УДК 621.316

ВИЗНАЧЕННЯ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ НАПРУГИ У ПРОМИСЛОВИХ СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПРИ ОБМЕЖЕНІЙ ПОТУЖНОСТІ ЕНЕРГОСИСТЕМИ

ПАПАЇКА Ю.А. д-р. техн. наук, професор, завідувач кафедри електроенергетики Національного технічного університету «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна, e-mail: papaika.yu.a@nmu.one, ORCID: 0000-0001-6953-1705;

ЛИСЕНКО О.Г. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електропривода Національного технічного університету «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна, e-mail: lysenko.o.g@nmu.one, ORCID: 0000-0002-7041-671X;

МАЛИШКО М.М. аспірант кафедри електроенергетики Національного технічного університету «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна, e-mail: malyshko.m.m@nmu.one, ORCID: 0009-0000-0413-053X;

УДОВИК О.В. аспірант кафедри електроенергетики Національного технічного університету «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна, e-mail: udovyk.o.v@nmu.one, ORCID: 0009-0002-1000-7815.

Мета роботи. *Обгрунтувати залежності визначення показників електромагнітної сумісності систем електропостачання промислових підприємств при наявності потужних нелінійних та несиметричних навантажень в умовах обмеженої потужності енергосистеми.*

Методи дослідження. *Методи теоретичної електротехніки для побудови схем заміщення трифазних електричних мереж, ряди Фур'є для аналізу вищих гармонік струму та напруги, метод симетричних складових для аналізу несиметрії.*

Отримані результати. *Виділено основні показники якості напруги, значення яких залежить від параметрів живлячої електроенергетичної системи (потужності короткого замикання). Наведено аналітичні залежності розрахунку показників несиметрії та несинусоїдальності при обмеженні потужності КЗ. Проаналізовано засоби корекції показників якості в умовах електричних мереж з розподіленою генерацією.*

Наукова новизна. *Наукова новизна полягає у встановленні закономірностей зміни режимних параметрів промислового навантаження від параметрів енергосистеми, що виражається у взаємопов'язаних змінах показників якості напруги. При цьому в аналітичних моделях додана опція отримання варіативних змін параметрів енергосистеми як за рахунок генеруючих потужностей, так і через параметри схем заміщення електричних мереж різного класу напруги.*

Практична цінність. *Для інженерних розрахунків запропоновано спрощені алгоритми визначення показників якості напруги (відхилення, коливання, несиметрії та несинусоїдальності напруги) з урахуванням реальної конфігурації електричної мережі та актуальної потужності енергосистеми. Це дає можливість оцінити ефективність передачі та перетворення електроенергії за довільної конфігурації схеми післяаварійного живлення.*

Ключові слова: якість напруги; вищі гармоніки; несиметрія напруги, коливання напруги.

I. ВСТУП

Енергетика України сьогодні працює в умовах надскладних викликів, пов'язаних з військовою агресією росії та руйнації значної частки енергогенеруючих потужностей та системоутворюючих підстанцій. Основні вимоги, що висуваються до української енергосистеми Урядом – технічні й експлуатаційні обмеження генерації, надійність та якість електропостачання об'єктів критичної інфраструктури, максимальне впровадження відновлюваних джерел енергії, розвиток децентралізованих систем генерації електричної та теплової енергії для промисловості та муніципалітетів. Ринок електроенергії України зараз працює у надскладних реаліях з необхідністю прогнозування електроспоживання, системою почергових вимикань електроенергії та визначення пріоритетів підтримки воєнно-промислового комплексу для забезпечення обороноздатності та економічної безпеки [1] - [2]. Зв'язок з європейською системою ENTSO-E дозволяє Об'єднаній енергетичній системі забезпечити стійкість режиму та надійності електропостачання [3].

Реальна ситуація сьогодення української електроенергетики визначається надвисоким рівнем втрат електроенергії при передачі (до 20 %), пов'язаних з переходом до схем аварійного транзиту та перетворення електроенергії. У світовій історії це перший унікальний випадок, коли потужна індустріально-

© Папаїка Ю.А., Лисенко О.Г., Малишко М.М., Удовик О.В., 2024
DOI 10.15588/1607-6761-2024-3-4

розвинена країна проходить воєнний період своєї історії з щоденними атаками на енергетичні об'єкти та успішно протистоїть технічним, економічним та екологічним загрозам. Високий рівень втрат в електричних мережах України пов'язаний з недостатнім рівнем компенсації реактивної потужності, застарілими основними фондами об'єктів електроенергетики, недостатнім використанням засобів оптимізації режимів роботи і регулювання напруги, невирішеністю проблем якості електричної енергії, особливо в умовах обмеженої потужності енергосистеми [4]. Низький рівень якості електричної енергії призводить до значного зниження енергетичної ефективності електричних мереж за цілою низкою показників (відхилення, несиметрія, несинусоїдальність напруги). Проблема якості електричної енергії – це складова комплексного поняття електромагнітної сумісності системи електропостачання (СЕП). При роботі «ослабленої» енергосистеми або масового впровадження децентралізованого принципу побудови електричних мереж, проблема якості електроенергії набуває свого визначального значення [1] - [8].

