

© Ю.А. Папаїка^{1,2}, О.В. Удовик¹

¹ Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

² Дніпропетровський науково-дослідний інститут судових експертиз, Дніпро, Україна

ОЦІНКА ПОКАЗНИКІВ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СУМІСНОСТІ ПРОМИСЛОВИХ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПРИ ОБМЕЖЕННІ ПОТУЖНОСТІ ЕНЕРГОСИСТЕМИ

© Yu. Papaika^{1,2}, O. Udovik¹

¹ Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

² Dnipropetrovsk Research Institute of Judicial Examination, Dnipro, Ukraine

ASSESSMENT OF ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY INDICATORS OF INDUSTRIAL POWER SUPPLY SYSTEMS WITH POWER SYSTEM CAPACITY LIMITATIONS

Мета. Дослідити показники несинусоїдальності та несиметрії напруги у цеховій системі електропостачання промислових підприємств за умови технологічних обмежень потужності енергосистеми.

Методика. Моделювання показників несинусоїдальності виконано методами спектрального аналізу та перетворення Фур'є. Несиметричні режими змодельовано з припущенням використання споживачів-регуляторів якості напруги (СРН) при використанні положень методу симетричних складових. У якості рівня припущень прийнято, що електро-технологічні установки комплектуються пристроями енергоелектроніки для Smart-керування режимами енергоспоживання.

Результати. Проаналізовано шкідливий вплив вищих гармонік та струмів зворотної послідовності на енергоефективність промислових систем електропостачання. Доведено, що зниження потужності короткого замикання у точках розподілу балансової приналежності суттєво погіршує електромагнітну сумісність цехових розподільчих мереж з нелінійними та несиметричними навантаженнями. Запропоновано використання трифазних електротехнологічних установок у якості регуляторів показників якості напруги.

Наукова новизна. Встановлені залежності показників несиметрії напруги від параметрів системи електропостачання підприємства. Це дозволяє обґрунтувати концепцію використання активних інтелектуальних СРН при островних чи нештатних режимах роботи централізованої енергосистеми.

Практична значимість. Отримані дані розрахунку значень коефіцієнтів несиметрії напруги при різноманітних комбінаціях симетричного та несиметричного навантаження. Моделі включають параметри типових силових трансформаторів та можливості зміни потужності КЗ у широких діапазонах. Подібний метод нормалізації показників якості напруги має важливе значення за роботи промислових систем електрозабезпечення у автономних режимах з генерацією від відновлюваних джерел енергії та/або генераторів.

Ключові слова: електромагнітна сумісність, вищі гармоніки, інтергармоніки, несиметрія, споживач-регулятор якості напруги, потужність короткого замикання.

Вступ. Електромагнітна сумісність енергетичних об'єктів різних видів діяльності чи процесів розглядає умови «комфортного» існування кожного за

відсутності неприпустимого впливу інші суб'єкти. У системах електропостачання промислових підприємств електрообладнання, прилади, апарати та інші пристрої знаходяться у єдиному для них електромагнітному середовищі, причому будь-який із пристроїв є джерелом (генератором) електромагнітних завад (ЕМЗ). Одночасно на нього впливають завади, що генеруються іншими джерелами [1–2].

У загальному випадку електромагнітна завада характеризується як вплив, що спотворює основний сигнал і небажано впливає (або може впливати) на нього. Основний сигнал – це корисний сигнал, який визначається принципом дії електроприймача, його системи управління та захисту.

Електрична мережа та система електропостачання підприємства є електромагнітним середовищем, в якому відбувається генерування, трансформація, передача та вплив електромагнітних перешкод на усі електроприймачі. Тому виникає завдання їхньої електромагнітної сумісності, під якою розуміється здатність електрообладнання, апаратів і приладів нормально функціонувати в електромагнітному середовищі, не створюючи неприпустимих завад для іншого обладнання, що функціонує в тому ж середовищі [3].

