

Заклад вищої освіти «Подільський державний університет»
Факультет енергетики та інформаційних технологій
Кафедра енергозберігаючих технологій та енергетичного менеджменту

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему:

**Методи визначення асиметрії напруги в електричній мережі з
метою підвищення якості електропостачання**

Виконав:

здобувач вищої освіти денної форми навчання
освітнього ступеня «Магістр», освітньо-
професійної програми «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»
спеціальності 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»

_____ **Роман ТКАЧУК**

Керівник: кандидат технічних наук, доцент

_____ **Віктор ДУБІК**

Оцінка захисту:

Національна шкала _____

Кількість балів _____ Шкала ECTS _____

Допускається до захисту:

«_____» _____ 2024 р.

Гарант освітньої програми

«Електроенергетика,

електротехніка та електромеханіка»

спеціальності 141 «Електроенергетика,

електротехніка та електромеханіка»

кандидат технічних наук, доцент _____ **Павло ПОТАПСЬКИЙ**

К. Кам'янець-Подільський, 2024р.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1 ВІДОМОСТІ ПРО АСИМЕТРІЮ В ЕЛЕКТРИЧНІЙ МЕРЕЖІ ТА ЗАГАЛЬНА ОЦІНКА ЯКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МЕРЕЖІ	11
1.1. Якість електричної енергії.....	11
1.1.1. Основні параметри що визначають якість електроенергії.....	11
1.1.2. Оцінка якості електричної енергії	16
1.1.3. Нормування окремих показників якості електричної енергії.....	17
1.1.4. Нормування показників якості електроенергії в електричних мережах низької та середньої напруги	19
1.1.5. Нормування показників якості електроенергії в електричних мережах високої напруги	21
1.1.6. Обчислення допустимого рівня гармонійних складових за прийнятим значенням показників якості електроенергії.....	22
1.1.7. Оцінка ступеня невизначеності показників якості електричної енергії	25
1.2. Основні причини виникнення асиметрії.....	27
1.3. Особливості аналізу інтергармонік та їх вплив на ефективність електричних мереж	30
1.4. Парні гармоніки й фактор асиметрії	54
Висновки до розділу	57
РОЗДІЛ 2 МЕТОДИ АНАЛІЗУ СПОТВОРЕНЬ В ЕЛЕКТРИЧНІЙ МЕРЕЖІ.....	59
2.1. Постановка питання	59
2.2. Основи вейвлет-аналізу	62
2.2.1. Головні ознаки вейвлет-функцій	63
2.2.2. Неперервне Вейвлет-перетворення	64

2.3. Метод перетворення Фур'є	66
2.4. Порівняння наявних методів аналізу спотворень сигналу напруги	70
2.5. Методологічне проведення гармонійного аналізу при використанні вейвлет-перетворень	76
Висновки до розділу	79
РОЗДІЛ 3 ВИМІРЮВАННЯ ТА АНАЛІЗ ГАРМОНІЧНИХ СПОТВОРЕНЬ	80
3.1. Гармонійні та інтергармонійні групи та підгрупи за формами напруги та струму	80
3.2. Вимірювання гармонійних спотворень.....	82
Висновки до розділу	89
ВИСНОВКИ.....	90
СПИСОК ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ.....	91

ВСТУП

Електрична енергія є невід'ємною складовою більшості процесів, що пов'язані з діяльністю людини. Завдяки своїм унікальним властивостям, вона відіграє ключову роль у створенні інших видів енергії та продукції, безпосередньо впливаючи на їх якість.

На відміну від інших видів продукції, якість електричної енергії має свої особливості. Вона визначається сукупністю параметрів, яким повинен відповідати кожен електричний пристрій, розрахований на роботу в заданих умовах експлуатації. До таких параметрів належать номінальна частота, напруга, коефіцієнт форми кривої напруги та інші характеристики.