Визначаючи стратегічне значення для енергетичної безпеки й обороноздатності України промислових підприємств різних форм власності, необхідно підкреслити актуальність виконання комплексних досліджень з енергетичної ефективності та якості електропостачання підприємств, зважаючи на нестаціонарні умови споживання електроенергії, обмеженого значення потужності короткого замикання та режимних особливостей потужних промислових електроустановок [4].

II. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Наукові дослідження у галузі електромагнітної сумісності та якості електроенергії проводились відомими українськими та світовими вченими протягом багатьох років [5]-[6]. Спільні дослідження науковців НТУ «Дніпровська політехніка» та Приазовського технічного університету (м. Маріуполь, Україна) дозволили розвинути наукові основи електромагнітної сумісності та визначити особливості формування енергоефективних режимів потужних промислових навантажень гірничо-металургійного комплексу України. Науково доведені залежності розповсюдження електромагнітних завад нелінійного та несиметричного характеру в електричних мережах від дугових сталеплавильних печей, прокатних станів, вентильних перетворювачів та зварювальних установок [2]. Враховуючи особливості побудови систем електропостачання гірничих та металургійних підприємств, були запропоновані організаційні та технічні засоби нормалізації показників якості напруги. Ефективність таких заходів була доведена в умовах діючих підприємств [8].

Роботи Інституту Електродинаміки НАН України дозволили систематизувати нормативно-правову базу регулювання якості електричної енергії в системах електропостачання з урахуванням європейського підходу, що набуло надзвичайно важливого значення при переході на синхронну роботу з ENTSO-E [9]. На основі досліджень був впроваджений стандарт ДСТУ EN 50160:2023 [10], який встановлює терміни та значення для основних характеристик напруги в точках приєднання користувачів до електричних мереж змінного струму низької, середньої та високої напруги загальної призначеності в нормальних умовах експлуатування. Цей стандарт установлює норми або значення, у межах яких можна знайти очікувані характеристики напруги на будь-якому терміналі живлення електричних мереж загальної призначеності, але не визначає типову ситуацію, яку зазвичай спостерігає окремий користувач мережею електропостачання [12]. Однак, розроблені стандарти не враховують специфічні особливості технологій та не дають відповіді, як забезпечити нормальне співіснування електроприймачів з «проблемним» характером електричних навантажень та ослабленою електричною мережею в єдиному електромагнітному середовищі.

Науковці Харківського політехнічного інституту запропонували унікальні інструменти дослідження та діагностики повітряних ліній електропередач та підстанцій за допомогою акустичного сканування трас ЛЕП та ошиновок підстанцій [11]. Наукові дослідження в області якості електроенергії проводились у напрямку визначення зони відповідальності споживача та постачальника у випадках, коли джерело електромагнітних збурень знаходиться за межами вузла розподілу балансової приналежності [13] - [14].

Таким чином, сучасний рівень досліджень різними наукових школами України відповідає викликам, які сформувались протягом останнього десятиліття щодо нормативно-правового регулювання якості напруги та стрімкому розвитку вентильних перетворювачів у технологіях різних промислових виробництв. У той же час невирішеним виявилась проблема електромагнітної сумісності потужних промислових стаціонарних та мобільних електроустановок при живленні їх від енергосистеми обмеженої потужності або джерела автономного електропостачання. Актуальність досліджень полягає у необхідності розробки методів та алгоритмів нормалізації показників якості напруги в енергосистемах обмеженої потужності з оптимізацією пускових перехідних процесів.

III. МЕТА РОБОТИ

Метою даної роботи є систематизація досліджень показників якості напруги (відхилення, коливання, несиметрія та несинусоїдальність) у системах електропостачання (СЕП) промислових підприємств та визначення залежностей, які враховують системні обмеження генерації потужності. Для досягнення мети необхідно проаналізувати схеми заміщення та ввести у розрахунки змінні коефіцієнти, що враховують точку приєднання нелінійного або несиметричного

споживача у системі електропостачання.

IV. ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГУ МАТЕРИАЛУ І АНАЛІЗ ОТРИМАННИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Нормалізація показників якості напруги (ПЯН) до значень стандарту ДСТУ EN 50160:2023 – одна з головних проблем електромагнітної сумісності. Система ПЯН формує кількісні характеристики повільних (відхилень) та швидких (коливань) змін діючого значення напруги, симетрії, частотного складу. Діючий в Україні розроблений Європейський комітет нормалізації в області електротехніки (CENELEK) [7]. Критичний аналіз основним підходам розрахунку та оцінки ПКЯ дозволяє визначити додаткові можливості покращення якості напруги.

Відхилення напруги. Головною причиною виникнення відхилень (змін) напруги в СЕП є зміна навантажень, що виникає при:

- змінах режиму роботи споживачів;
- додатковою потужністю споживачів, що приєднуються;
- оперативними перемиканнями;
- аварійними перехідними процесами.

Значення відхилення напруги у будь-якій точці мережі є функцією багатьох змінних:

$$\delta U_t = f(U_s^1, P, Q, Z, Y, \sum \delta U^d), \qquad (1)$$

де P з Q – активна і реактивна потужність ділянки електричної мережі; U_s^1 – напруга мережі живлення (наприклад, на шинах підстанції); Z і Y - опір і провідність елементів електричної мережі; $\Sigma\delta U^d$ – сума «добавок», тобто додаткових значень напруги (РПН, ПБВ, локальні регулятори тощо).