Кондуктивні електромагнітні завади, які поширюються в мережах трифазного змінного струму визначаються викривленням синусоїдальної форми кривих напруги та струму, чинного значення напруги (відхилення, коливання та несиметрія напруги), провалами та імпульсами напруги. Значення завад прийнято називати показниками електромагнітної сумісності чи показниками якості електроенергії [4]. Якість електроенергії – це сукупність її властивостей, що визначають вплив на електрообладнання, прилади та апарати. Показники якості електроенергії чисельно характеризують рівні електромагнітних завад за частотою, значенням напруги, форми кривої напруги, симетрію та імпульси напруги. Це визначення якості електроенергії як товару відповідає поняттю якості продукції як сукупності властивостей, що зумовлюють придатність продукції для задоволення певних потреб відповідно до показників якості електроенергії, встановлених нормативними документами.

Енергосистема, призначена для виробництва, передачі, розподілу електроенергії та перетворення її на енергію інших видів, містить більше джерел електромагнітних перешкод: лінії електропередачі, розподільчі пристрої з комутаційними апаратами, шинопроводи, кабелі, електроприймачі, технічні засоби автоматизації, управління, захисту та зв'язку тощо. З початком повномасштабного вторгнення росії режими роботи централізованої енергосистеми України визначаються технологічними обмеженнями генеруючих потужностей та магістральних ліній електропередач напругою 110–750 кВ, що пов'язано з ураженнями енергетичних об'єктів військовими засобами. Електромагнітні процеси при цьому визначаються наднизькими значеннями потужності короткого замикання та збільшенням зовнішнього опору енергосистеми, що обмежує запаси статичної та динамічної стійкості та посилює проблему електромагнітної сумісності.

У разі перевищення нормованих рівнів електромагнітні завади можуть призвести до порушення стійкості вузлів навантаження та технічних засобів

(зокрема, пристроїв мікропроцесорного релейного захисту) на електростанціях і підстанціях, похибок у роботі інтелектуальних лічильників, роботі пристроїв FACTS. Тому дослідження показників електромагнітної сумісності у промислових системах електропостачання при різноманітних сценаріях технологічних обмежень енергосистеми з отриманням принципово нових залежностей у функції потужності короткого замикання на базових рівнях розподілу електроенергії є актуальною науковою задачею.

Основна частина. У цехах сучасних промислових підприємств більше половини електроенергії використовують у перетвореному вигляді (на металургійних заводах – понад 90 %). Широко застосовувані *вентильні перетворювачі (ВП)*, різного роду перетворювачі частоти, побутові прилади, що працюють як у статичних, так і перехідних режимах, є потужними генераторами ЕМЗ. Нелінійні навантаження, які створюються дуговими сталеплавильними печами (ДСП), феросплавними та індукційними печами, електрозварювальними установками, сонячними та вітровими електростанціями, силовими трансформаторами та електродвигунами також генерують значні ЕМЗ. У табл. 1 зазначені джерела ЕМЗ на підприємствах різних галузей промисловості [4].

Таблиця 1

Промислові джерела ЕМЗ

Споживач	Завада (ЕМЗ)
Виробництво хімічного волокна, целюлозно-паперове виробництво	Відхилення напруги
Машинобудівні підприємства з потужними зварювальними установками	Відхилення, коливання, несиметрія напруги
Підприємства чорної металургії з дуговими сталеплавильними печами	Відхилення, коливання, несинусоїдальність та несиметрія напруги
Підприємства кольорової металургії (електроліз)	Відхилення, коливання, несинусоїдальність напруги
Підприємства з потужними однофазними електроприймачами	Відхилення, та несиметрія напруги
Тягові підстанції електрифікованого залізничного транспорту	Відхилення, несинусоїдальність та несиметрія напруги

Вентильні перетворювачі є потужними концентрованими джерелами гармонійних завад – вищих гармонік (ВГ) [5–6]. У 6-пульсних мостових схемах основними є 5, 7, 11, 13-та гармоніки, так звані канонічні, рівні яких обернено пропорційні номеру, тобто: $1/5$, $1/7$, $1/11$, $1/13$. При використанні 12-пульсних схем

теоретично немає 5 і 7 гармонік, а переважають 11 та 13-та. Такі перетворювачі застосовуються у схемах головних приводів прокатних станів, електролізному виробництві та ін. У практиці розрахунку ВГ вентильних перетворювачів різних типів випрямляч враховується як джерело канонічних ВГ струму, рівень яких обернено пропорційний номеру гармонік. Це відповідає випадку, коли індуктивність кола постійного струму $L_d = \infty$, а індуктивність контуру комутації $L_k = 0$. Криві лінійних струмів мають прямокутно-ступеневу форму тривалістю 120 електричних градусів. У реальних умовах, залежно від співвідношення L_d і L_k , ці криві деформовані внаслідок наявності пульсуючої складової кола постійного струму.

