна порівняти з перетворенням відповідного аналогового сигналу

$$\mathcal{L} a_k e^{s_k t} = \frac{a_k}{(s - s_k)}.$$

### 2.2.2 Перетворення Котельнікова

Передача безперервних (аналогових) сигналів по лінії зв'язку припускає передачу нескінченної кількості їх миттєвих значень протягом кінцевого проміжку часу. При цьому спектр фінітного, тобто обмеженого в часі, безперервного сигналу нескінченний. Однак, на практиці різні радіотехнічні пристрої (фільтри, підсилювачі та інші) мають обмежену смугу пропускання, що призводить до обмеження спектра сигналу деякою граничною частотою  $f_B$  (або  $\omega_B$ ), яка визначається властивостями одержувача повідомлень. Так наприклад, загальноприйнятою нормою в системах передачі мовних сигналів є обмеження спектра сигналу в межах  $(0,3/3,4)$  кГц, в системах телебачення  $-(0/6)$  мГц. Як подолати протиріччя між обмеженням спектра сигналу і кінцевим часом його існування? Відповідь на це питання дає теорема, сформульована і доведена академіком В.А. Котельниковим і отримала назву теореми Котельнікова або теореми відліків.

Теорема Котельнікова формулюється образом. Непреривний сигнал  $s(t)$ , обмежений по спектру частотою  $f_B$  (або  $\omega_B$ ), повністю визначається сукупністю миттєвих значень (відліків)  $s(t_k)$  в моменти часу  $t_k = k\Delta t$ , віддалені один від одного на інтервал часу  $\Delta t = \frac{1}{2f_B} = \frac{\pi}{\omega_B}$ .

Математично теорема Котельнікова визначається виразом

$$s(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} s(k\Delta t) \frac{\sin 2\pi f_B(t - k\Delta t)}{2\pi f_B(t - k\Delta t)} = \sum_{k=-\infty}^{\infty} s(k\Delta t) \frac{\sin \omega_B(t - k\Delta t)}{\omega_B(t - k\Delta t)},$$

або

$$s(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} s(k\Delta t) \cdot \text{sinc } 2\pi f_B(t - k\Delta t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} s(k\Delta t) \cdot \text{sinc } \omega_B(t - k\Delta t),$$

яке являє собою розкладання сигналу  $s(t)$  в особливого роду ряд по системі базисних функцій

$$\{\eta_k(t)\} = \left\{ \frac{\sin 2\pi f_B(t - k\Delta t)}{2\pi f_B(t - k\Delta t)} \right\},$$

є ортогональними на інтервалі часу  $(-\infty; \infty)$

### 2.2.3 Перетворення Фур'є.

Розглянемо дискретний сигнал  $S_d(t)$  як результат множення безперервного сигналу  $S(t)$  на гратчасту функцію:

$$s_d(t) = s(t) \sum_{n=0}^{N-1} \delta(t - n \cdot \Delta t) = \sum_{n=0}^{N-1} s(t) \delta(t - n \cdot \Delta t),$$

де  $\delta(t)$  - дельта- функції:

$$\delta(t) = \begin{cases} \infty & \text{если } t = 0; \\ 0 & \text{если } t \neq 0, \end{cases}$$

$\Delta t$ -інтервал дискретизації. Графічно процес дискретизації можна уявити, як це показано на рис 2.2.

Обчислимо перетворення Фур'є дискретного сигналу  $S_d(t)$ :

$$S_d(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} s_d(t) \exp(-j\omega t) dt = \int_{-\infty}^{\infty} \sum_{n=0}^{N-1} s(t) \delta(t - n \cdot \Delta t) \exp(-j\omega t) dt.$$

Поміняємо місцями операції підсумовування і інтегрування і використовуємо фільтруюче властивість дельта-функції:



$$\int_{-\infty}^{\infty} s(t)\delta(t - \tau)dt = s(\tau).$$

Тоді вираз (5) з урахуванням (6) набуває вигляду:

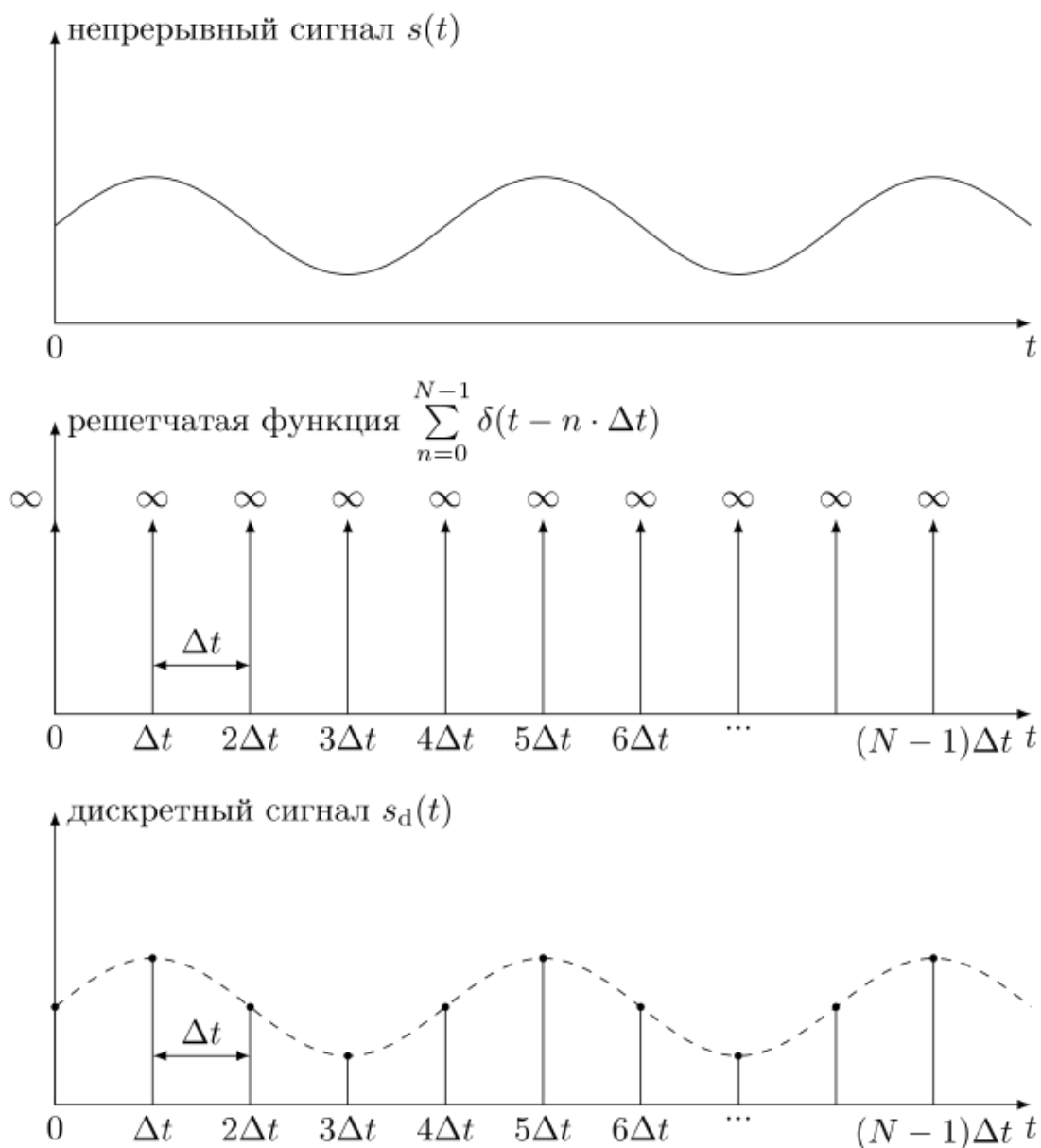


Рисунок 2.2 - Процесс дискретизации сигнала

$$\begin{aligned} S_d(\omega) &= \sum_{n=0}^{N-1} \int_{-\infty}^{\infty} s(t)\delta(t - n \cdot \Delta t) \exp(-j\omega t) dt = \\ &= \sum_{n=0}^{N-1} s(n \cdot \Delta t) \exp(-j\omega \cdot n \cdot \Delta t). \end{aligned}$$

Таким чином, ми позбулися інтегрування в нескінченних межах, замінивши його кінцевим підсумовуванням комплексних експонент.

Комплексні експоненти  $\exp(-j \cdot \omega \cdot n \cdot \Delta t)$  у виразі є періодичними функціями з періодом:

$$\Omega(n) = \frac{2\pi}{n \cdot \Delta t} = 2\pi \cdot n \cdot F_s, \text{ рад/с, } n = 1 \dots N - 1,$$

Де  $F_s = 1/\Delta t$  - частота дискретизації сигналу (Гц).

Необхідно відзначити, що  $n=0$  виключено, так як при  $n=0$  комплексна експонента дорівнює одиниці. Максимальний період повторення спектра  $S_d(\omega)$  буде при  $n=1$ , в цьому випадку він дорівнює  $\Omega_{\max} = \Omega(1) = \frac{2\pi}{\Delta t} = 2\pi \cdot F_s$  рад/с.

Таким чином, спектр  $S_d(\omega)$  дискретного сигналу,  $S_d(t) \in 2\pi \cdot F_s$ -періодична функція циклічної частоти  $\omega$ . Якщо ми введемо нормування частоти дискретизації  $F_s=1$  Гц, переходить до вираження дискретно-часового перетворення Фур'є (ДВПФ):

$$S(\omega_n) = \sum_{n=0}^{N-1} s(n) \exp(-j\omega_n n).$$

ДВПФ використовує тільки індекси відліків вхідного сигналу  $S(n)$  при частоті дискретизації  $F_{s=1}$  Гц. В результаті ДВПФ ми отримуємо  $2\pi$  періодичну функцію  $S_d(\omega_n)$  нормованої циклічної частоти  $\omega = \omega/F_s$ .

Оскільки спектр дискретного сигналу - періодична функція, то можна розглядати тільки один період повторення спектра  $S_d(\omega)$  при  $\omega=[0, 2\pi F_s]$  рад/с або  $S_d(f)$  при  $f=[0, F_s]$  Гц [56].

### 2.2.4 Вейвлет- перетворення

В останні десятиліття в світі виникло і оформилося новий науковий напрям, пов'язаний з так званим вейвлет-перетворенням. Слово «wavelet» означає невеликі хвилі, прямуючи одна за другою. В даний час вейвлет-перетворення широко застосовуються для розпізнавання і аналізу

нестационарних сигналів, особливо при вирішенні завдань стиснення і відновлення сигналів [55].

Вейвлетного аналіз являє собою особливий тип лінійного перетворення інформаційних сигналів і відображаються цими сигналами фізичних даних про процеси і фізичні властивості природних середовищ і об'єктів. Вейвлет-перетворення відрізняються від перетворень Фур'є, Котельникова, Лапласа тим, що гармонійні (синусоїдальні) функції локалізовані по частоті, а функції Дірака - за часом. Вони застосовуються для аналізу і обробки сигналів і функцій, нестационарних в часі або неоднорідних в просторі, коли результати аналізу повинні містити не тільки загальну частотну характеристику сигналу (розподіл енергії по частотним складовим), але і відомості про певні властивості тих чи інших груп частотних складових або швидких змінах частотних складових сигналу.

У порівнянні з перетворенням Фур'є вейвлет-перетворення здатні з набагато більшою точністю представляти (виявляти) локальні особливості сигналів, аж до розривів 1-го роду (стрибків).

Як відмічалось раніше, моніторинг параметрів ЯЕЕ у реальному часі неможливий на даний час, оскільки їх визначення потребує часу для збору даних та їх статистичної обробки. А також, у більшості випадків, кожен параметр ЯЕЕ потребує для свого визначення окремого алгоритму та математичного апарату. На даний час не існує узагальненого параметру визначення наявності довільного типу спотворень. Тому актуальною із науково-практичної точки зору є розробка способу однозначної ідентифікації погіршення ЯЕЕ у реальному часі.

Як показують результати багатьох досліджень, для аналізу структури сигналів різноманітної тривалості необхідні частотно-часові атоми з різноманітними часовими носіями. У ортогональних перетвореннях, в якості сімейства таких частотно- часових атомів, застосовується вейвлет-функція  $\psi_{u,s}(t)$  в результаті її масштабування на величину  $s$  і зсуву- на величину  $u$ :

$$\Psi_{u,s}(t) = \frac{1}{\sqrt{s}} \Psi\left(\frac{t-u}{s}\right).$$

При цьому, ортогональне перетворення  $\psi \in L^2(\mathbb{R})$  від часу  $u$  і масштабу  $s$  є наступним

$$Wf(u, s) = \langle f, \Psi_{u,s} \rangle = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \frac{1}{\sqrt{s}} \Psi\left(\frac{t-u}{s}\right) dt,$$

де  $\langle f, \Psi_{u,s} \rangle$  - скалярний добуток.