Несиметричні режими напруги мережі живлення можуть бути викликані несиметрією як джерела, так і споживачів електроенергії. У даному дослідження розглядається складова несиметрії, викликана нерівномірним розподілом навантаження по фазах, та вводимо припущення, що напруга джерела живлення симетрична по фазам.

Несиметрія напруг у розподільчій мережі промислового підприємства пов'язана зі зростанням числа і потужності несиметричних навантажень - це такі приймачі симетричне виконання яких або неможливо або невиправдано з техніко-економічних міркувань. До таких установок відносяться зварювальні агрегати, дугові та індукційні печі, деякі типи печей опору, освітлення. Підключення таких навантажень до трифазної мережі обмеженої потужності обумовлює появу як тривалих так і короткочасних несиметричних режимів струмів і напруг.

Несиметрія напруг негативно впливає на роботу всіх елементів системи електропостачання, знижує термін служби ізоляції, призводить до збільшення втрат потужності, перегріву обмоток машин, що обертаються, знижує надійність основного і допоміжного електрообладнання [6].

Для зниження несиметрії було розроблено велику кількість спеціальних симетруючих пристроїв. Необхідно відзначити, що в загальному випадку симетрування несиметричних режимів можна здійснювати як за допомогою реактивних, так і активних елементів, проте всі існуючі симетруючі пристрої виконані на реактивних елементах, оскільки в них відсутні додаткові втрати активної потужності. З економічних міркувань застосування симетруючих пристроїв на активних елементах доцільно лише тоді, коли корекція несиметричних режимів здійснюється за допомогою самих навантажувальних елементів.

Процес коливання струмів в окремих фазах мережі 380 В промислового підприємства обумовлений особливостями режимів цехових електроприймачів і має випадковий характер. Зміна коефіцієнтів несиметрії у часі також відбувається випадковим чином, тому прогнозувати значення показників несиметрії при зниженні потужності енергосистеми можна лише наближено з похибкою, прийнятною для інженерних розрахунків.

Несиметрія напруги має максимальні значення в точці приєднання несиметричного навантаження. Отже, віддаляючи «чутливі» приймачі від точки підключення несиметричного навантаження, можна знизити їх затискачі рівень несиметрії напруг. Цього можна досягти зміною схеми електропостачання. Наприклад, в електричній мережі можна використовувати роздільне підключення несиметричного та симетричного навантажень за допомогою трансформатора або реактора з розщепленими обмотками. Можна також використовувати індивідуальне живлення несиметричного навантаження від енергосистеми. Дані методи іноді використовуються при проектуванні систем електропостачання та подібний підхід добре себе зарекомендував при розробці децентралізованих електричних систем з автономними джерелами живлення (дизельгенераторні установки, сонячні електростанції, установки когенерації).

Можливість симетрування напруги шляхом збільшення потужності КЗ підтверджується відомою формулою наближеної оцінки несиметрії напруги у трифазній системі у вигляді відношення потужності несиметричного навантаження до потужності короткого замикання в місці її підключення, % [4]:

$$K_U \approx \frac{S_{ном1ф}}{S_{КЗ}}, \qquad (2)$$

де $S_{ном1ф}$ – потужність еквівалентного однофазного навантаження; $S_{КЗ}$ – потужність КЗ в точці приєднання однофазного навантаження.

$$S_{КЗ} = \frac{U_{ном}^2}{z_c},$$

де $U_{ном}$ – номінальна лінійна напруга; z_c - опір системи живлення.

Зміна конфігурації схем зовнішнього та внутрішнього електропостачання промислових об'єктів внаслідок ліквідації аварійних режимів призводить до значних змін рівнів потужності КЗ. У випадку переходу до схем аварійного живлення від автономних джерел енергії потужність КЗ зменшується на декілька порядків. Моделювання показників несиметрії напруги при цьому здійснюється при врахування варіативного набору випадкових факторів, що впливають на еквівалентний опір електричної мережі (рис.1).

Еквівалентна схема заміщення для точки 1 представлена на рис 2. Тут коло $\left(x_c^* - r_c^*\right)$ є еквівалентним контуром мережі до точки 1, а коло $\left(x_{екв}^* - r_{екв}^*\right)$ – активні та індуктивні опори еквівалентного навантаження та з'єднувальних проводів до точки підключення до розподільного шинопроводу.