У силовій енергоелектроніці широке застосування знаходять перетворювачі частоти без проміжної ланки постійного струму – *безпосередні частоти перетворювачі (БПЧ)*. В даний час можна виділити такі основні сфери застосування різних типів БПЧ:

- регульовані електроприводи змінного струму;
- джерела енергії з постійною частотою на виході при змінній вхідній частоті;
- керовані джерела реактивної потужності для систем FACTS;
- взаємні зв'язки систем змінного струму з можливістю транзиту та реверсу енергії.

Архітектура циклоконвекторів з природною комутацією вентилів (некеровані БПЧ) будуються на основі реверсивних випрямлячів змінного струму, що є зустрічно-паралельним з'єднанням груп керованих вентилів. Почергове (циклічне) включення груп генерує у навантаженні змінний струм необхідної частоти.

Перетворювач зі ланкою постійного струму складається з двох вентильних систем - випрямляча та інвертора (як правило, інвертора напруги). Ланка постійного струму включає індуктивність L_d і ємність C . Випрямляч і інвертор можуть бути керованими або некерованими, відповідні системи управління можуть бути незалежними або пов'язаними між собою. Потужні перетворювачі комплектуються реактором для згладжування L_d , який призначено для зменшення пульсацій струму i_d . У перетворювачах малої потужності зв'язок випрямляча і інвертора здійснюється тільки за допомогою конденсатора C . В усіх випадках перетворювачі даного типу приєднуються до мережі безпосередньо, без спеціального трансформатора. Це враховується при побудові схем заміщення на частотах вищих гармонік. При аналізі електромагнітної сумісності перетворювача і мережі живлення використовується метод накладання, тобто робота випрямляча і інвертора розглядається незалежно. Первинний мережевий струм перетворювача – це сума ВГ струму випрямляча i_{en} та інтергармонік (ІГ) інвертора i_{in} , перерахованих на сторону випрямляча за допомогою комутаційної функції K_I [4–9]:

$$i_{cn} = i_{en} + K_I \cdot i_{in}. \quad (1)$$

У кривій мережевого струму містяться гармоніки з частотами

$$f_{\text{ex}} = (kp1 \pm 1) f_1 \cdot p2nf_2, \quad k = 0, 1, 2, \dots, \quad n = 0, 1, 2, \dots$$

Перший доданок визначає частоти канонічних ВГ, другий – ІГ, не кратних вхідній частоті f_1 .

Дугова сталеплавильна піч є значним джерелом ЕМЗ, а саме ВГ та ІГ, коливань та несиметрії напруги. Найбільшою мірою генерування ЕМЗ проявляється в період розплавлення металу. З аналізу лінійного спектру випливає, що в діапазоні 0-2,5 Гц з'являються ІГ, рівні яких можуть досягати 10% струму основної частоти. В цілому спектр процесу еволюції струмів ДСП в період розплавлення є змішаним та складається з дискретної та безперервної складових. Енергія ІГ для печей ДСП-100 та ДСП-200 становить близько 20 % усієї енергії змішаного спектру. Несиметрія напруги на шини ДСП, залежно від напруги живлення, досягає 5–6% для мереж 6-10-35 кВ і 3% - для мереж 110 кВ. Для тих же випадків значення дози флікеру напруги знаходиться у межах 1,5–10.

Результати експериментальних досліджень рівнів ВГ та ІГ в залежності від вихідної частоти перетворювача та моменту на валу приводного двигуна показали обернено пропорційну залежність амплітуд ІГ від частоти f_2 (рис. 1) [1, 10].