Вейвлет-перетворення може фокусуватись на локальних структурах сигналу за допомогою процедури наближення та віддалення об'єктів, яка поступово зменшує/збільшує масштабний параметр. Особливості і негладкі структури сигналу часто міста основну інформацію

про його характеристики. Оскільки локальна гладкість сигналу характеризується зменшенням амплітуди вейвлет-перетворення і зменшенням масштабу, в роботі досліджено особливості і перепади сигналу шляхом аналізу локальних максимумів вейвлет перетворення при малих масштабах, що дозволило деталізувати місця «аномалій» у сигналі.

Як відомо, щоб охарактеризувати структуру з особливостями (зміна параметрів сигналу у електричній мережі), необхідно надати точне кількісне відображення гладкості сигналу  $f(t)$ . Скористаємось для цього показниками Ліпшиця, які дозволяють виміряти рівномірну гладкість на часових інтервалах, а також і у довільній точці  $v$ . Якщо  $f(t)$  має особливість при  $t = v$ , яка означає, що функція недиференційована в даній точці, то показник Ліпшиця при  $t = v$  характеризує сингулярну поведінку функції.

Як відзначалось раніше, зменшення амплітуди вейвлет-перетворення в залежності від масштабу зв'язано з рівномірною і точковою гладкістю Ліпшиця сигналу. Вимірювання цього асимптотичного убунання еквівалентне наближенню структур сигналу при масштабі, який прямує до нуля. Припускаємо, що вейвлет у мас  $n$  нульових моментів і належить  $C^n$  ( $n$  - разів безперервно диференційована функція) з швидко спадаючими

похідними. Це означає, що для довільних  $0 < k < n$  і  $m \in N$  ( $N$  - множина додатних значень чисел, включаючи і нуль) існує константа  $C_m$ , така що

$$\forall t \in R \left| \psi^{(k)}(t) \right| \leq \frac{C_m}{1 + |t|^m}$$

Теорема, яка зв'язує рівномірну гладкість Ліпшиця  $f(t)$  на інтервалі з амплітудою її вейвлет-перетворення при малих масштабах наступна. [16,21] Якщо  $f \in L^2(R)$  задовольняє умові Ліпшиця  $a$ ,  $a \leq n$ , на  $[a,b]$ , то існує  $A > 0$  таке, що

$$\forall (u,s) \in [a,b] \times R^+ \left| Wf(u,s) \right| \leq A s^{a+1/2}$$

Нерівність являється умовою асимптотичного спадання  $|Wf(u,s)|$ , якщо  $s$  прямує до нуля. Перевіримо це ствердження на прикладі вейвлет-аналізу досліджуваного сигналу із наявністю розривів першого роду (рис. 2.4).

Як видно на рис.2.4, при зменшенні масштабу функція  $|Wf(u,s)|$  характеризує дрібномасштабні зміни довкілля  $u$ . Чорні, сірі та білі точки відображають відповідно додатні, нульові і від'ємні вейвлет-коефіцієнти [32].

Зменшення амплітуди вейвлет-перетворення не вимірюється безпосередньо у масштабно-часовій площині  $(u,s)$ , а контролюється за його максимальним значенням. Термін «максимум модуля» буде використовуватись для опису довільної точки  $(u_0,s_0)$ , такої, що  $|Wf(u,s_0)|$  має локальний максимум в точці  $u = u_0$ .

Оскільки інформаційні потоки в електроенергетиці представлені у вигляді дискретних часових рядів, у роботі застосовується дискретне вейвлет-перетворення (у подальшому- вейвлет –перетворення).

У дискретному представленні вейвлет–перетворення неперервної функції  $f(t)$ , яка рівномірно обертається з кроком  $N^{-1}$  на відрізку  $[0,1]$ , може бути обчислене з масштабом  $N^{-1} < s < 1$ . Для розгляду маємо дискретний сигнал  $f[n]$  тривалістю  $N$ . Його дискретне вейвлет-перетворення

обчислюється для масштабів  $s=a^j$ , де  $a=2^{1/\nu}$ , і  $\nu$  забезпечує проміжні масштаби в кожному напівінтервалі  $[2^j, 2^{j+1}]$ .

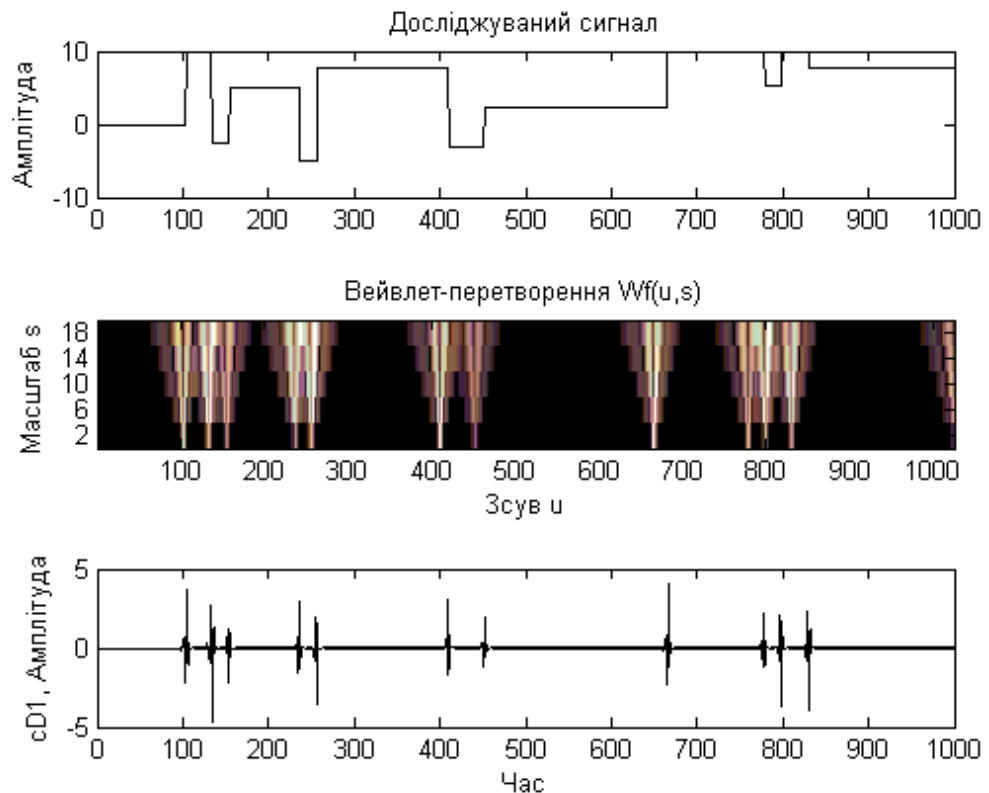


Рисунок 2.4 - Вейвлет-перетворення  $Wf(u,s)$  обчислене для сигналу  $f(t)$ , зсув  $u$  та масштаб  $s$  змінюються відповідно вздовж горизонтальної та вертикальної осей.

Нехай  $\psi(t)$ - вейвлет, носій якого міститься на відріжку в  $[-K/2, K/2]$ . При  $2 \leq a^j \leq NK^{-1}$  дискретний вейвлет, масштабований на  $a^j$ , визначається як

$$\psi_j[n] = \frac{1}{\sqrt{a^j}} \psi\left(\frac{n}{a^j}\right)$$

Даний дискретний вейвлет має  $Ka^j$  ненульових значень на відріжку  $[-N/2, N/2]$ ,

Масштаб  $a^j$  має бути більше 2, в протилежному випадку крок вибірки може бути більше носія вейвлета. Тому при обчисленні найменший масштаб вейвлет-перетворення обмежений розділенням дискретних даних. Як було

показано раніше, дискретне вейвлет-перетворення обчислюється з масштабом  $2^j > s > \mu N^{-1}$ , де  $\mu$  може бути достатньо велике для того, щоб усунути вплив неточної вибірки на вейвлети найменшого масштабу. Тому найбільший масштаб  $2^j$  потрібно обирати так, щоб він був меншим, ніж відстань між двома послідовними особливостями у часі, для того, щоб запобігти впливу інших особливостей на  $Wf(u, s)$ .

При кожному масштабі  $2^j$  представлення максимумів дає значення  $Wf(u, 2^j)$  там, де  $|wf(u, 2^j)|$  - локальний максимум. При цьому, коли значення функції  $f(t)$  зрушене на  $\tau$ , кожне  $Wf(u, 2^j)$  також зрушене на  $\tau$ , як і їх максимуми.

### 2.2.5 Спосіб визначення наявності спотворень ЯЕЕ

Як було відмічено раніше найбільш розповсюдженим методом аналізу частотних рядів є швидке перетворення Фур'є (ШПФ). Застосування даного методу дозволяє виявити гармонічний склад часового ряду (наявність гармонік), але без прив'язки їх до часової мітки (коли з'явилися/ зникли).

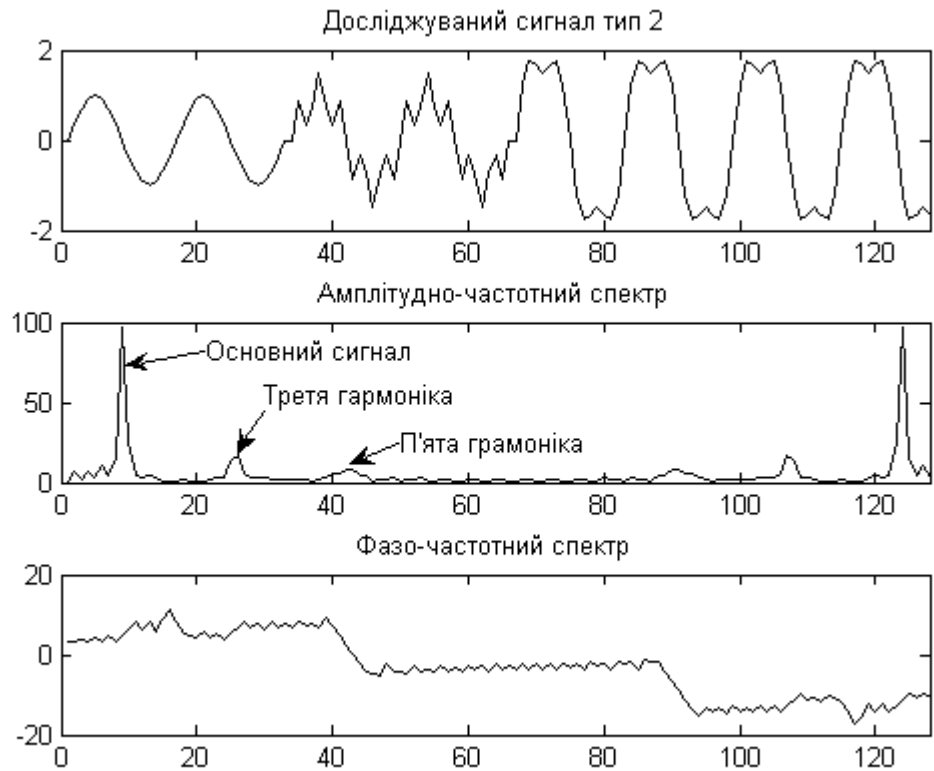
Тому розглянемо спосіб такого визначення на прикладі застосування ортогонального перетворення.