Погіршення якості електроенергії найчастіше викликано підвищенням рівня електромагнітної сумісності в системах електропостачання. Цей процес зумовлений низкою факторів, пов'язаних із виробництвом, передачею, розподілом та споживанням електроенергії. Ефективне управління якістю електроенергії є важливим для забезпечення надійності функціонування обладнання та стабільності роботи енергосистеми.

Асиметрія напруги значно впливає на якість електричної енергії в мережі, оскільки асиметричне навантаження призводить до порушення нормальних умов роботи електроприймачів. Це негативно позначається на ряді ключових показників, таких як ефективність роботи обладнання, енергоспоживання та стабільність електропостачання. Актуальність проблеми асиметрії напруги зростає через постійне впровадження нових потужностей у промисловості, застосування сучасних технологій та підключення нових джерел генерації до об'єднаної енергосистеми України. Ці фактори сприяють підвищенню навантаження на мережі, що ускладнює забезпечення рівномірності напруги. З розвитком енергетики та активним використанням різних електротехнічних засобів характер споживання електроенергії змінюється. Він стає більш нерівномірним і асиметричним, що сприяє появі вищих гармонік у спектрі навантаження. Це негативно впливає на якість електроенергії, знижуючи ефективність роботи обладнання та стабільність електропостачання.

Такий стан справ вимагає впровадження ефективних рішень для зменшення впливу асиметрії напруги та гармонік на енергосистему. Основна увага має бути приділена удосконаленню технологій вирівнювання навантаження, компенсації реактивної потужності та підвищенню стабільності напруги в мережах.

Проблема присутності вищих гармонік напруги $(u(t))$ та струму $(i(t))$ в електричних мережах, а також необхідність мінімізації їх негативного впливу, є актуальною та потребує ефективного вирішення. Сучасні системи обліку електроенергії часто не враховують усіх процесів, що відбуваються в електричних мережах, зокрема впливу вищих гармонік та асиметричних складових напруги. Це може призводити до погіршення якості електроенергії та створювати додаткові проблеми в роботі енергосистеми.

Вирішення цього питання вимагає вдосконалення технологій обліку електроенергії, розробки засобів для зниження впливу гармонік, а також врахування асиметричних складових під час аналізу стану електричних мереж.

Актуальність теми Аналіз гармонійних складових у системах електричних мереж є важливою та актуальною темою, пов'язаною з проблемою забезпечення належної якості електроенергії у системах електропостачання промислових підприємств. Проблема гармонік та асиметрії залишається ключовим чинником, що впливає на надійність і ефективність енергопостачання споживачів.

Одним із аспектів цієї проблеми є виникнення парних гармонік, які викликають асиметрію між додатною та від'ємною півхвилями сигналів напруги або струму. Парні гармонійні струми генеруються нелінійними навантаженнями з асиметричними вольтамперними характеристиками. До таких навантажень належать випрямлячі, перетворювачі, дугові печі та інші електричні пристрої. Вони створюють парні гармоніки в сигналах напруги, що негативно впливають на якість електроенергії, спричиняючи додаткові втрати та ускладнюючи експлуатацію електричних мереж.

Розуміння механізмів утворення гармонійних складових, а також розробка методів для їх аналізу та компенсації є необхідними для покращення показників якості електроенергії та забезпечення надійного електропостачання.

Варто звернути увагу, що парні гармоніки спричиняють досить значний негативний вплив на навантаження системи. Інтернаціональні енергетичні стандарти диктують строгі обмеження на парні складові гармонік, проте вітчизняні стандарти взагалі не регламентують показники парних гармонік. По цій причині варто розглянути дану тему, оскільки для сучасних енергетичних систем вона є актуальною, так як допоможе зрозуміти процес впливу асиметричних складових на роботу мережі.

Метою роботи є аналіз способів підвищення ефективності та точності комплексного оцінювання впливу асиметричної напруги в електричних мережах. Це дозволить більш повно аналізувати процеси та вимірювати параметри електромагнітних явищ, сприяючи підвищенню ефективності роботи енергосистем. Крім того, розглянуто можливі шляхи усунення негативного впливу асиметрії напруги на функціонування електричних мереж.