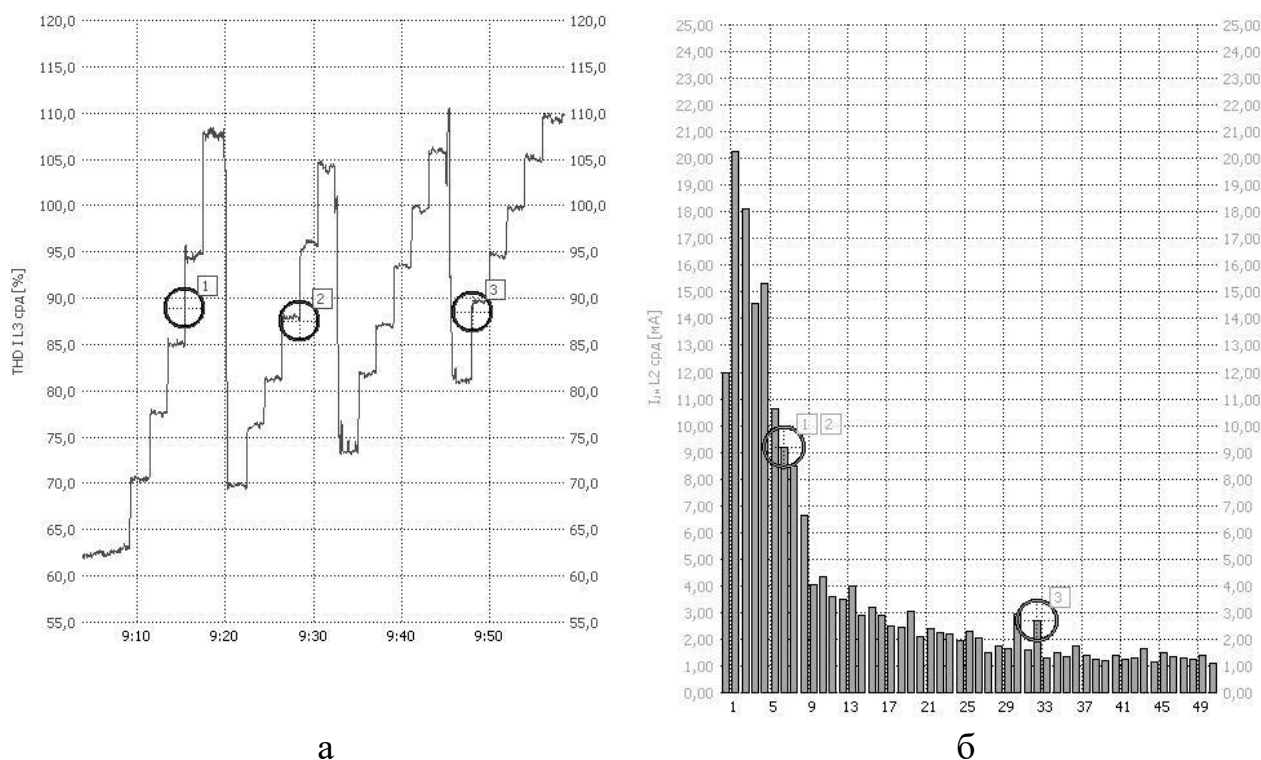


Рис. 1. Значення THD_I перетворювача частоти з ланкою постійного струму (а) та інтергармонік (б) при вихідній частоті $f_2 = 50 \dots 20$ Гц

Сучасні електротехнологічні установки (електропічне обладнання) мають технічні засоби регулювання потужності окремо за трьома фазами, що може бути використане при симетруванні трифазної системи напруг [7]. Для якісної оцінки симетруючого ефекту неповнофазних режимів живлення необхідно визначити межі зміни показників несиметрії за різних комбінацій мережевих параметрів та навантажувальних характеристик. Запропонований підхід має перспективи впровадження для усунення несиметрії та параметричного синтезу оптимальних

співвідношень загальноцехового та електропічного навантажень. У режимах обмеженої потужності енергосистеми використання спеціальних симетруючих режимів активних споживачів-регуляторів якості напруги (СРН) є дієвим способом забезпечення електромагнітної сумісності.