В якості прикладу застосуємо часовий ряд в якому є основна частота (50Гц) та третя (150Гц) та п'ята гармоніки(250Гц). Дослідимо його за допомогою ШПФ та вейвлет-аналізу (ВА). На рисунку 2.5 представлені результати а – ШПФ, б – ВА

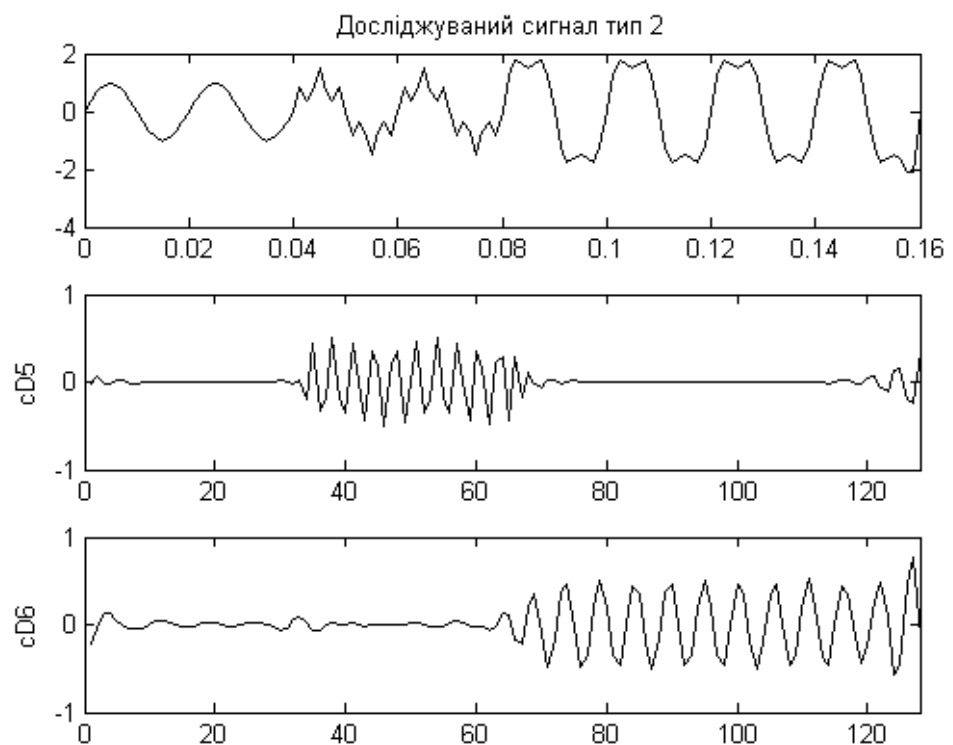
Аналіз результатів дослідження показав наступне. ШПФ підтверджує тільки наявність у сигналі основної, третьої та п'ятої гармонік. Результати ВА показують наступне. Значення вейвлет коефіцієнтів cD1-першого рівня декомпозиції сигналу ( $Wf(u, 2)$ ) свідчить про наявність спотворення форми сигналу. А результати розкладання п'ятого рівня (200-400Гц) та шостого рівня (100-200 Гц) показують не тільки наявність третьої (150Гц) та п'ятої гармоніки, а і їх появлення та зникнення.

Проведений аналіз результатів дослідження довів можливість створення інформаційної моделі виявлення наявності спотворень якості

електричної енергії, яка представляє собою структуру порівневого, частотного обчислення локальних максимумів вейвлет-перетворення ( $|Wf(u, 2^j)|$ ). Даний алгоритм представлений на рисунку 2.6.



a)





б)

Рис. 2.5 – Результати проведення: а – швидке перетворення Фур'є та б – вейвлет-аналіз.

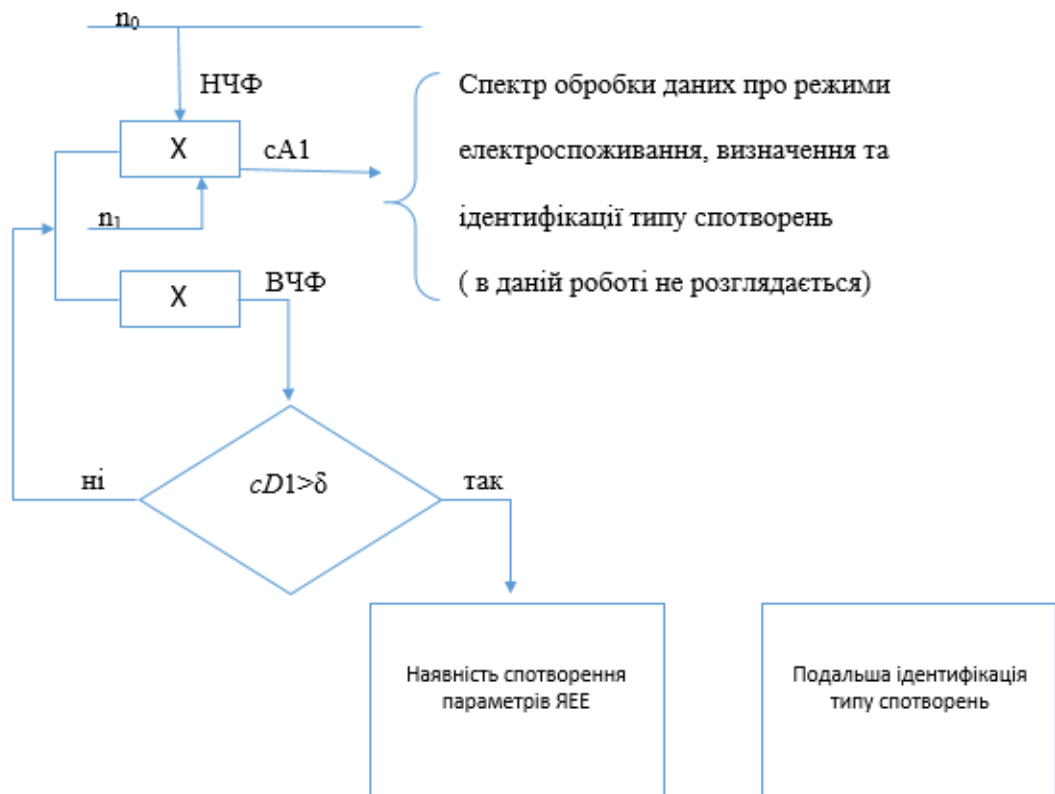


Рисунок 2.6 - Структуру порівневого, частотного обчислення локальних максимумів вейвлет-перетворення ( $|Wf(u, 2^j)|$ )

Де  $n_0$  – низькочастотний фільтр,  $n_1$  – високочастотний фільтр,  $f(t)$  – досліджуваний сигнал,  $cD1$  – деталізуючий коефіцієнт,  $cA1$  – апроксимуючий вейвлет-коефіцієнт,  $x$ -скалярний добуток досліджуваного сигналу та вейвлет функції ( $\langle f(t), \psi \rangle$ )

## Висновок до розділу 2

1. У даному розділі розглянуто три методи обробки сигналів (Фур'є, Котельникова, Лапласа) шляхом порівняння їх функціональних можливостей.

2. Розроблено спосіб та алгоритм визначення наявності спотворень ЯЕЕ ( незалежно від їх типу).

3. Інтеграція та автоматизація процесів генерації, передачі та споживання електричної енергії потребує створення такої моделі інформаційних потоків електроенергетичної системи, складовою частиною якої повинна бути визначення та подальша ідентифікація наявності спотворень якості електричної енергії.

4. Створення такої моделі повинно ґрунтуватися на сучасних математичних методах та технічних засобах. Це повинно створити умови для:

- підвищення ефективності точності та швидкодії процесу визначення та ідентифікації спотворень інформаційних сигналів;
- підвищення надійності та зменшення аварійності систем електропостачання за рахунок своєчасного визначення наявності спотворень якості електричної енергії.

### РОЗДІЛ 3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ РОЗРОБЛЕНОГО СПОСОБУ ВИЯВЛЕННЯ НАЯВНОСТІ СПОТВОРЕНЬ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

В основу дослідження покладено комп'ютерні розрахунки із застосуванням Matlab та Simulink), за якими відтворено найбільш характерні спотворення напруги в електричній мережі (короткочасні спотворення, відхилення від номінального значення, спотворення форми сигналу).

На рисунку 3.1 представлені результати застосування розробленого способу визначення наявності спотворень у випадку синусоїдального сигналу та наявність його переривання.

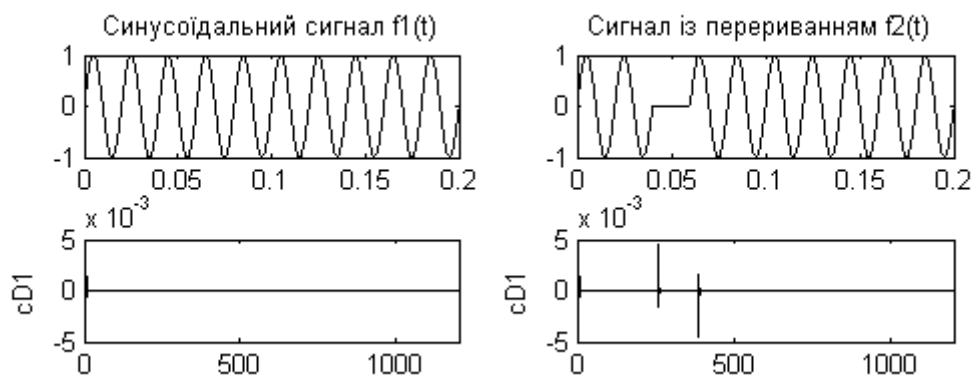


Рисунок 3.1 – Результати проведення аналізів сигналу без спотворення та у випадку наявності його переривання.

Спотворення типу переривання характеризується значенням коефіцієнта  $cD1$ . Також за його значенням  $cD1$  встановлюється початок та закінчення дії спотворення. Аналіз даних результатів показує що на відсутність наявності спотворення (чиста синусоїда) вказує значення  $cD1 = 0$ .

Аналогічні результати показали і дослідження сигналів із наявністю провалів та перевищення номінального деталізуючого рівня рисунок 3.2.

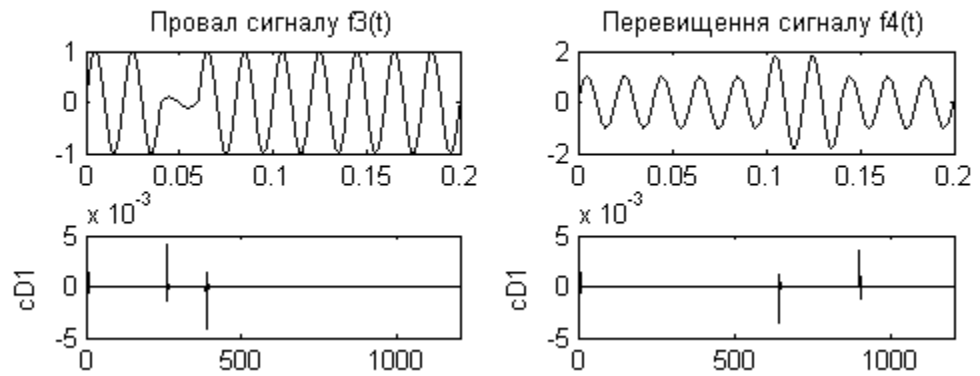


Рисунок 3.2 – Дослідження сигналів із наявністю провалів та перевищення номінального рівня.

Спотворення типу пониження та перевищення напруги також приводить до появи значення коефіцієнту  $cD1$  з позначенням початку та кінця спотворень.

На рисунку 3.3 показано присутність гармонічних компонент у сигналі чітко видно на першому рівні вейвлет-декомпозиції сигналу.

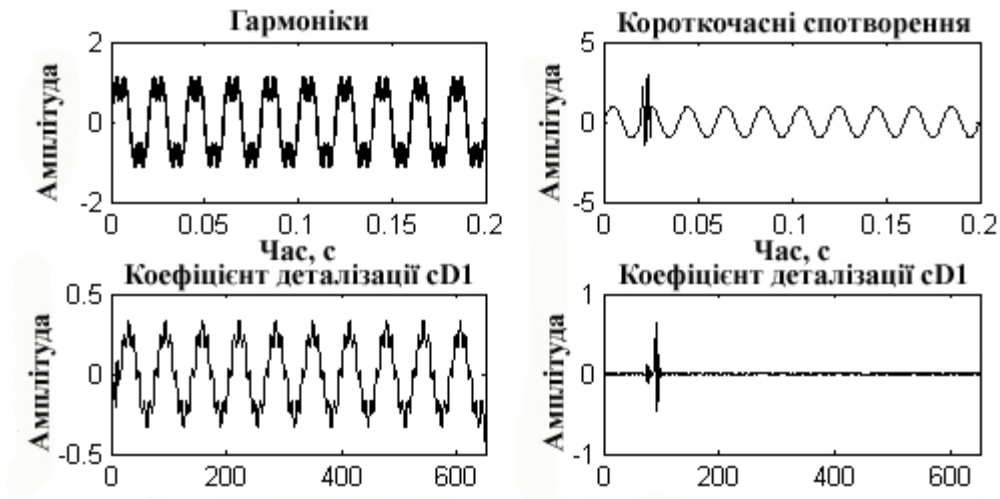


Рисунок 3.3 – Вейвлет-перетворення синусоїдального сигналу з наявністю спотворення типу високочастотні гармоніки, короткочасні спотворення;

На (рис 3.4) показано високочастотні спотворення, що повторюються (вихідна напруго шестипульсового конвертору) призводять до появи коефіцієнту  $cD1$  у вигляді послідовності коротких значень.