Для досягнення поставленої мети визначено наступні завдання:

1. Провести аналіз поточного стану енергетичної системи та її характеристик.
2. Дослідити вплив асиметрії напруги на ефективність роботи системи електроспоживання.
3. Провести аналіз і систематизацію методів визначення парних гармонійних складових відповідно до міжнародних і вітчизняних стандартів.
4. Оцінити та проаналізувати гармонійні показники в електричних мережах.
5. Розробити методику оцінювання та вимірювання гармонійних груп і підгруп, а також визначення фактора асиметрії.

Це дослідження спрямоване на вирішення актуальних проблем якості електроенергії в умовах сучасних енергосистем.

Об'єктом дослідження є процеси визначення режимів електроспоживання в системах електропостачання України.

Предметом дослідження є методи та інструменти для опису режимів електроспоживання, а також аналіз впливу асиметрії, гармонійних складових, інтергармонік та парних гармонік на функціонування електроспоживачів.

Методи дослідження. основою дослідження є комплекс загальнонаукових

та спеціальних методів, а саме методи Вейвлет-аналізу, метод аналізу Фур'є, а також математичне моделювання та математичне програмування.

Практичне значення одержаних результатів:

- проведено системний аналіз впливу асиметрії напруги на роботу електричної мережі;
- проаналізовано можливі способи усунення негативного ефекту від асиметрії напруги в електричній мережі;
- на основі аналізу Фур'є проведено дослід, що дозволить підвищити точність гармонійного аналізу асиметрії напруги в електричній мережі;
- на основі розробленого способу проведено дослід, що дозволить визначити показники асиметрії та групу повних гармонійних спотворень першого та другого порядку.

Апробація результатів роботи. Результати магістерської дисертації були оприлюдненні на четвертій Всеукраїнській науково-практичній конференції «Ефективне використання енергії: стан і перспективи». (19 листопада 2024). – Кам'янець-Подільський: ЗВО «ПДУ», 2024.

Публікації. За результатами наукових досліджень було опубліковано тези:

Роман ТКАЧУК. ВПЛИВ ГАРМОНІЧНИХ НАПРУГ ТА СТРУМІВ НА ОБЛАДНАННЯ / Матеріали IV Всеукраїнської науково-практичної конференції «Ефективне використання енергії: стан і перспективи». (19 листопада 2024). – Кам'янець-Подільський: ЗВО «ПДУ», 2024.

ВИСНОВКИ

1. Якість електроенергії - це основоположна сукупність властивостей електроенергії, що визначають вплив на електрообладнання і регулюються за допомогою параметрів якості електричної енергії. Однак електрообладнання генерує в мережу завади, що можуть погіршувати показники якості електроенергії, одними з яких є інтергармоніки. Тому проблема недостатності дослідження для визначення наразі стає все актуальнішою.

2. Як показують дослідження, вейвлет-перетворення має низку переваг перед Фур'є-перетворенням, зокрема при ідентифікації спотворень несинусоїдальних режимів розподільних мереж 0,38/0,22 кВ. Однак основним недоліком вейвлет перетворення є його відносна складність в порівнянні з перетворенням Фур'є.

3. Окрім звичних проблем, що з'являються при виникненні гармонік, як перегрів чи зниження ресурсу, також є багато інших, таких як: значний термічний ефект, мерехтіння світла, перевантаження, телекомунікаційні та акустичні завади та збурення, насичення трансформатора, синхронні коливання, помилкові спрацювання апаратури, вихід з ладу систем керування, низькочастотні коливання та коливання напруги. Ці всі проблеми несуть значний вплив на ефективність електроспоживання.