Для моделювання регулюючого ефекту несиметричного навантаження виконано дослідження електричних режимів типового електротехнічного обладнання промислових підприємств. Навантаження на шинах низької напруги цехового трансформатора має симетричний характер, а джерелом несиметрії є керований активний споживач (трифазна електропічна установка з тиристорним регулюванням потужності). Такий підхід дозволяє оцінити частку несиметрії, яка відповідає неповнофазним режимам роботи установки.

Таким чином, використання спеціальних режимів роботи СРН, визначених як енергоефективних, дозволить сформувати наступні режими роботи цехових електричних мереж [1, 9]:

1. *Поява несиметрії напруг зворотної та нульової послідовностей.* Такий режим може мати місце у разі переведення СРН в несиметричний режим роботи при абсолютно симетричному розподілі залишкового цехового навантаження по фазах. Доцільність застосування такого режиму повинна оцінюватися шляхом порівняння загальних витрат в електромережі з величиною збитків від виникнення несиметрії напруг та зменшення несинусоїдальності.

2. *Зменшення коефіцієнтів зворотної та нульової послідовності напруги.* Даний режим реалізується при правильному визначенні найбільш завантаженої фази мережі та розподілі навантаження СРН на фази, що мають менше навантаження (при двофазному режимі живлення СРН) або перемиканні всього резерву регулюючої потужності на фазу з найменшим навантаженням (при однофазному режимі живлення СРН).

Для оцінки симетруючих властивостей СРН необхідно сформувати нові залежності, коефіцієнтів несиметрії K_{U2} і K_{U0} від параметрів електроенергетичної системи. Ефект симетрування оцінюється при припущенні, що несиметрія обумовлюється тільки СРН, а решта навантаження має симетричний характер.

При аналізі даних залежностей особлива увага приділена потужності короткого замикання мережі, а також співвідношенням потужність СРН-потужність цехового трансформатора та потужність СРН-потужність симетричного навантаження. Коригування несиметричних режимів здійснюється за допомогою комплексних опорів навантаження.

Схемні обмеження на підключення коригувальних елементів СРН представлені у вигляді двофазної та однофазної схем живлення (рис. 2).

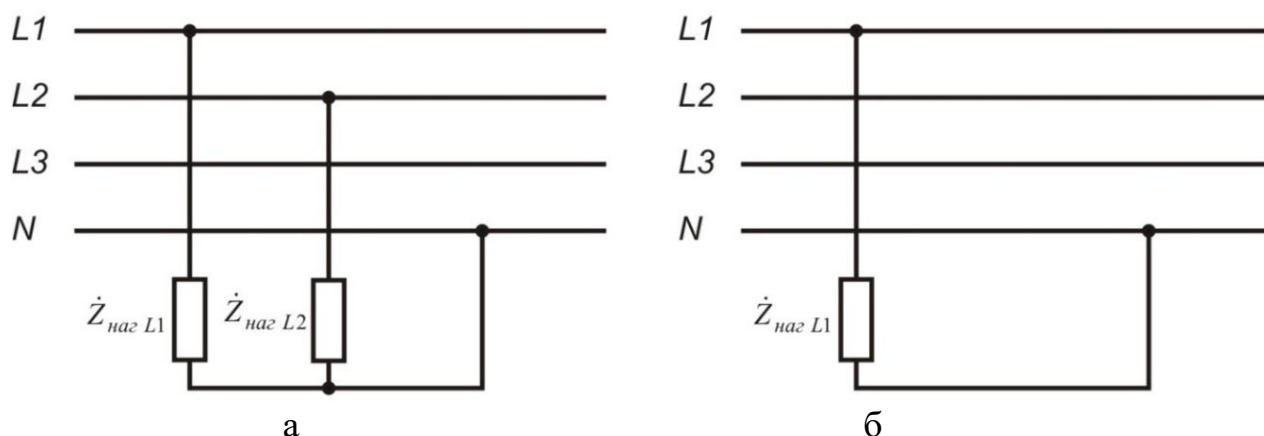


Рис. 2. Схеми пристроїв, що коригують поперечну структуру СРН при двофазному (а) та однофазному (б) режимах її роботи

За допомогою математичної моделі, яка базується на методі симетричних складових, отримано ряд залежностей коефіцієнтів несиметрії зворотної та нульової послідовності від потужності СРН $K_{U2} = f(S_{\text{СРН}}^*)$, $K_{U0} = f(S_{\text{СРН}}^*)$, приведеної до симетричного трифазного навантаження цехового трансформатора (рис. 3–4).