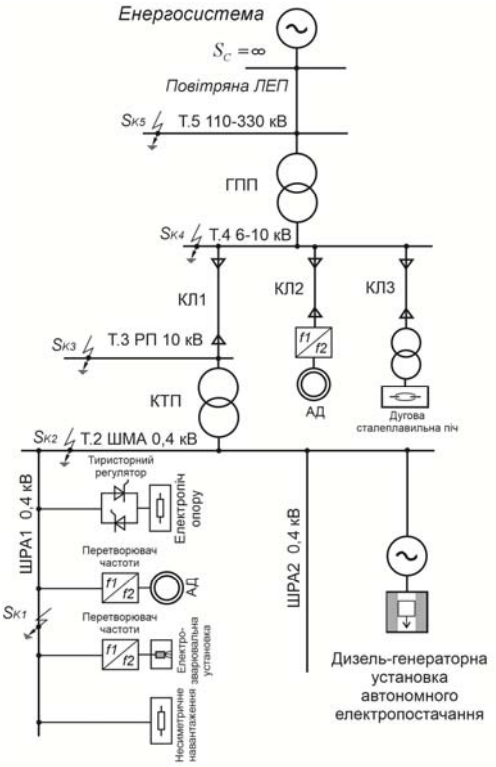


Рисунок 1. Однолінійна схема електропостачання промислового підприємства з нелінійними та несиметричними навантаженнями

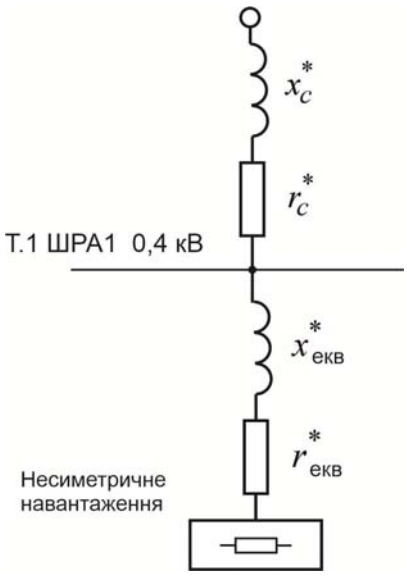


Рисунок 2. Еквівалентна схема заміщення для вузла приєднання несиметричного навантаження

Подібні схеми складаються для усіх характерних точок приєднання несиметричного навантаження по промисловому підприємству.

Застосувавши описаний підхід були отримані залежності коефіцієнта несиметрії по зворотній послідовності від параметра режиму енергосистеми (відносного значення потужності короткого замикання) для різних класів напруги (рис. 3). Цінність даних залежностей полягає у можливості їх застосування у інженерній практиці без громіздких розрахунків.

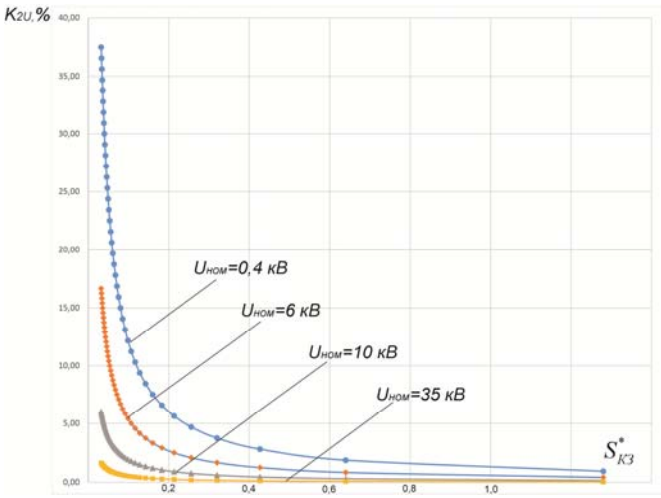


Рисунок 3. Залежності коефіцієнта несиметрії K_{2U} від потужності КЗ при значенні несиметричного навантаження 1% від потужності системи

Аналізуючи отримані графічні залежності можна зробити висновок, що у системах обмеженої потужності значно погіршується несиметрія для електрично

віддалених від джерела живлення мережах 0,4 та 6 кВ.

Коливання напруги негативно позначаються на зоровому сприйнятті предметів, деталей, графічних зображень і, зрештою, на продуктивність праці та зір працівників [15].

Фізіологічну основу сприйняття зорового образу становить, як відомо, робота зорового аналізатора, однією з основних частин якого є рецептор. Його основна функція полягає у перетворенні енергії діючого подразника на нервовий процес. Подразником зорового аналізатора служить світлова енергія. А оскільки процеси, що відбуваються в зоровому аналізаторі, як і всі процеси в природі біологічної системи, наприклад процес зорового сприйняття, мають енергетичний зміст, то зоровий аналізатор має певні енергетичні характеристики.

За наявності вищих гармонік (ВГ) у СЕП з'являються додаткові втрати в електричних обертових машинах, трансформаторах, повітряних та кабельних ЛЕП, утруднюється або стає неможливою компенсація реактивної потужності за допомогою конденсаторних установок, скорочується термін служби ізоляції електричних машин та апаратів, погіршується робота пристроїв захисту, автоматики, телемеханіки та зв'язку, виникають похибки у роботі лічильників [16].

Оцінка коливань та несинусоїдальності напруги спрощеними інженерними методами широко використовується в умовах діючих підприємств та сьогодні має надзвичайно актуальне значення для забезпечення енергоефективного та надійного електропостачання. Система електропостачання промислового підприємства є складною й динамічною, постійні часу основних елементів якої досить високі, тому вони можуть розглядатися як елементи, параметри яких в частотному спектрі огинаючої напруги (0,1-15 Гц) практично незмінні й їх можна вважати лінійними [8]. При складанні схем заміщення силових елементів (трансформаторів, реакторів, більшості навантажень) модуль передаточної функції може бути представлений коефіцієнтом передачі із загальним виразом [8]:

$$K = \frac{x_c}{x_c + x_e}, \qquad (3)$$

де x_c – індуктивний опір СЕП до точки розрахунку; x_e – індуктивний опір силового елементу. Опори можуть розраховуватися за схемою заміщення СЕП, складеною для розрахунку струмів КЗ. Залежно від розрахункових величин може бути визначене значення сумарного коефіцієнта гармонійних спотворень K_{THDU} при розрахунках несинусоїдальних режимів, δU_t при розрахунку коливання або дози флікера P_{st} або P_{lt}. Похибка розрахунку δU_t і K_{THDU} у вузлах СЕП не перевищує 3 %; для P_{st} і P_{lt} виявляється дещо більшою (до 4-5 %).