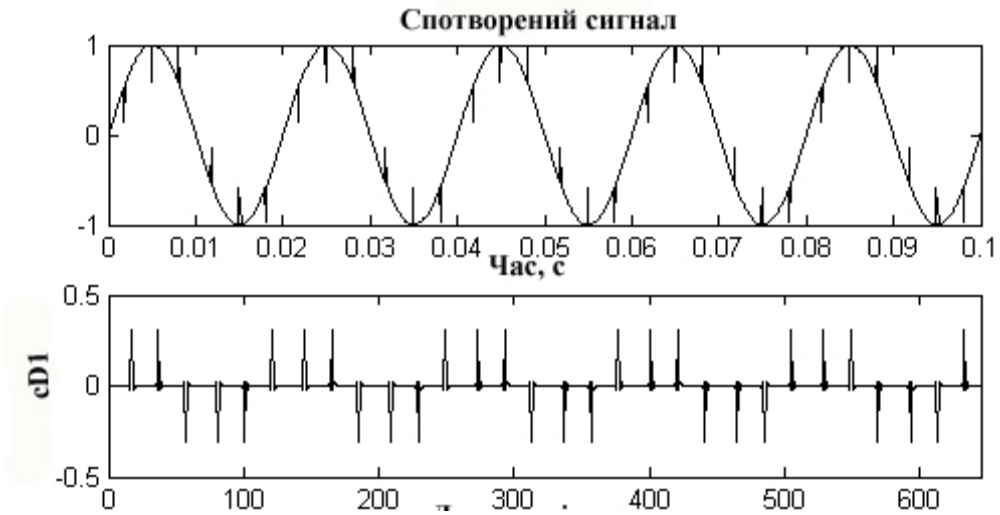


Рисунок 3.4 – Вейвлет-перетворення синусоїдального сигналу з наявністю повторюваних високочастотних спотворень

На рисунок 3.5 показано коливальні високочастотні спотворення описуються найбільшим значенням вейвлет-коефіцієнту.

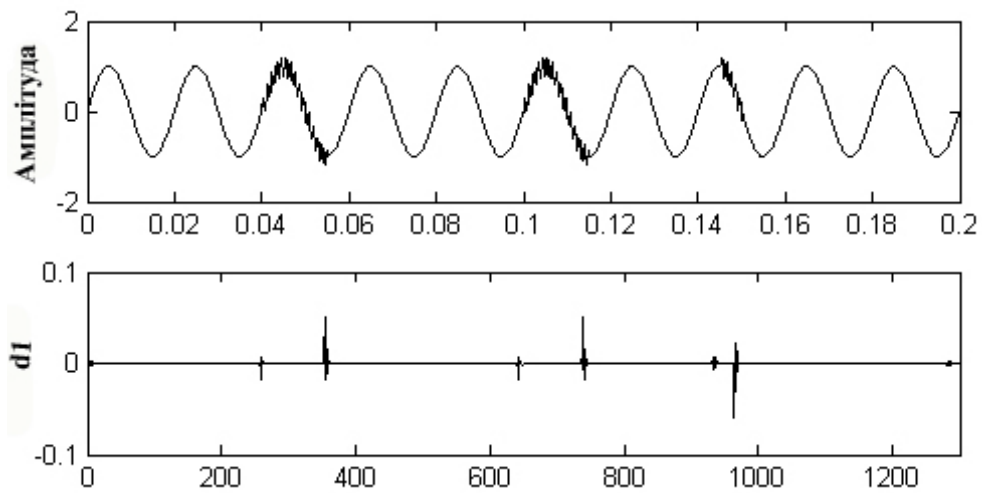


Рисунок 3.5 - Вейвлет-перетворення синусоїдального сигналу із наявністю коливальних високочастотних спотворень

На рисунок 3.6 показана наявність сьомої гармоніки у сигналі, починаючи з шостого періоду (вейвлет-коефіцієнт першого рівня).

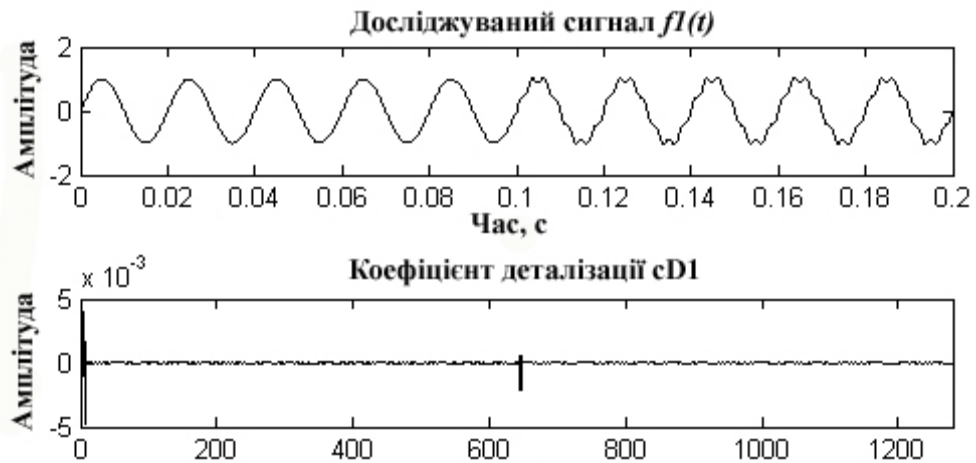


Рисунок 3.6 - Вейвлет-перетворення спотворених сигналів наявність сьомої гармоніки.

На рисунок 3.7 показано наявність у сигналі сьомої гармоніки з 1-го по 5-й період 30% та із 6-го по 10-й період – 60% від амплітуди основної гармоніки, та деталізуючий коефіцієнт першого рівня.

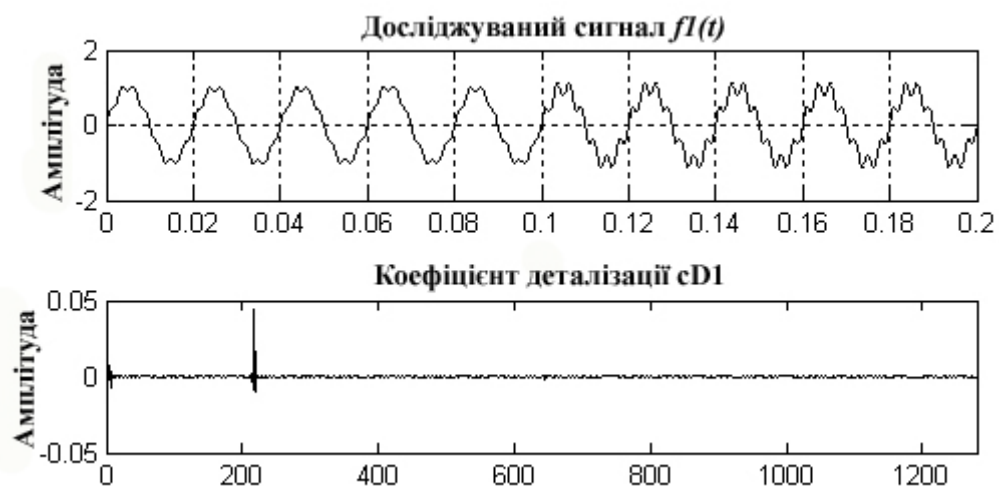


Рисунок 3.7 - Вейвлет-перетворення спотворених сигналів з наявністю гармонік із періодичною зміною амплітуди.

Аналізуючи отриманні результати вейвлет-перетворення синусоїдального сигналу та спотворень ЯЕЕ (значення отриманих деталізуючих коефіцієнтів першого рівня декомпозиції) вказує на

можливість лише виявлення спотворень та визначення початку і закінчення дії даного спотворення за значенням деталізуючого коефіцієнту першого рівня вейвлет-декомпозиції. Цей деталізуючий коефіцієнт першого рівня вейвлет перетворення знаходиться на нульових значеннях у більшості точок за виключенням тих, в котрих порушення відбувається. А амплітуда змінює своє значення за дуже короткий час та стрімко спускається до нуля. Також з його допомогою можна визначити тривалість спотворення (його початок і кінець).

Деталізуючий коефіцієнт  $cD1$  ( частотні діапазони 3,2кГц – 6,4кГц) нечутливий до сигналів, але вказує на великі коливання амплітуди, що пов'язані з короткочасними високочастотними спотвореннями форми сигналу. Якщо данні коефіцієнти мають гострі та короткі піки амплітуди, тоді можна побачити спотворення короткої тривалості, як провал напруги, перевищення чи короткі переривання сигналу. У протилежному випадку, якщо вони представлені тривалими серіями піків, тоді вони співвідносяться із повторюваними високочастотними спотвореннями.

Для, так званого, експрес-аналізу ЯЕЕ доречним є застосування дворівневого вейвлет-перетворення рисунок 3.8 це дозволяє швидко визначити присутність спотворення, його тривалість і віднести його до окремої групи.

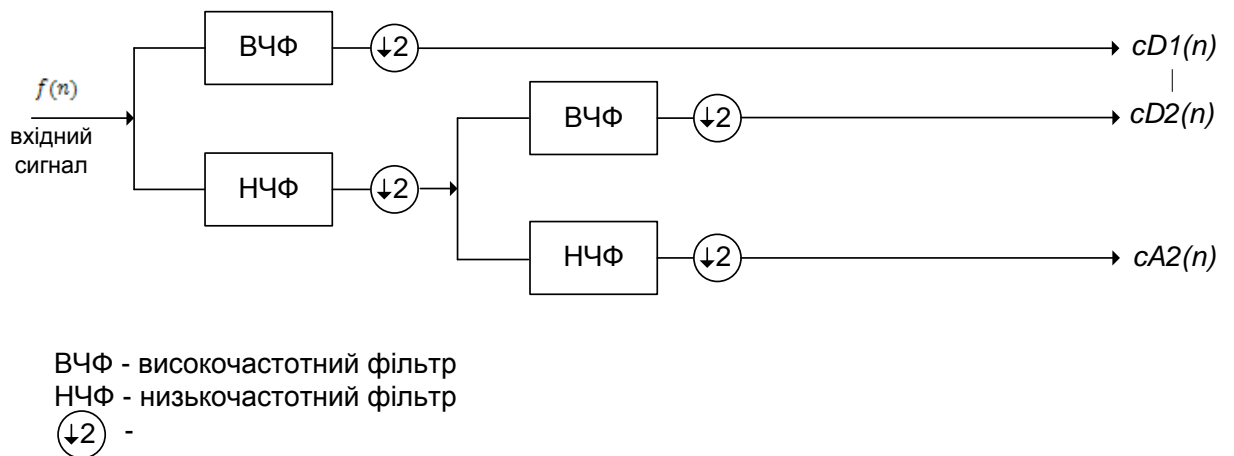


Рисунок 3.8 – Дворівневе вейвлет-перетворення

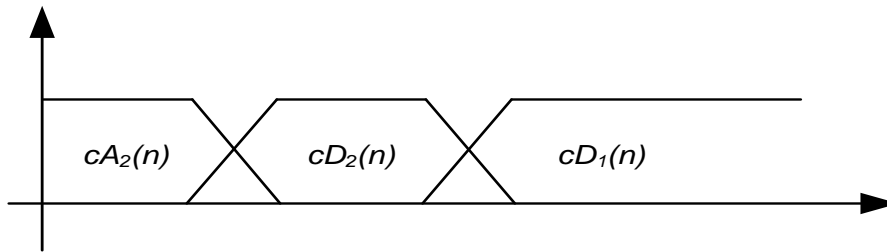


Рисунок 3.9 – Дворівневе дерево вейвлет-декомпозиції для проведення експрес-аналізу ідентифікації спотворень якості електричної енергії (а), частотні напівосі дворівневої вейвлет-декомпозиції (б)

$cA_2(n)$  – апроксимуючий вейвлет-коефіцієнт другого рівня,  $cD_1(n)$  та  $cD_2(n)$  – деталізуючі коефіцієнти першого та другого рівня вейвлет-декомпозиції відповідно.