При моделюванні прийнято стандартний ряд потужностей силових цехових трансформаторів, які найчастіше застосовуються у комплектних трансформаторних підстанціях: 400, 630, 1000, 1600 кВА.

Зазвичай коефіцієнти несиметрії мають граничні (максимальні) значення за будь-яких відносин потужностей. Тому в розрахунках враховуються максимально можливі значення потужностей у неповнофазних режимах. У реальних режимах роботи ця умова не завжди виконується, так як потужність регульованого навантаження може знижуватися. При цьому будуть знижуватися і значення коефіцієнтів несиметрії. Однак отримані залежності впливу параметрів енергетичної системи з можливістю оцінки граничних коефіцієнтів несиметрії і граничних регульовальних характеристик мають наукову новизну та практичну цінність.

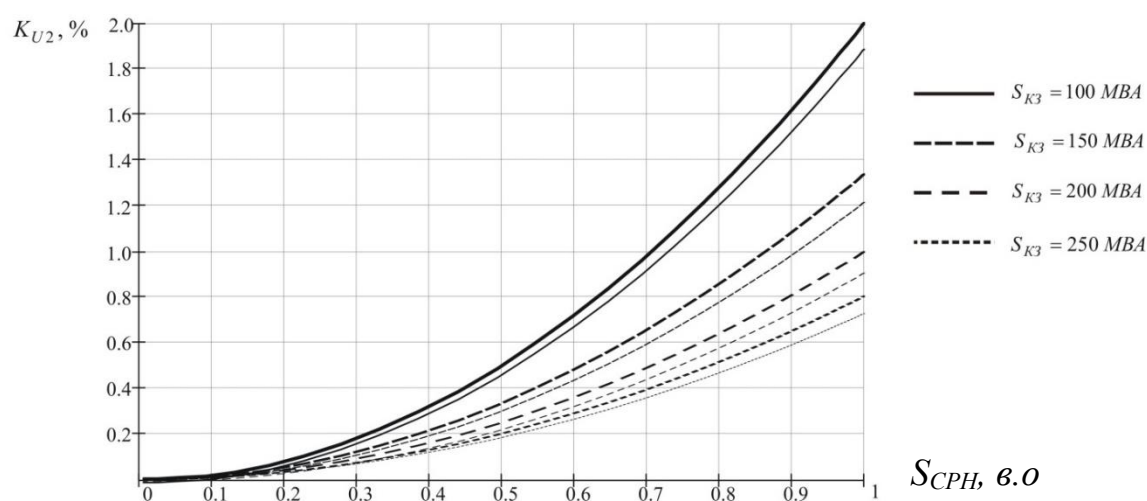


Рис. 3. Залежність коефіцієнта несиметрії напруги зворотної послідовності від несиметричного навантаження СРН при $S_{\text{нм}} = 400$ кВА