На рис. 4 і рис. 5 представлені схеми електропостачання промислового підприємства різних варіантів і їх схеми заміщення.

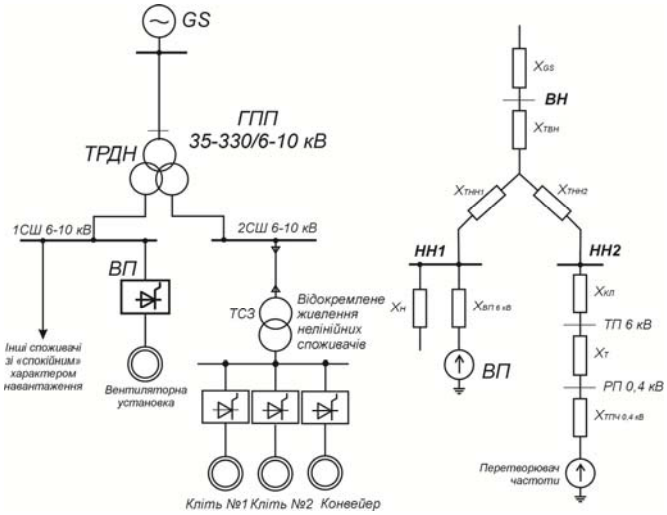
У табл. 1 і табл. 2 представлені значення коефіцієнтів передачі K для типових двообмоткових трансформаторів типу ТРДН з $U_{ном}$=150 кВ та зі здвоєними реакторами. В усіх випадках вихідною точкою (вузлом) розрахунку за таблицями є значення нелінійного навантаження на шинах джерела несинусоїдальності або коливань напруги.

Сумарний коефіцієнт гармонійних спотворень за напругою на шинах приєднання перетворювачів частоти визначається за залежністю:

$$K_{THDU}^{(ВП)} = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^{40} U_{(n)i}^2}}{U_{ном}}, \qquad (4)$$

де $U_{(n)i}$ – напруга і-ої вищої гармоніки. Згідно ДСТУ EN50160:2023, враховується спектр до сорокової вищої гармоніки.

У таблицях наведені значення коефіцієнтів передачі (в.о.) $K_{ВП\text{-}СП}$ і $K_{ВП\text{-}ВН}$ для двообмоткових трансформаторів (ТРДН) $U_{ВН}$ =150 кВ і $K_{ВП\text{-}СТ}$, $K_{ВП\text{-}ВН}$, і $K_{ВП\text{-}НН2}$ при використанні здвоєних реакторів з $U_{ном} = 6-10кВ$.

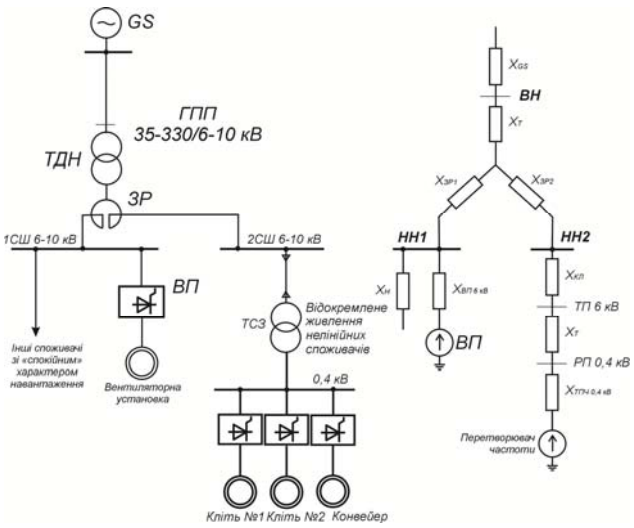


а) б)

Рисунок 4. Схема електропостачання підприємства з двообмотковим трансформатором (а) та розрахункова схема заміщення (б)

Таблиця 1. Значення коефіцієнтів передачі для типових трансформаторів з розщепленими обмотками з $U_{ВН}$ = 150 кВ

$S_{ном}$, МВА	$S_{КЗ}$, МВА	Коефіцієнти передачі	
		$K_{ВП\text{-}СП}$	$K_{ВП\text{-}ВН}$
25	1000	0,145	0,564
	2000	0,122	0,488
	3000	0,104	0,386
	4000	0,095	0,323
40	1000	0,178	0,712
	2000	0,153	0,604
	3000	0,125	0,502
	4000	0,112	0,433
63	1000	0,228	0,815
	2000	0,195	0,706
	3000	0,156	0,613
	4000	0,136	0,546



а) б)