4. Оскільки зацікавленість у вирішенні питань пов'язаних з асиметрією напруги поступово збільшується то розроблення способу її визначення з подальшою комерціалізацією задля ідентифікації асиметричних складових і зменшення негативних наслідків є доцільним

5. За результатами розробленої методики опису асиметрії напруги та гармонік, що виникають в електричній мережі, було знайдено рішення для підвищення точності проведення гармонійного аналізу.

6. Було розроблено методику визначення показника асиметрії для моніторингу наявності асиметрії в системах електропостачання.

Засвідчую, що у цій кваліфікаційній роботі немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Здобувач вищої освіти _____ Роман ТКАЧУК

СПИСОК ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загального призначення (EN 50160:2010, IDT) : ДСТУ EN 50160: 2014. - [Чинний від 2014-10-01]. - К.Мінекономрозвитку України, 2014. - 33 с. - (Національний стандарт України)
2. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения : ГОСТ 13109-97 - [Чинний від 199901-01].
- Технический комитет по стандартизации в области электромагнитной совместимости технических средств. - 33 с. - (Межгосударственный стандарт)
3. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий : [4-е издание переработанное и дополненное] / И.В. Жежеленко. - К.: Энергоатомиздат, 2019. - 331 с
4. Иванов В.С. Режимы потребления и качество электроэнергии систем электроснабжения промышленных предприятий / В.С. Иванов, В.И. Соколов. - К.: Энергоатомиздат, 1987. - 336 с. - (Экономия топлива и электроэнергии).
5. . Мельник Л.Г. Економіка енергетики : [підручник] / Л.Г. Мельник, І.К. Сотник. - Суми: Університетська книга, 2015. - 378 с.
6. Сапунов К. В. Вопросы качества электроэнергии / К. В. Сапунов // Новости электротехники. — 2021. — № 4.
7. EN 61000-4-30:2019 Електромагнітна сумісність (ЕМС). Частина 430. Методики випробування та вимірювання. Вимірювання показників якості електричної енергії
8. ДСТУ IEC 61000-4-30:2010 Електромагнітна сумісність. Частина 4-30. Методи випробування та вимірювання. Вимірювання показників якості електричної енергії (IEC 61000-4-30:2018, IDT)
9. Kuznetsov V.G., Nikolaenko V.G. Analysis of permissible level of voltage asymmetry and harmonics in electrical networks // Proceeding ICHPS IV. Intern. Conf. on harmonics in power systems. October 4-6, 1990, Budapest,

Hungary. i'Q. 18124.

10. *Kuznetsov V.G., Shpolianskii O.G. Variation analysis of asynchronous motor electrical power consumption and losses under no sinusoidal voltage // Elekrika. ^ 2016. №4. - P. 25-29*
11. *Shidlovskii A.K., Kuznetsov V.G. Improving of power quality in electrical networks. - Kiev: Naukova dumka, 2016. i 268 p.*
12. *Shidlovskii A.K., Kuznetsov V.G., Nikolaenko V.G. Economic evaluation of results of power quality degradation in the modern electrical supply systems / Preprint - 253, Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine. - Kiev, 1981. - 49 p. (Rus)*
13. Сапунов К. В. Вопросы качества электроэнергии / К. В. Сапунов // Новости электротехники. — 2021. — № 5.
14. Шидловский А.К. Высшие гармоники в низковольтных электрических сетях / А.К. Шидловский, А.Ф. Жаркин. - Киев: Наукова думка, 2005. - 211 с.
15. Пивняк Г.Г. Интергармоніки в системах електропостачання / Г.Г. Пивняк, І.В. Жежеленко, Ю.А. Папаїка, О.Г. Лисенко // Науковий вісник НГУ. - 2017. - №6. - С.109-114.
16. *Shah N. Harmonics in power systems Causes, effects and control // Whitepaper [Електронний ресурс]. - USA: Siemens Industry, Inc. - 2013.*
17. Особливі режими електричних мереж: Навчальний посібник/ Г.Г. Пивняк, А.К. Шидловський, Г.А. Кігель, А.Я. Рибалко, О.І. Хованська. - Д.: Національний гірничий університет, 2019.-376 с.
18. Основы теории цепей / Г. В. Зевеке, П. А. Ионкин, А. В. Нетушил [и др.]. - К. : Энергоатомиздат, 2019. - 528 с.
19. Н. К. Астафьева, “Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения”, УФН, 166:11 (1996), 1145-1170; Phys. Usp., 39:11 (1996), 10851108
20. Шидловский А.К., Кузнецов В.Г. Повышение качества энергии в электрических сетях - Киев: Наук. думка, 2016. - 268с.
21. Шидловский А.К., Жаркин А.Ф. Высшие гармоники в низковольтных электрических сетях - Киев: Наук. Думка, 2005. - 210с.