### Висновки до розділу 3

1. Присутність у сигналі швидкісних спотворень або нестационарних низькочастотних спотворень знаходиться за величиною деталізуючого вейвлет-коефіцієнту першого рівня наступним чином. Значення  $cD_1$  зіставляється з пороговим значенням  $\mu$ . Перше значення порогової величини знаходиться на основі нормативних документів та визначається наступним чином:  $\delta$  де становить від 0,1 до 1,0 % від максимального значення апроксимуючого вейвлет-коефіцієнту останнього рівня вейвлет-декомпозиції ( $cD^j$ ). Зіставлення з значенням  $\mu$  проводиться за кожною точкою коефіцієнту  $cD_1(n)$ . В разі коли довільне значення  $cD_1$  більше ніж  $\mu$ - присутнє швидкоплинне спотворення, інакше в наявності нестационарне низькочастотне спотворення.

2. Це дозволило збільшити швидкодію виявлення спотворень у сигналі та покращити мобільність проведення моніторингу якості електричної енергії.



## 4 РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЕКТУ

### 4.1 Опис ідеї проекту

Завдяки сприянню уряду України та впровадженню «зеленого тарифу» розвиток відновлювальної енергетики в нашій державі отримав потужний поштовх. ВДЕ виробляють електроенергію, яка постачається в електромережу, яка потребує узгодження параметрів з енергосистемою та покращення якості. Крім того, наявність в мережі відновлювальних електростанцій впливають на її параметри і, відповідно, на все електротехнічне обладнання, системи релейного захисту та автоматики, надійність елементів енергосистеми. Залежно від потужності ВДЕ та місця підключення до мережі, а також ряду інших факторів доцільно на підставі цього застосування розробленої раніше моделі для контролю ЯЕЕ ВДЕ.

Генерування електроенергії альтернативними джерелами та під'єднання останніх до енергосистеми за допомогою перетворювачів струму впливає на якість електроенергії в мережі. Висока частота перемикання інверторів може створювати додаткові гармоніки в системах та зменшувати ефективність системи у зв'язку з порушенням стійкості джерела та збоями в роботі інверторів. Також через коливання величини виробленої електроенергії сонячними та вітровими електростанціями, яка постачається в енергосистему, що залежить від часу доби, пори року, інтенсивності сонячної енергії через хмарність для сонячних електростанцій та швидкість вітру для вітрових електростанцій, порушується стійкість роботи, а відповідно й надійність енергосистеми.

Проаналізувавши дослідження, які проводилися в Україні та в інших європейських країнах, можна зробити висновок, що вплив неякісної електроенергії на електричне обладнання є досить суттєвим, а дослідження проблеми впливу джерел нетрадиційної генерації на показники якості електроенергії дозволить отримати шляхи зменшення втрат електроенергії,

збільшити термін роботи електричного обладнання, зменшити швидкість старіння ізоляції ліній електропередач під дією вищих гармонік та обмежити нагрівання трансформаторів через несиметрію [58]. Велике значення для аналізу впливу СЕС на показники якості електроенергії в системі має місце підключення та потужність джерела. Згідно з [59] можна виділити три варіанти впливу «розподільної генерації» (РГ) на енергосистему, що може як збільшувати, так і зменшувати втрати потужності в електричних мережах, впливати на величину зміни напруги, коливання напруги, величину флікера, надійність роботи та термін експлуатації електричної мережі.

Зміна амплітуди та характеру потужності в місцевих електромережах завдяки підключенню джерел нетрадиційної енергетики зумовлює розгляд питань аналізу параметрів якості електроенергії, яку отримують від сонячних електростанцій, перегляду стандартів стійкості енергетичних систем та поглиблене вивчення даної проблематики.

#### **4.2 Пропозиція впровадження інформаційної моделі для контролю показників ЯЕЕ генеруючих ВДЕ**

Вимоги до вітрових та сонячних фотоелектричних електростанцій щодо приєднання до зовнішніх електричних мереж розроблено на основі Датських вимог до вітрових станцій. За умови приєднання відновлюваних джерел до електричних мереж, класифікують електростанції малої (до 2 МВт), середньої (від 2 до 25 МВт) та значної потужності (більше 25 МВт), які можуть впливати на режими роботи місцевих, магістральних мереж, а також помітно впливати на баланси потужності енергосистем [60].

Прикарпатські СЕС належать до електростанцій середньої потужності, що можуть впливати на режими роботи місцевих (локальних) електричних мереж середньої та високої напруги.

Показники якості електричної енергії в точці приєднання повинні відповідати міждержавному стандарту [61]. Зазвичай робоча напруга має

знаходиться в діапазоні 0,34-0,42 кВ (низька напруга), 9-11 кВ (середня напруга), а частота від 49,6 до (гранично допустиме зниження частоти) до 50,2 Гц (нормально допустиме підвищення частоти). Крім того, СЕС повинна залишатися підключеною до мережі у випадку аварійних умов експлуатації (стрибокподібні зміни фаз до 20° в точці приєднання, падіння напруги в точці приєднання до рівня 20% від номінальної напруги як мінімум протягом 0,5 с без відключення), а також витримувати всі групи нормативних збурень відповідно до ГКД 34.20.575-2002 “Стійкість енергосистеми. Керівні вказівки” та міждержавних стандартів [62], [63], [64], [65].

На СЕС «Радче» енергія, вироблена фотомодулями Chaori Solar CRM240S-156P-60 (240W), перетворюється інверторами Fronius, які підключені до низьковольтної частини електростанції пофазно. До кожного інвертора підключено групу сонячних фотомодулів певної потужності (в нашому випадку 240 Вт). Інвертори, в свою чергу, під'єднані до певної секції низької напруги трансформаторної підстанції (КТП – 1000 кВА). Кількість виробленої енергії залежить від величини освітленості в даний період.

Виробництво електроенергії на сонячній електростанції «Старі Богородчани-1» здійснюють за допомогою фотомодулів SUNOWE потужністю 225-230 Вт. Перетворення постійного струму в змінний на даній СЕС відбувається інверторами KACO POWADOR 39.0 TL3.XL з номінальною потужністю 39 кВт.

На рисунку 1 зображено принципову схему підключення інверторів Fronius до шин низької напруги трансформаторів ТМ-1000, на якій відбувається генерація електроенергії. Безпосередньо до системи СЕС під'єднують з боку високої напруги 10 кВ, але аналіз здійснювався на напрузі 0,4 кВ, оскільки розглядається можливість приєднання приватних будинків з фотомодулями через інвертори до мережі 0,4 кВ.

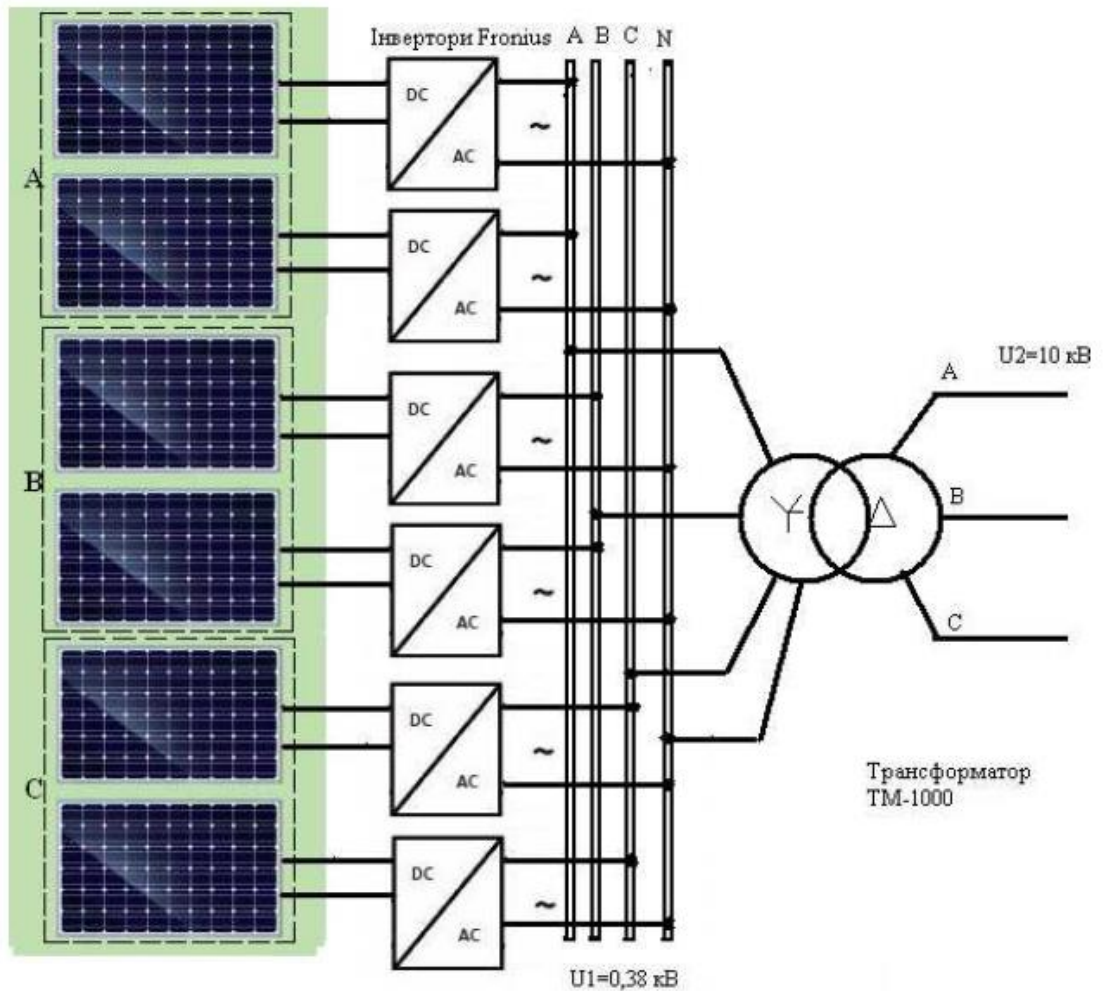


Рисунок 4.1 – Принципова схема підключення інверторів

На рисунках 4.2-4.5 зображено графіки зміни миттєвих значень напруг і струмів в трьох фазах, зміни частоти струму інвертора та аналіз гармонічного складу струмів фази A інвертора. Напряга має чітко виражену синусоїдну форму, натомість в формі струму фази A присутні гармонічні складові, що детально відображено на графіку гармонічного складу струму фази A. Кут зсуву між напругою та струмом дорівнює нулю, це означає, що за класичним поняттям реактивна потужність практично рівна нулю. Частота струму інвертора коливається в допустимих межах.

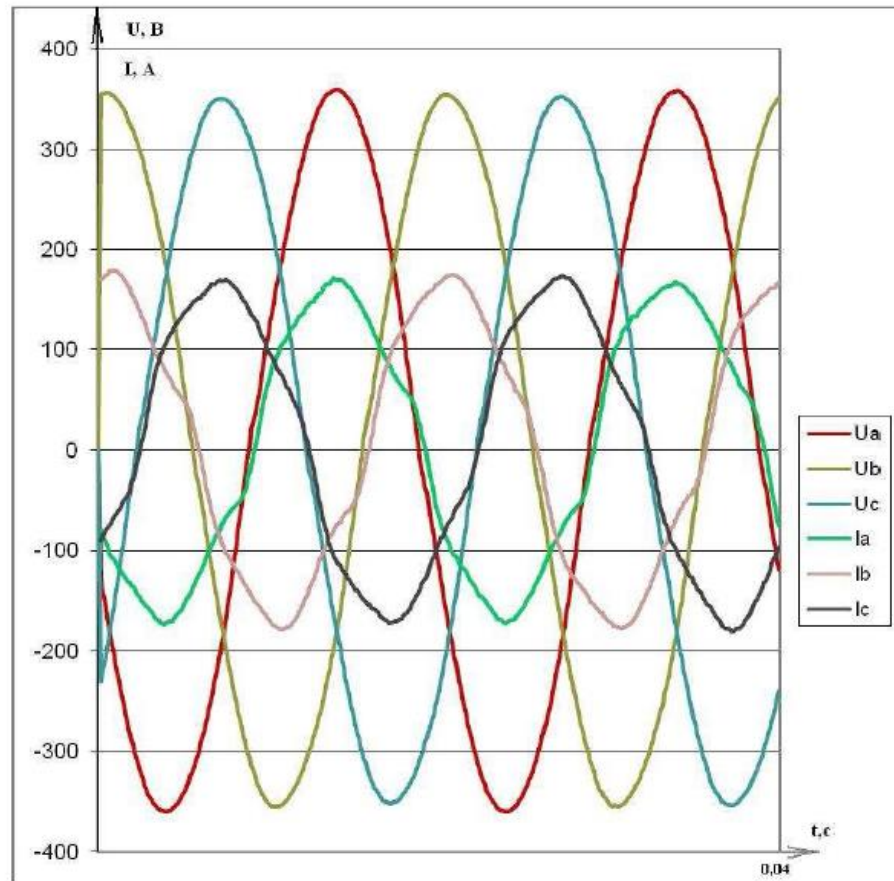


Рисунок 4.2 – Графік миттєвих значень струмів та напруг в трьох фазах на затискачах інвертора