Рисунок 5. Схема електропостачання підприємства з двообмотковим трансформатором та здвоєним реактором (а) та розрахункова схема заміщення (б)

Таблиця 2. Значення коефіцієнтів передачі при використанні здвоєних реакторів

$S_{ном}$, МВА	X_p, %	$S_{КЗ}$, МВА	Коефіцієнти передачі		
			$K_{ВП\text{-}СТ}$	$K_{ВП\text{-}НН2}$	$K_{ВП\text{-}ВН}$
25	4	2000	0,372	1,546	0,164
		3000	0,359	1,578	0,115
		4000	0,352	1,595	0,090
	6	2000	0,207	2,293	0,244
		3000	0,193	2,410	0,176
		4000	0,186	2,472	0,139
40	6	2000	0,349	1,713	0,276
		3000	0,327	1,787	0,201
		4000	0,316	1,827	0,160
	8	2000	0,230	2,296	0,370
		3000	0,207	2,483	0,280
		4000	0,196	2,591	0,227
	10	2000	0,256	1,845	0,298
		3000	0,236	1,940	0,219
		4000	0,227	1,993	0,175
63	8	2000	0,242	2,107	0,485
		3000	0,211	2,326	0,384
		4000	0,195	2,462	0,321
	10	2000	0,138	3,288	0,758
		3000	0,107	4,082	0,673
		4000	0,091	4,683	0,610
	12	2000	0,074	5,564	1,282
		3000	0,043	9,091	1,500
		4000	0,028	13,714	1,786

Несинусоїдальність напруги в точці розподілу з енергосистемою на стороні ВН:

$$K_{THD}^{(ВН)} = K_{THD}^{(ВП)} K_{ВП-ВН}, \tag{5}$$

де $K_{ВП-ВН} = K_{ВП-СТ} \cdot K_{СТ-ВН}$ - перерахунок коефіцієнтів через середню точку.

Значна частка промислового навантаження має перетворювачі енергії, тому виконаємо розрахунки коефіцієнтів передачі для розподільчої мережі 0,4 кВ. Вважаємо, що основне джерело несинусоїдальності – вентиляторна установка напругою 6 кВ.

Значення сумарного коефіцієнту гармонійних спотворень на різних ступенях розподілу електроенергії:

$$K_{THD}^{(НН2)} = K_{THD}^{(ВП)} K_{ВП-НН2},\ K_{THD}^{(РП)} = K_{THD}^{(ВП)} K_{ВП-РП},$$

$$\text{тм}\sum K_{ВП-НН2} = K_{ВП-СТ} \cdot K_{СТ-НН2}.$$

Несинусоїдальність напруги на стороні 0,4 кВ:

$$K_{THD}^{(РПП)} = K_{THD}^{(ВП)} K_{ВП-РП0,4кВ}, \tag{7}$$

$$\text{тм}\sum \begin{matrix} K_{ВП-РП} = K_{ВП-СТ} \cdot K_{СТ-НН2} \times \\ \times K_{НН2-ТП} \cdot K_{ТП-РП} \end{matrix};$$

$$K_{ТП-РП} = \frac{X_{н0,4}}{X_{н0,4} + X_m};\ X_{н0,4} = \frac{S_б}{S_{ном} \sin\varphi}.$$

Отримані залежності можуть широко застосовуватися у проектній та інженерній практиці для оперативних розрахунків параметрів електромагнітної сумісності для гнучких та швидкозмінних систем електропостачання для оцінки аварійних, ремонтних схем живлення, а також при децентралізованих обмеженнях потужності енергосистеми.

V. ВИСНОВКИ

Оціночні методи розрахунків електричних режимів незамінні при експертних оцінках електромагнітної обстановки у автономних та «проблемних» районах електричних мереж, а також у віддалених сільських або гірських місцевостях з обмеженою ви-

хідною інформацією стану та режиму електрообладнання. Особливості коефіцієнтів передачі полягають у здатності швидкої оцінки показників якості напруги у системі електропостачання підприємства при централізованому або автономному живленні споживачів. Ці коефіцієнти дають можливість розрахувати показники електромагнітної сумісності незалежно від місця підключення перетворювача в мережі, потужність яких знаходиться в межах 0.01…4.5 МВт, залежно від потужності КЗ енергосистеми.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

[1] Papaika Y. Mathematical modeling of power supply reliability at low voltage quality / Yurii Papaika, Oleksandra Lysenko, Yevgenij Koshelenko, Illa Olishevskyi // *Nauk. Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, - 2021 (2), p.97–103. https://doi.org/10.33271/nvngu/2021-2/097.

[2] Pivnyak G. Interharmonics in power supply systems / Gennadiy Pivnyak, Igor Zhezhelenko, Yurii Papaika, Oleksandra Lysenko // *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu.* - 2017 (6), pp. 109-114. ISSN 20712227.

[3] Janik P. Influence of increasing numbers of RE-inverters on the power quality in the distribution grids: A PQ case study of a representative wind turbine and photovoltaic system / Przemyslaw Janik, Grzegorz Kosobudzki, Harald Schwarz // *Higher Education Press and Springer-Verlag*. -2017. Berlin Heidelberg, https://doi.org/10.1007/s11708-017-0469-3.