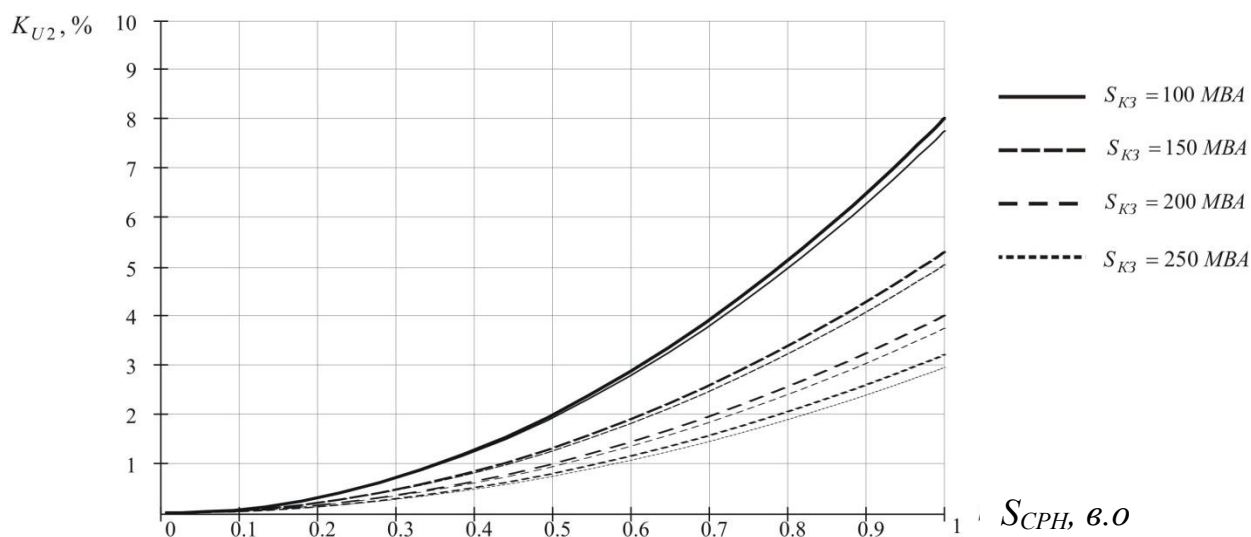


Рис. 4. Залежність коефіцієнта несиметрії напруги зворотної послідовності від несиметричного навантаження СРН при $S_{нт} = 1600$ кВА

Залежності коефіцієнтів нульової послідовності аналогічні розглянутим. Для усунення несиметрії нульової послідовності є більш ефективні способи (наприклад, зниження опору нульової послідовності цехових трансформаторів шляхом зміни схеми з'єднання обмоток). Значення коефіцієнта несиметрії нульової послідовності найбільш ефективно можна знизити схемними рішеннями, а не перерозподілом навантажень по фазах.

З отриманих залежностей випливає, що регулюючий ефект від застосування неповнофазних режимів живлення СРН оцінюється мережевими параметрами (потужність КЗ) та співвідношенням несиметричного навантаження до трифазної симетричної. Слід зазначити, що при моделюванні охоплено практично весь можливий діапазон зміни зазначених параметрів. Максимальні значення коефіцієнтів несиметрії реалізуються при співвідношенні параметрів $\frac{S_{СРН}^*}{S_{сим}^{(3)}} = 1$, наведених у табл. 2, що справедливо при рівності потужностей регульованого навантаження СРН та трифазного симетричного. При цьому більші коефіцієнти несиметрії спостерігаються при двофазному режимі роботи СРН, порівняно з однофазним.

Таблица 2

Граничні значення коефіцієнтів несиметрії напруги зворотної послідовності в неповнофазних режимах роботи СРН

$S_{КЗ}$, МВ·А	K_{U2} , %			
	$(0 \dots 0,25)S_{сим}^{(3)}$	$(0,25 \dots 0,5)S_{сим}^{(3)}$	$(0,5 \dots 0,75)S_{сим}^{(3)}$	$(0,75 \dots 1,0)S_{сим}^{(3)}$
100	2	3,15	5	8
150	1,33	2,1	3,33	5,33
200	1	1,58	2,5	4
250	0,8	1,26	2	3,2

За наявності в системах цехового електропостачання трансформаторів з номінальними потужностями із зазначеного вище ряду, коефіцієнти несиметрії з граничними значеннями, не будуть реалізовані через неприпустимо велике значення потужності СРН. Тому з практичної точки зору найбільший інтерес має ділянка характеристики $\frac{S_{\text{СРН}}^*}{S_{\text{сим}}^{(3)}} = (0 \dots 0,5)$.