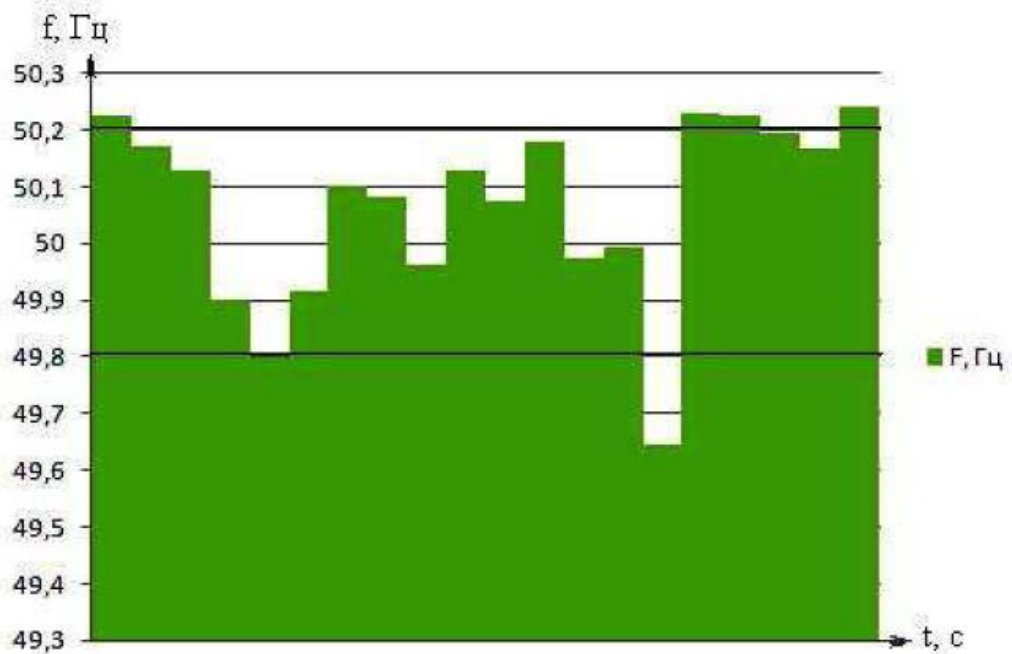


Рисунок 4.3 – Графік зміни частоти струму на затискачах інвертора

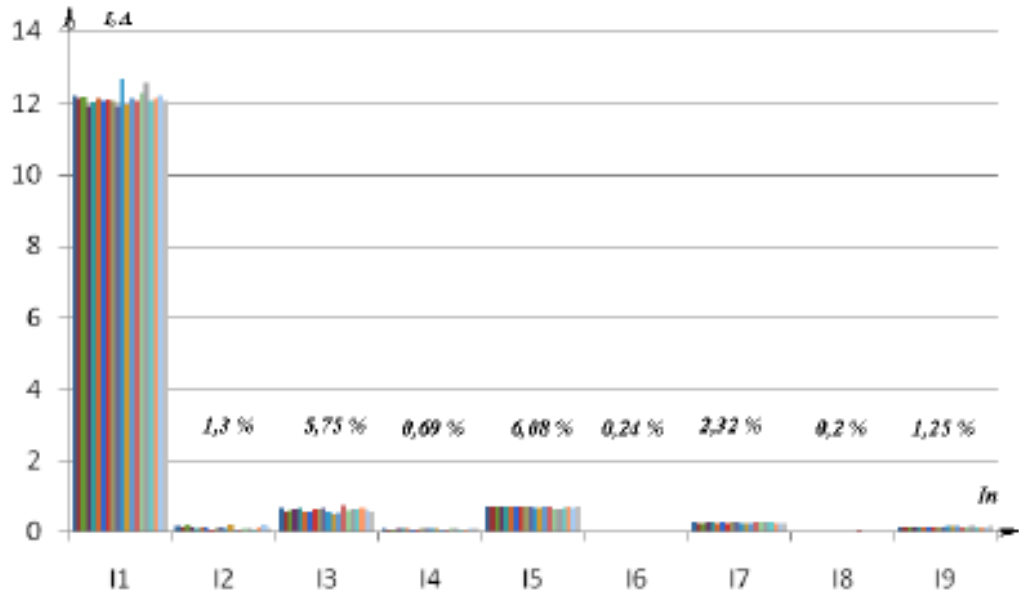


Рисунок 4.4 – Гармонічний спектр струму на затискачах інвертора

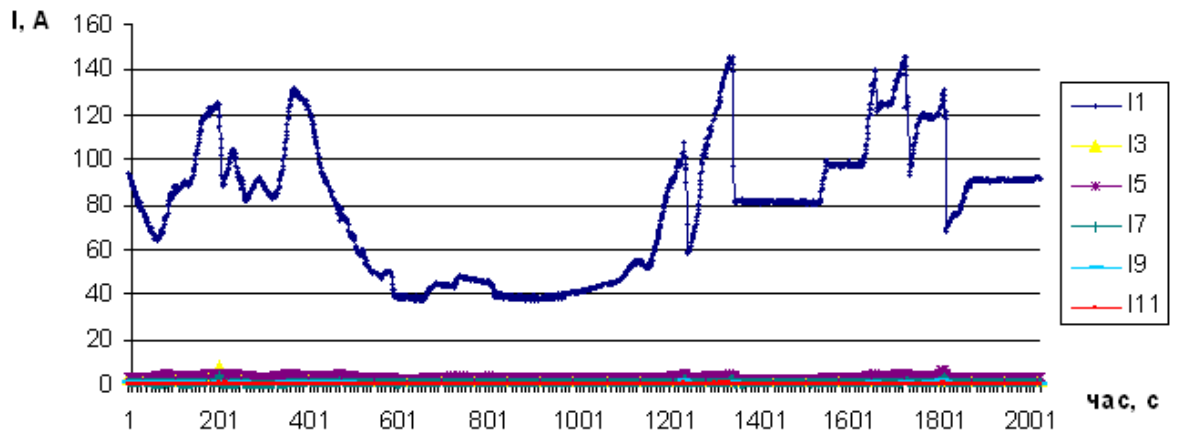


Рисунок 4.5 – Графік зміни струму фази А та розклад струму на гармонічні складові

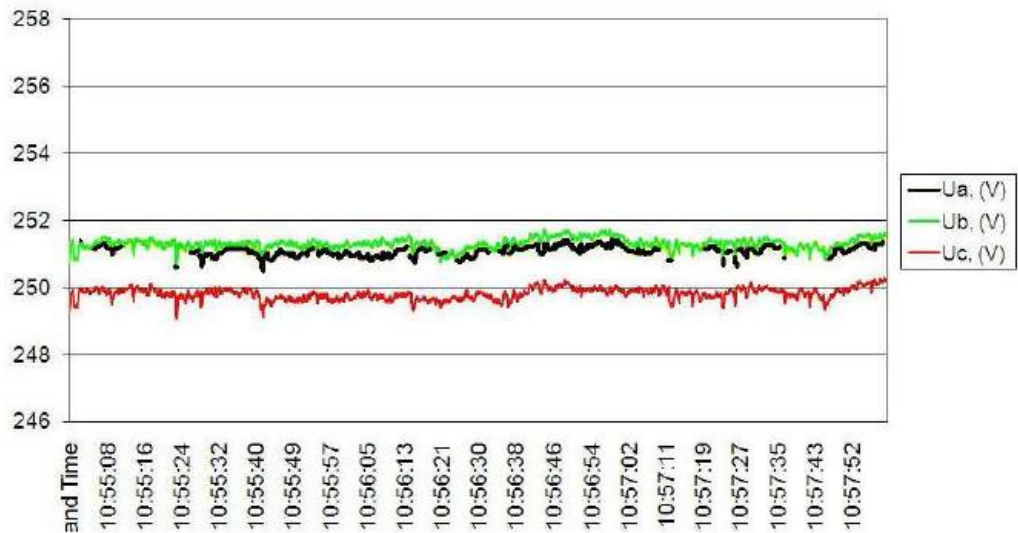


Рисунок 4.6 – Графік зміни напруги на затискачах ТП СЕС

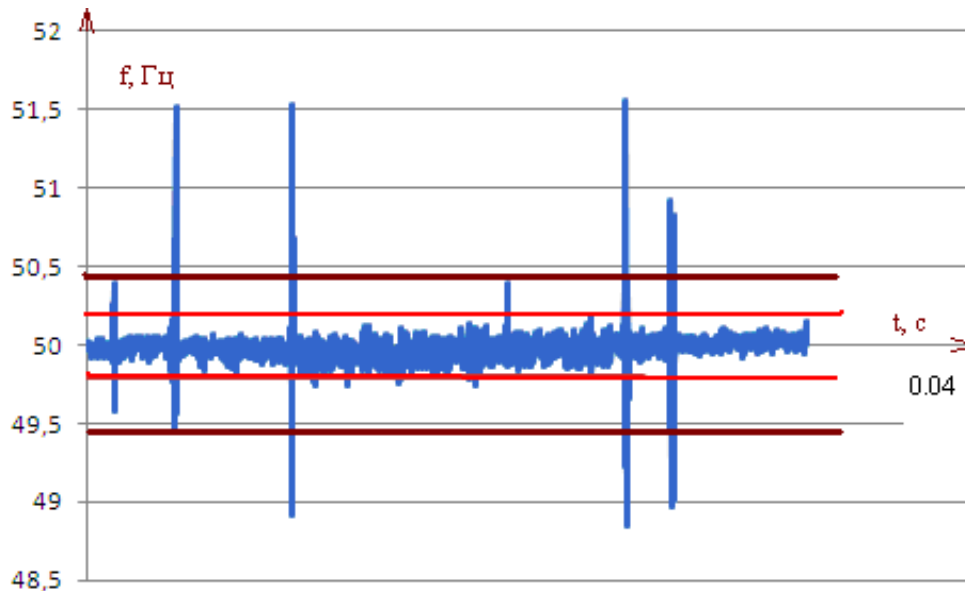


Рисунок 4.7 – Графік зміни частоти на затискачах ТП СЕС

Експериментально отримано достовірні результати вимірювання основних показників якості електроенергії та складових потужності. За допомогою експериментальних досліджень енергетичних параметрів та показників якості електроенергії сонячних електростанцій робимо висновок, що за нормального режиму на досліджуваній СЕС показники якості стосовно вищих гармонік виходять на фазі, а виходять за межі норм, а значення частоти та напруги на затискачах ТП СЕС в деяких моментах часу знаходяться в зоні ризику. Що дає привід запропонувати застосування розробленої моделі виявлення та ідентифікації спотворень якості електричної енергії. Задля нагляду та контролю за показниками ЯЕЕ на даній СЕС та типових СЕС та ВЕС задля підвищення надійності та збільшенню строку експлуатації складових ЕС.

### 4.3 Технологічний аудит проекту

Ідея проекту полягає в розповсюдженні застосування інформаційної моделі виявлення та ідентифікації спотворень якості електричної енергії викликаних відпуском в мережу електроенергії виробленої СЕС та ВЕС.