[4] Pivnyak G. ASSESSMENT OF POWER SUPPLY ENERGY EFFICIENCY BY VOLTAGE QUALITY CRITERION / Gennadiy Pivnyak, Oleksandr Azukovskiy, Yurii Papaika, Careres Cabana Edgar, Olczak Pawel, Artur Dyczko // Rynek Energii. - 2021 № 4(155). p. 75-84. ISSN 14255960.

[5] IEEE 1547:2003-Standard for Interconecting Distributed Resources with Electric Power System.

[6] Standard IEC61000-2-4–2002. Electromagnetic compatibility (EMC)–Part 2-4: environment-compatibility levels in industrial plants for low-frequency conducted disturbances.

[7] CENELEC EN 50160–2010. Voltage characteristics of electricity supplied by public electricity networks.

[8] Pivniak H. Problems of development of innovative power supply systems of Ukraine in the context of European integration / H. Pivniak, O. Aziukovskyi, Yu. Papaika, I. Lutsenko, N. Neuberger // *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. - 2022 (5), 89-103. https://doi.org/10.33271/nvngu/2022-5/089.

[9] Shcherba M. Mathematical Modeling of Electric Current Distribution in Water Trees Branches in XLPE Power Cables Insulation / M. Shcherba, A. Shcherba, Y. Peretyatko // *Proc. IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems. ESS* 2020. Kyiv, Ukraine, May 12-14, 2020. p. 353–356. https://doi.org/10.1109/ESS50319.2020.9160293.

[10] ДСТУ EN 50160:2014 (2014). Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності, Київ, Мінекономрозвитку України, 27.

[11] Сокол Є.І. Несинусоїдальні і несиметричні режими в електроенергетичних системах / Є.І. Сокол, Г.А. Сендерович, О.Г. Гриб та ін. – Харків:ФОП Бровін О.В., 2021. -202 с.

[12] Smolenski R. Conducted electromagnetic interference (EMI) in Smart Grids / R. Smolenski. London, Springer, 2017, 198 pp.

[13] Babak S. Analysis of UAVs and Their Technical Parameters for Overhead Power Lines Monitoring / S. Babak, A. Zaporozhets, O. Gryb, I. Karpaliuk // *Studies in Systems, Decision and Control*. – 2023. 454, p. 181–193 https://doi.org/10.1007/978-3-031-22464-5_10.

[14] Sokol Y. Theoretical Basis of Determination of Corona Discharge Coordinates by Acoustic Radiation / Y. Sokol, V. Babak, A. Zaporozhets, O. Gryb, I. Karpaliuk, R. Demianenko // *Studies in Systems, Decision and Control*, – 2024. 509, p. 137–153. https://doi.org/10.1007/978-3-031-44025-0_7.

[15] El Hajji. The electromagnetic interferance caused by high voltage power lines along the electrical railway equipment / El Hajji, H. Mahmoudi and M. Labbadi // *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 10, no. 5. - 2020, p. 4581-4891. https://doi.org/10.11591/ijece.v10i5.

[16] Dusza D. Reactive power measurements based on its geometrical interpretation / D. Dusza, G. Kosobudzki // *2018 14th Selected Issues of Electrical Engineering and Electronics, WZEE.* - 2018, 8749118. https://doi.org/10.1109/WZEE.2018.8749118.

Стаття надійшла до редакції 25.07.2024 р.

DETERMINATION OF VOLTAGE QUALITY INDICATORS IN INDUSTRIAL POWER SUPPLY SYSTEMS WITH LIMITED ENERGY SYSTEM CAPACITY

PAPAIKA YU.A. Doctor of science, Professor, Head of the electrical power engineering department of the

Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine, e-mail: papaika.yu.a@nmu.one, ORCID: 0000-0001-6953-1705;

LYSENKO O.G. Ph.D, Associate professor, Associate professor of the electrical drive department of the Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine, e-mail: lysenko.o.g@nmu.one, ORCID: 0000-0002-7041-671X;

MALYSHKO M.M. Postgraduate student of the electrical power engineering department of the Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine, e-mail: malyshko.m.m@nmu.one, ORCID: 0009-0000-0413-053X;

UDOVYK O.V. Postgraduate student of the electrical power engineering department of the Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine, e-mail: udovyk.o.v@nmu.one, ORCID: 0009-0002-1000-7815.

Purpose. *To justify the dependence of the determination of indicators of electromagnetic compatibility of power supply systems of industrial enterprises in the presence of powerful nonlinear and asymmetric loads in conditions of limited power system capacity.*

Methodology. *Methods of theoretical electrical engineering for the construction of replacement schemes of three-phase electrical networks, Fourier series for the analysis of higher harmonics of current and voltage, the method of symmetrical components for the analysis of asymmetry.*

Findings. *Виділено основні показники якості напруги, значення яких залежить від параметрів живлячої електроенергетичної системи (потужності короткого замикання). Наведено аналітичні залежності розрахунку показників несиметрії та несинусоїдальності при обмеженні потужності КЗ. Проаналізовано засоби корекції показників якості в умовах електричних мереж з розподіленою генерацією.*

Originality. *The scientific novelty consists in establishing the patterns of changes in the mode parameters of the industrial load from the parameters of the power system, which is expressed in interrelated changes in voltage quality indicators. At the same time, in the analytical models, the option of obtaining variable changes in the parameters of the power system both due to the generating capacities and through the parameters of the substitution schemes of electrical networks of different voltage classes has been added.*

Practical value. *For engineering calculations, simplified algorithms for determining voltage quality indicators (deviation, oscillation, asymmetry and non-sinusoidal voltage) are proposed, taking into account the real configuration of the electrical network and the actual power of the power system. This makes it possible to evaluate the efficiency of transmission and conversion of electricity under an arbitrary configuration of the post-emergency power supply scheme.*

Keywords: voltage quality; higher harmonics; voltage asymmetry, voltage fluctuations.