22. *Asheesh Kumar Singh, G.K. Singh, R. Mitra "Impact of Source Voltage Unbalance on AC- DC Rectifier Performance" 2nd International Conference on Power Electronics System and Applications - 2016.*
23. *Annette von Jouanne, Senior Member, IEEE and Basudeb (Ben) Banerjee, Member, IEEE "Assessment of Voltage Unbalance" IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, VOL. 16, NO. 4, OCTOBER 2021*
24. *J.A. Orr, A.E. Emanuel, "On the need for strict second harmonic limits", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 15, No. 3, July 2000, pp. 967971.*
25. *G.T. Heydt, Y. Liu, "Second harmonic components in power system voltages and currents", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 20, No. 1, January 2016, pp. 521-523.*
26. *IEC Standard 61000-4-7. Electromagnetic compatibility (EMC), Part 4-7: Testing and measurement techniques - General guide on harmonics and interharmonics measurements and instrumentation, for power supply systems and equipment connected thereto. Second edition, 2016.*
27. *J. Barros, E. Perez A. Pigazo, R.I. Diego, "Simultaneous measurement of harmonics, interharmonics and flicker in a power system for power quality analysis", Fifth International Conference on Power System Management and Control (IEE Conf. Publ. No.488). IEE, London, UK, April 2016, pp. 100-105.*
28. Розанців Ю.К. Силова електроніка: підручник для внз / Розанців Ю.К., Рябчинський К.В., Кваснюк А.А. - К.: Видавничий дім МЭИ, 2007. - 632 с.
29. Церазов А.Л. Дослідження впливів несиметрії і несинусоїдальності напруги на роботу асинхронних двигунів / А.Л. Церазов, Н.И. Якименко. - К.: , 2013. - 120с.
30. Залмазон Л. А. Перетворення Фур'є, Уолша, Хаару і їх застосування в управлінні, зв'язку і інших областях. - К. : Наука. Гл. ред. физ.- мат. літ., 2019. - 496 с.
31. Березень С. Е. Цифровий спектральний аналіз і його застосування. - К. : Світ, 1990. - 584 с.
32. Блейхут Р. Швидкі алгоритми цифрової обробки сигналів : Пер. з англ.

- К. : СБіТ, 2019. - 448 с.

33. AndriaG., SavinoH., TrottaA. *Windows and Interpolation Algorithms to Improve Electrical Measurement Accuracy* // *Transactions on Instrumentation and Measurement*. — 2019. — Vol. 38, № 4. — P. 856—863.

34. Girgis A., ChangB., Makram E. *A Digital Recursive Measurement for on Line Tracking of Power Systems Harmonics*//*IEEE Trans. OnPower Delivery*. — 1991. —Vol. 6, № 3.— P. 1153—1160.

35. Dash P., Pradham A., Panda G. *Frecuency Estimation of Distorted Power System Signals Using Extended Complex Kalman Filters* // *IEEE Trans. On Power Delivery*. — 1999. — Vol. 14, № 3. — P. 761—766.

36. HartD., Uy D., NovoselD. *et al Improving Power Quality* // *ABB Review*. — 2000. — Vol. 4, № 1. —P. 12—19.