Таблиця 4.1 - Зміст ідеї проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Впровадження інформаційної моделі виявлення та ідентифікації спотворень якості електричної ВДЕ.	В науковій, дослідницькій, пізнавальній діяльності для: підвищення показників ЯЕЕ	Отримання інформації, що дасть можливість порівняльного аналізу на мобільної швидкодії в усуненні проблем ЯЕЕ.
	- оперування даними щодо показників якості генерації електричної енергії технологіями ВДЕ	Дозволяє швидко зорієнтуватися в якісних показниках ЕЕ відпущеної ВЕД.
	- визначення проблем та на основі цього проведення заходів щодо підвищення ЯЕЕ	Дозволяє визначити різновид та значення спотворення виявленого моделлю.
	- дослідження факторів, які впливають на показники ЯЕЕ відпущеної ВДЕ.	Можливість своєчасного виявлення погіршення якості та проведення заходів для покращення даних параметрів

В таблиці 4.2 наведено порівняльний аналіз мого продукту із продуктом-аналогом, а також проведено аналіз сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту. [42]



Таблиця 4.2 - Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

Техніко-економічні характеристики ідеї	Потенційні концепції конкурентів		W (слабка сторона)	N (нейтральна сторона)	S (сильна сторона)
	Мій проект	Конкурент			
Собівартість реалізації	Низька собівартість.	Висока собівартість обладнання			+
Пошук потенційних клієнтів	покупця	Залежить від виробника		+	
Отримання інформації про об'єкт	Від держави	Від покупця обладнання	+		
Формат нагляду стосовно місцеположення	Віддалений нагляд	На місці генерації			+
Достовірність інформації	Повна достовірність з врахуванням точності даних	Повна достовірність без врахування точності даних			+
Можливості	Обробка, виявлення спотворень та їх ідентифікація.	Збір, класифікація, збереження даних нагляду.			+

Аналіз показав, що в порівнянні з найближчим продуктом-конкурентом, даний продукт має значні переваги, зокрема не лише нагляд за показниками якості а і реакція на їх відхилення, що є необхідним для підвищення надійності системи.

Таблиця 4.3 – Переваги та недоліки проекту

Переваги	Недоліки
Простота у користуванні	Відсутність інформації, щодо потенціалу впровадження технологій
Достовірність інформації	
Повнота даних	
Широка сфера застосування	Відсутність автоматичного оновлення даних
Можливості доповнення (удосконалення)	

#### 4.4 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

В таблиці 4.4 проведено аналіз попиту потенційного ринку стартап-проекту.

Таблиця 4.4 – Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

Показники стану ринку	Характеристика
Кількість головних гравців, од	1
Динаміка ринку	Зростає
Наявність обмежень на ринку	Відсутні
Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Не потребує стандартизації та сертифікації

Аналізуючи ринок, до якого входить даний проект, можна сказати, що кількість конкуруючих проектів дуже мала на ринку, проте попит на дану продукцію стрімко зростає. Зростання попиту зумовлено збільшенням популярності технологій з ВДЕ, а в зв'язку з цим і підвищення контролю за показниками ЯЕЕ відпущеної ними.

Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту наведена в таблиці 4.5.

Таблиця 4.5 – Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
Інформаційна модель виявлення ідентифікації спотворень якості електричної енергії відпущеної ВДЕ	Наукова, дослідницька, діяльність.	При використанні в науковій чи дослідницькій діяльності потребується достовірність та повнота інформації	Повнота інформації  Достовірність даних
		Контроль та нагляд за функціонуванням.	При застосуванні в контролі нагляді, першочергово необхідна автоматизація, швидкодія та точність систематизація
			Швидкодія та точність збору інформації  Автоматизація збору та систематизація інформації.

Проведений аналіз ринкового середовища ( факторів, що сприяють ринковому впровадженню проекту, та факторів, що йому перешкоджають) показано в таблицях 4.6-4.7

Таблиця 4.6 - Фактори загроз

Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція
Конкуренція	Зобов'язання держави впровадження систем нагляду за ЯЕЕ відмінного від запропонованого	Зниження попиту на даний проект
Складне економічне становище в країні	Зниження зацікавленості до технологій з ВДЕ із-за їх дороговизни	

Таблиця 5.7 - Фактори можливостей

Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція
Затвердження	Затвердження даної моделі та часте її впровадження	Зростання зацікавленості до даного продукту
Зростання інвестицій в технології з ВДЕ в Україні	Потреба в нагляді та аналізі показників ЯЕЕ відпущеної ВДЕ	

З аналізу факторів можливостей та загроз робимо висновок, що реально погрожуючими факторами може стати зміна законодавчої бази. Щодо можливостей – то функціональність точність та швидкодія даної моделі в комплексі з розвитком ВДЕ в Україні може дати поштовх до великого попиту на дану продукцію. В таблиці 4.8 представлено SWOT- аналіз впровадження проекту.

Таблиця 4.8 - SWOT- аналіз впровадження проекту.

<b>S (сильні сторони)</b>	<b>W (слабкі сторони)</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- проект не має рівносильних аналогів;</li> <li>- можливість дистанційного віддаленого нагляду;</li> <li>- якість продукту (швидкодія та підвищена точність даних);</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- реклама продукту;</li> <li>- взаємовідносини з органами влади;</li> </ul>
<b>О (можливості)</b>	<b>Т (загрози)</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Зростання попиту на технології з ВДЕ;</li> <li>- Підтримка влади;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- зниження доходів потенційних споживачів</li> <li>- зміна законодавчої бази</li> <li>- нові технології</li> </ul>

#### 4.5 Розроблення ринкової стратегії проекту

Розроблення ринкової стратегії першим кроком передбачає визначення стратегії охоплення ринку: опис цільових груп потенційних споживачів представлено в таблиці 4.9

Таблиця 4.9 – Вибір цільових груп потенційних споживачів

Цільові групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів прийняти продукт	Орієнтований попит в межах цільової групи	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу в сегмент
Науковці	Повна готовність	Високий	Слабка	Просто
Інвестори	Повна готовність	Високий	Слабка	Просто

Продовження таблиці 4.9

Журналісти	Часткова готовність	Високий	Помірна	Складно
Держенергопостачання	Повна готовність	Високий	Слабка	Просто
Які цільові групи обрано: Науковці, Інвестори, Держенергопостачання				

Виходячи з даного аналізу, було прийнято рішення обрання стратегії розвитку: заняття конкурентної ніші. При прийнятті стратегії зайняття конкурентної ніші (інші назви – стратегія фахівця або нішера) компанія в якості цільового ринку вибирає один або декілька ринкових сегментів. Ця конкурентна стратегія являється похідною від такої базової стратегії компанії, як концентрація. Ніша, для того, щоб вона була привабливою для компанії, повинна задовольняти таким умовам:

- бути досить прибутковою, щоб робити доцільним процес виробництва і обслуговування;
- залишатися стабільною упродовж тривалого проміжку часу;
- має бути добре захищеною, мати високі вхідні бар'єри;
- бути непривабливою для конкурентів;
- відповідати цілям і ресурсам компанії, її специфічним можливостям.

Головне завдання для компаній, що вибирають стратегію нішера або фахівця, – це постійна турбота про підтримку і розвиток своєї конкурентної переваги, формування лояльності і прихильності споживачів, підтримка вхідних бар'єрів. [42]

#### **4.6 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту**

Концепція маркетингової комунікації показана в таблиці 4.10

Таблиця 4.10 – Концепція маркетингової комунікації

Цільові групи	Канали комунікації, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
Науковці	Системи збору та передачі даних	Надійність, швидкодія, точність, достовірність, повнота інформації	Зацікавити клієнтів в покупці права на користування продуктом	Зручність в експлуатації, надійність, швидкодія, точність, достовірність
Інвестори	Системи збору та передачі даних	Надійність, швидкодія, точність, достовірність, повнота інформації		
Держенергопостачання	Системи збору та передачі даних	Надійність, достовірність, швидкодія, точність, повнота інформації		

#### Висновки до розділу 4

1. Даний продукт практично не має рівносильних аналогів на ринку, проте попит на дану модель наявний серед науковців, дослідників,

держенергопостачання, інвесторів. Враховуючи малі затрати на реалізацію даного проекту, даний проект є рентабельним.

2. Бар'єром до впровадження даного проекту є складність в рекламуванні даного проекту. Конкуруючий проект має перевагу лише в отриманні інформації про об'єкт дослідження, проте лише контролює показники ЯЕЕ, а не виявляє відхилення, не індефікує та виявляє спотворення, та працює лише в місці генерації. Подальший розвиток даного проекту дозволить залишатися конкурентноздатним проектом на ринку даної продукції.



## ВИСНОВКИ

1. Аналіз сучасного стану електроенергетичної галузі України свідчить, що її інтеграція з електроенергетичним сектором країн ЄС можлива тільки за умови дотримання жорстких вимог до параметрів якості електричної енергії, які повинні знаходитись у межах допустимих рівнів, встановлених у нормативних документах. При цьому слід зауважити, що якість електричної енергії в значній мірі впливає на надійність функціонування електроенергетики України, і є постійно діючим фактором, який може призводити до необґрунтованих економічних втрат як безпосередньо енергопостачальних компаній, так і багатьох споживачів електричної енергії. Задля досягнення цієї непрості задачі, насамперед, необхідний чіткий контроль за показниками якості електричної енергії.

2. Основною проблемою контролю за показниками ЯЕЕ в Україні є відсутність засобів автоматичного збору та обробки інформації що в свою чергу гостро ставить перед нами питання про підвищення швидкодії збору та обробки інформації. Адже на даний момент перепоною для швидкого визначення та ідентифікації спотворень інформаційних сигналів є досить недосконала методика збору та обробки (систематизації) даних.

3. Нечітка інформація стосовно конкретної величини спотворень сигналу в свою чергу також несе за собою величезні витрати. Що стає передумовою пошуку рішень що до підвищення точності та швидкодії вимірювань показників ЯЕЕ.

5. Розглянуто три методи обробки сигналів (Фур'є, Котельникова, Лапласа) шляхом порівняння їх функціональних можливостей.

6. Розроблено спосіб та алгоритм визначення наявності спотворень ЯЕЕ ( незалежно від їх типу).

7. Інтеграція та автоматизація процесів генерації, передачі та споживання електричної енергії потребує створення такої моделі інформаційних потоків електроенергетичної системи, складовою частиною

якої повинна бути визначення та подальша ідентифікація наявності спотворень якості електричної енергії.

8. Створення моделі ґрунтується на сучасних математичних методах та технічних засобах. Це повинно створити умови для:

- підвищення ефективності точності та швидкодії процесу визначення та ідентифікації спотворень інформаційних сигналів;

9. Підвищення надійності та зменшення аварійності систем електропостачання за рахунок своєчасного визначення наявності спотворень якості електричної енергії. Присутність у сигналі швидкісних спотворень або нестационарних низькочастотних спотворень знаходиться за величиною деталізуючого вейвлет-коефіцієнту першого рівня наступним чином. Значення  $cD_1$  зіставляється з пороговим значенням  $\mu$ . Перше значення порогової величини знаходиться на основі нормативних документів та визначається наступним чином:  $\delta$  де становить від 0,1 до 1,0 % від максимального значення апроксимуючого вейвлет-коефіцієнту останнього рівня вейвлет-декомпозиції ( $cD^j$ ). Зіставлення з значенням  $\mu$  проводиться за кожною точкою коефіцієнту  $cD_1(n)$ . В разі коли довільне значення  $cD_1$  більше ніж  $\mu$ - присутнє швидкоплинне спотворення, інакше в наявності нестационарне низькочастотне спотворення.

10. Це дозволило збільшити швидкодію виявлення спотворень у сигналі та покращити мобільність проведення моніторингу якості електричної енергії.

11. Продукт отриманій в стартап проекті практично не має рівносильних аналогів на ринку, проте попит на дану модель наявний серед науковців, дослідників, держенергопостачання, інвесторів. Враховуючи малі затрати на реалізацію даного проекту, даний проект є рентабельним.

12. Бар'єром до впровадження даного проекту є складність в рекламуванні даного проекту. Конкуруючий проект має перевагу лише в отриманні інформації про об'єкт дослідження, проте лише контролює показники ЯЕЕ, а не виявляє відхилення, не індефікує та виявляє

спотворення, та працює лише в місці генерації. Подальший розвиток даного проекту дозволить залишатися конкурентноздатним проектом на ринку даної продукції.

**СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ**

1. Akagi, H. Active harmonic filters / Proceedings of the IEEE, vol. 93, no. 12, December 2005, pp. 2128-2141.
2. Akagi, H. «New Trends Active Filters».-VI European Conference on Power Electronics and Applications, Sevilla, ESpain. vol.0, Sept/1995, p. 17-26.
3. Barrero Fermin, Martinez Salvador, Yeves Fernando, Martinez Pedro M. Active power filters for line conditioning: a critical evaluation // IEEE Trans. Power. Deliv. -2000. — № 1.-p. 319-325.
4. Bernard S., Fiorina J.N., Gros B., Trochain G. THM Filtering and the Management of Harmonic Upstream of UPS // MGE UPS Systems, MGE 0246, 2000.-17 p.
5. Bettega E., Fiorina J.N. Active harmonic conditioners and unity power factor rectifiers // Cahiers Techniques. 1999. ECT 183. - 36 p. - Режим доступа:  
[www.designers.schneiderelectric.ru/attachments/ed/ct/activeharmonicconditioners.pdf](http://www.designers.schneiderelectric.ru/attachments/ed/ct/activeharmonicconditioners.pdf).
6. Gruz, T.M. An Optimized Three-Phase Power Conditioner Featuring Deep Sag Protection and Harmonic Isolation // Liebert Corporation, 1996. 10 p.
7. Huang S-J., Wu J.-C. Design and operation of cascaded active power filters for the reduction of harmonic distortions in power system // IEE Proc. Generat., Transmiss. and Distrib. 1999. - №2. - С. 193-199.
8. Jain Shailendra Kumar, Agarwal Pramod, Gupta H. O. A control algorithm for compensation of customer-generated harmonics and reactive power // IEEE Trans. Power. Deliv. 2004. -№ 1. - С. 357-366.
9. Ortuzar M., Carmi R., Dixon J., Moran L. Voltage source active power filter, based on multi-stage converter and ultracapacitor DC-link / IEEE Power
10. Electronics Specialists Conference, 15-19 June 2008, pp. 2300-2305. Режим доступа: [http://www2.ing.puc.cl/power/paperspdf/dixon/61\\_a.pdf](http://www2.ing.puc.cl/power/paperspdf/dixon/61_a.pdf).

11. Parkatti P., Salo M., Tuusa H. Experimental results for a current source shunt active power filter with series capacitor / IEEE Power Electronics Specialists Conference, 15-19 June 2008, pp. 3814-3818.
12. Peng, F.Z. Application issues of active power filters / IEEE Industry Applications Magazine, September/October 1998, pp. 21-30.
13. Rivas D., Moran L., Espinosa J. Improving passive filter compensation performance with active techniques / IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 50, no. 1, February 2003, pp. 161-170.
14. Агунов, А.В. Статический компенсатор неактивных составляющих мощности с полной компенсацией гармонических составляющих тока нагрузки / Электротехника. 2003. - № 2. - С.47-50.
15. Агунов, А.В. Улучшение электромагнитной совместимости в автономных электроэнергетических системах ограниченной мощности методом активной фильтрации напряжения // Электротехника. 2003. — № 6. - С. 52-56.
16. Бесекерский, В.А. Теория систем автоматического управления / В.А. Бесекерский, Е.П. Попов. Изд. 4-е перераб. и доп. СПб.: Изд-во «Профессия», 2004. - 752 с.
17. Бессонов, Л.А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле: учебник. 9-е изд., перераб. и доп. — М.: Гардарики, 2001. - 317 с.
18. Вагин, Г.Я. Построение систем электроснабжения промышленных предприятий с учетом электромагнитной совместимости электроприемников // Промышленная энергетика. 2005. - № 2. — С. 3843.
19. Висящев А.Н., Тигунцев С.Г., Луцкий И.И. Влияние потребителей на искажение напряжения // Электрические станции. 2002. — № 7. - С. 2631.
20. Воротницкий, В.Э. Потери электроэнергии в электрических сетях: анализ и опыт снижения / В.Э. Воротницкий. М.: НТФ «Энергопрогресс», 2006. -104 с.

21. Востриков, А.С. Теория автоматического регулирования: учеб. пособие для вузов / А.С. Востриков, Г.А. Французова. М.: Высш. шк., 2004. - 365 с.
22. Галанов В.П., Галанов В.В. О влиянии нелинейных и несимметричных нагрузок на качество электрической энергии // Промышленная энергетика. -2001. -№3.-С. 46-49.
23. Горюнов В.Н., Лютаревич А.Г., Четверик И.Н. Активный фильтр как техническое средство обеспечения качества электроэнергии // Омский научный вестник. 2008. - №1 (64). - С. 78-80.
24. ГОСТ 13109-97 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. — М.: Издательство стандартов, 1998 — 32 с.
25. Григорьев, О. Высшие гармоники в сетях 0,4 кВ // Новости электротехники. 2002. - №6. - Режим доступа: <http://www.news.elteh.ru/arh/2003/14.php>
26. Григорьев, О. Высшие гармоники в сетях электроснабжения 0,4 кВ // Новости электротехники. — 2003. № 1. - С. 54-56.
27. Гуртовцев, А. Погрешности электронных счетчиков. Исследование и оценка // Новости электротехники. 2007. - №1. - С. 68-71.
28. Гуртовцев, А. Погрешности электронных счетчиков. Исследование и оценка // Новости электротехники. 2007. - №2. - С. 156-160.
29. Дмитриев, С. Международные стандарты электромагнитной совместимости электронной аппаратуры // Электронные компоненты. — 2000. № 1. - режим доступа: <http://www.elcp.ru/index.php?state=200001&iart=1>.
30. Жежеленко, И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий / И.В. Жежеленко. М.: Энергоатомиздат, 2000. - 186 с.

31. Железко, Ю.С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии: Руководство для практических расчетов / Ю.С. Железко. — М.: ЭНАС, 2009. — 456 с.
32. ГОСТ 13109–97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения [Текст] / Минск: ИПК. Изд-во стандартов, 1998. — 30 с.
33. Dash, P. Frequency Estimation of Distorted Power System Signals Using Extended Complex Kalman Filter [Text] / P. Dash, A. Pradham, G. Pauda // IEEE Trans. on Power Delivery. — 1999. — Vol. 14, № 3. — P. 230–238.
34. Залмазон, Л. А. Преобразования Фурье, Уолша, Хаара и их применение в управлении, связи и других областях [Текст] / Л. А. Залмазон. — М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит. 1989. — 496 с.
35. Волошко, А. В. Устранение влияния неустойчивости частоты сети на точность определения качества электрической энергии [Текст] / А. В. Волошко, О. В. Коцарь // Техническая электродинамика. — 1994. — № 4. — С. 73–77.
36. Марпл, С. Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения [Текст] / С. Л. Марпл. — М.: Мир, 1990. — 584 с.
37. Блейхут, Р. Быстрые алгоритмы цифровой обработки сигналов: Пер. с англ. [Текст] / Р. Блейхут. — М.: Мир, 1989. — 448 с.
38. Andria, G. A Windows and Interpolation Algorithms to Improve Electrical Measurement Accuracy [Text] / G. Andria, H. Savino, A. Trotta // Transaction on Instrumentation and Measurement. — 1989. — Vol. 38, № 4. — P. 856–863.
39. Волошко, А. В. Интерполяция и повышение точности проведения гармонического и спектрального анализа [Текст] / А. В. Волошко // Техническая электродинамика. — 1991. — № 3. — С. 8–13.

40. Abdel-Galil, T. Power quality disturbance classification using the inductive inference approach [Text] / T. Abdel-Galil, M. Kamel, A. M. Youssed // IEEE Trans. on Power Delivery. – 2004. – Vol. 19, № 4. – P. 1812–1818.
41. He, H. A self-organizing learning array system for power Quality classification based on wavelet transform [Text] / H. He, J. A. Starzyk // IEEE Trans. on Power Delivery. – 2006. – Vol. 21, № 1. – P. 286–295.
42. Ribeiro, R. Wavelet Transform: An Advanced Tool for Analysing non Stationary Harmonic Distortion in Power Systems [Text] : Proc. Of IEEE intern. conf. / R. Ribeiro // Harmonic in Power Systems, 1994. – P. 452–457.
43. Karthikeyan, M. Wavelet Support Vector Machine Approach for classification [Text] / M. Karthikeyan, V. Malathi // Int. Journal of Recent Trends in Engineering. – 2009. – Vol. 1, № 3. –P. 211–220.
44. Hyvarinen, A. Fast and robust fixed-point algorithms for independent component analysis [Text] / A. Hyvarinen // IEEE Trans. Neural Networks. – 1999. – Vol. 10. –P. 626–634.
45. Ferreira, D. D. ICA-based for Power Quality Disturbance Analysis [Text] / D. D. Ferreira, S. M. Seixas, A. S. Cerqueira // Intelligent System Application to Power Systems. ISAP'09. 15-th Int. Conference, 2009. – P. 1–6.
46. Yang, H. T. A de-noising sheme for enhancing wavelet-based power quality monitoring system [Text] / H. T. Yang, L. Chung, C. C. Liao // IEEE on Power Delivery. – 2001. – Vol. 16, Issue 3. – P. 353–360.
47. Dwivedi, V. D. De-noising Techniques with Change-Point Approach for Wavelet-based Power Quality Monitoring [Text] / V. D. Dwivedi, S. N. Singh // IEEE Trans. On Power Delivery. – 2009. – Vol. 24, № 3. – P. 1719–1727.
48. Большев, П. Н. Таблицы математической статистики [Текст] / П. Н. Большев, Н. В. Смирнов. – М.: Наука, 1983. – 416 с.
49. Dash, P. K. Classification of Power Disturbances using a Fuzzy expert system and a Fourier linear combiner [Text] / P. K. Dash, K. S. Mishra, M. M. A. Salama // IEEE Trans. on Power Delivery. – 2000. – Vol. 15, № 2. – P. 472–477.



50. Mallat, S. A. A Theory for multiresolution signal decomposition: The wavelet representation [Text] / S. A. Mallat // IEEE Trans. Pattern Ana. Machine Intell. – 1989. – Vol. 11. – P. 674–693.

51. ГОСТ Р 51317.4.30-2008 (МЭК 61000-4-30:2008) Электромагнитная совместимость (EMC) [Текст] / Часть 4-30. Методы испытаний та вимірювань. Методи вимірювання якості електричної енергії, 2008. – 59 с.

52. Office of Electricity Delivery and Energy reliability by the National Energy Technology Laboratory. Provides power quality for the digital economy. [Electronic resource] / Available at: <http://www.netldoe.gov/research/energy-efficiency/energy-delivery/smart-grid>.

53. Стогній Б. С. Интеллектуальні електричні мережі електроенергетичних систем та їхнє технологічне забезпечення [Текст] / Б. С. Стогній, О. В. Кириленко, С. П. Денисюк // Технічна електродинаміка. – 2010. – № 6. – С. 44–50.

54. Шон Ф. Ч. Исследования и оценка эффективности повышения качества электроэнергии при интеграции распределенных генераций с системами электроснабжения на нескольких новых показателях [Текст] // Вестник ИрГТУ. – 2013. – № 7 (78). – С. 149–153.

55. Праховник А. В. Перспективы и пути развития распределенной генерации в Украине [Текст] / А. В. Праховник В. А Попов, Е. С. Ярмолюк и др. // Энергетика: економіка, технології, екологія. – 2012. – № 2. – С. 7–14.

56. Гольденберг Л.М., Матюшкин Б.Д., Поляк М.Н. Цифровая обработка сигналов Радио и связь, 1985

57. Куско, А. Качество электрической энергии [Текст] / А. Куско, М. Томпсон. – М.: Додэка-XXI, 2008. – 336 с.

58. Бекиров Э. А. Анализ качества электрической энергии, генерируемой солнечной электростанцией в энергосистему. [Текст] / Бекиров Э. А., Романовский И. В. // Строительство и техногенная безопасность. – 2011. – Вып. 40. С. 106-115.

59. Кириленко О. В. Технічні аспекти впровадження джерел розподільної генерації в електричних мережах. [Текст] / Кириленко О. В., Павловський В. В., Лук'яненко Л. М. // Технічна електродинаміка. – 2011. – №1. – С. 46–51.

60. Коновал В. С. Дослідження впливу вітрової електростанції на режимі роботи електричної мережі / В. С. Коновал, А. Ю. Кучинський, О. І. Горак. – С. 64-69.

61. Гладь І. В. Проблеми та принципи проектування універсального апаратно-програмного комплексу для енергетичних обстежень електромереж [Текст] / Гладь І. В., Галушак І. Д., Поточний А.І., Маскевич У. М., Бацала Я. В., Кіянюк О. І. // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2008. – № 3(28). – С. 83-87.

62. Вимоги до вітрових та сонячних фотоелектричних електростанцій потужністю більше 150 кВт щодо приєднання до зовнішніх електричних мереж // Жовтень 2011 року. – С. 1- 42.

63. ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения».

64. IEC TR 61000-3-6: EMC limits. Limitation of emissions of harmonic currents for equipment connected to medium and high voltage power supply systems. (February 2008).

65. IEC TR 61000-3-7: EMC-limits. Limitation of voltage fluctuations and *flicker* for equipment connected to medium and high voltage power supply systems. (February 2008).