REFERENCES

[1] Papaika Y. Mathematical modeling of power supply reliability at low voltage quality / Yurii Papaika, Oleksandra Lysenko, Yevgenij Koshelenko, Illa Olishevskyi // *Nauk. Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, - 2021 (2), p.97–103. https://doi.org/10.33271/nvngu/2021-2/097.

[2] Pivnyak G. Interharmonics in power supply systems / Gennadiy Pivnyak, Igor Zhezhelenko, Yurii Papaika, Oleksandra Lysenko // *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu.* - 2017 (6), pp. 109-114. ISSN 20712227.

[3] Janik P. Influence of increasing numbers of RE-inverters on the power quality in the distribution grids: A PQ case study of a representative wind turbine and photovoltaic system / Przemyslaw Janik, Grzegorz Kosobudzki, Harald Schwarz // *Higher Education Press and Springer-Verlag*. -2017. Berlin Heidelberg, https://doi.org/10.1007/s11708-017-0469-3.

[4] Pivnyak G. ASSESSMENT OF POWER SUPPLY ENERGY EFFICIENCY BY VOLTAGE QUALITY CRITERION / Gennadiy Pivnyak, Oleksandr Azukovskiy, Yurii Papaika, Careres Cabana Edgar, Olczak Pawel, Artur Dyczko // Rynek Energii. - 2021 № 4(155). p. 75-84. ISSN 14255960.

[5] IEEE 1547:2003-Standard for Interconecting Distributed Resources with Electric Power System.

[6] Standard IEC61000-2-4–2002. Electromagnetic compatibility (EMC)–Part 2-4: environment-compatibility levels in industrial plants for low-frequency conducted disturbances.

[7] CENELEC EN 50160–2010. Voltage characteristics of electricity supplied by public electricity networks.

[8] Pivniak H. Problems of development of innovative power supply systems of Ukraine in the context of European integration / H. Pivniak, O. Aziukovskyi, Yu. Papaika, I. Lutsenko, N. Neuberger // *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. - 2022 (5), 89-103. https://doi.org/10.33271/nvngu/2022-5/089.

[9] Shcherba M. Mathematical Modeling of Electric Current Distribution in Water Trees Branches in XLPE Power Cables Insulation / M. Shcherba, A. Shcherba, Y. Peretyatko // *Proc. IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems. ESS* 2020. Kyiv,

Ukraine, May 12-14, 2020. p. 353–356. https://doi.org/10.1109/ESS50319.2020.9160293.

[10] DSTU EN 50160:2023 (2023). Haracterystyky naprugy elektropostaczannya v mererzach zagalnogo pryznaczennya, Kyiv, Minekonomrozvytku Ukrainy. (Characteristics of power supply voltage in general-purpose electrical networks, Kyiv, Ministry of Economic Development of Ukraine), 27.

[11] Sokol E.I. Nesynusoidalni ta nesymetriczni rerzymy v electroenergetycznych systemach (Non-sinusoidal and non-symmetric modes in electric power systems) / E.I Sokol, G.A. Senderovicz, O.G. Gryb and others. – Kharkiv: FOP Brovin O.V., 2021. -202 p.

[12] Smolenski R. Conducted electromagnetic interference (EMI) in Smart Grids / R. Smolenski. London, Springer, 2017, 198 pp.

[13] Babak S. Analysis of UAVs and Their Technical Parameters for Overhead Power Lines Monitoring / S. Babak, A. Zaporozhets, O. Gryb, I. Karpaliuk // *Studies in Systems, Decision and Control*. – 2023. 454, p. 181–193 https://doi.org/10.1007/978-3-031-22464-5_10.

[14] Sokol Y. Theoretical Basis of Determination of Corona Discharge Coordinates by Acoustic Radiation / Y. Sokol, V. Babak, A. Zaporozhets, O. Gryb, I. Karpaliuk, R. Demianenko // *Studies in Systems, Decision and Control*, – 2024. 509, p. 137–153. https://doi.org/10.1007/978-3-031-44025-0_7.

[15] El Hajji. The electromagnetic interferance caused by high voltage power lines along the electrical railway equipment / El Hajji, H. Mahmoudi and M. Labbadi // *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 10, no. 5. - 2020, p. 4581-4891. https://doi.org/10.11591/ijece.v10i5.

[16] Dusza D. Reactive power measurements based on its geometrical interpretation / D. Dusza, G. Kosobudzki // *2018 14th Selected Issues of Electrical Engineering and Electronics, WZEE.* - 2018, 8749118. https://doi.org/10.1109/WZEE.2018.8749118.