Висновки. Для якісної оцінки симетруючого ефекту спеціальних режимів СРН розроблено математичну модель визначення показників несиметрії напруги. Відмінною особливістю даної моделі є облік відношення регульованого навантаження до симетричного трифазного при розрахунку несиметрії. При аналізі можливих несиметричних режимів на запропонованій моделі визначені відповідні співвідношення між потужністю СРН і потужністю навантаження трансформатора, при яких коефіцієнти несиметрії напруги не перевищують допустимого ДСТУ рівня, а також співвідношення навантажень, при яких симетрування необхідне у випадку обмеження потужності енергосистеми. Моделюванням несиметрії при заданих обмеженнях доведено, що регульовальні залежності несиметричних режимів отримані для граничних (максимальних) значень коефіцієнтів несиметрії, що обґрунтовано використанням максимальних потужностей при переведенні СРН у неповнофазні режими. При оптимальному керуванні режимами роботи СРН у реальному часі досягаються мінімальні значення K_{U2} .

Перелік посилань

1. Півняк, Г.Г., Жежеленко, І.В., & Папаїка, Ю.А. (2018). *Енергетична ефективність систем електропостачання*. Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка».
2. Pivnyak, G.G., Zhezhelenko, I.V., Papaika, Yu.A., & Lysenko, O.H. (2017). Interharmonics in power supply systems. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (6), 109–114.
3. Pivnyak, G., Zhezhelenko, I., & Papaika, Yu. (2013). Normalization of voltage quality as the way to ensure energy saving in power supply systems. *Energy Efficiency Improvement of Geotechnical Systems – Proceedings of the International Forum on Energy Efficiency*, 11–18, <https://doi.org/10.1201/b16355-3>.
4. Shydlovskii, A.K., & Zharkin, A.F. (2005). *Higher harmonics in low-voltage electrical networks*. Naukova dumka.
5. Papaika, Yu.A., Lysenko, O.H., Koshelenko, Ye.V., & Olishevskiy, I.H. (2021). Mathematical modeling of power supply reliability at low voltage quality. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (2), 97–103. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2021-2/097>.
6. Zharkin, A.F., Palachov, S.O., Pazieiev, A.G., & Malakhatka, D.O. (2024). Assessment of the impact of bidirectional semiconductor converter on the quality indicators of electric supply in the Microgrid. *Технічна електродинаміка*, (4), 73–79. <https://doi.org/10.15407/techned2024.04.073>.
7. Smolenski, R. (2017). *Conducted electromagnetic interference (EMI) in Smart Grids*. Springer.
8. Abbas A. K., Hamad S., and Hamad N. A. (2021). Single line to ground fault detection and location in medium voltage distribution system network based on neural network, 23 (2), 621–632. <https://doi.org/10.11591/ijeecs.v23.i2.pp621-632>.
9. Pivnyak, G., Azukovskiy, O., Papaika, Yu., Careres Cabana, E., Olczak, P., & Dyczko, A. (2021). Assessment of power supply energy efficiency by voltage quality criterion. *Rynek Energii*, 155(4), 75–84.
10. Pivnyak, G., Aziukovskyi, O., Papaika, Y., Edgar Caseres Cabana, Miedziński, B., Polnik, B., Jamróž, A., & Polyanska, A. (2024). Managing the power supply energy efficiency by means of higher harmonics. *Polityka Energetyczna*, 27(4), 59–80. <https://doi.org/10.33223/epj/191813>.

ABSTRACT

Purpose. To investigate the indicators of non-sinusoidality and voltage asymmetry in the shop power supply system of industrial enterprises under the condition of technological limitations of the power system capacity.

The methods. Modeling of non-sinusoidality indicators was performed using spectral analysis and Fourier transform methods. Asymmetrical modes were modeled assuming the use of voltage quality regulators (VQRs) using the provisions of the symmetrical components method. As an assumption level, it was assumed that electro-technological installations are equipped with power electronics devices for Smart-control of energy consumption modes.

Findings. The harmful effect of higher harmonics and negative sequence currents on the energy efficiency of industrial power supply systems was analyzed. It is proven that the reduction of short-circuit power at the distribution points of balance accessories significantly worsens the electromagnetic compatibility of shop distribution networks with nonlinear and asymmetrical loads. The use of three-phase electrotechnological installations as voltage quality indicator regulators is proposed.

The originality. The dependences of voltage asymmetry indicators on the parameters of the enterprise's power supply system have been established. This allows us to substantiate the concept of using active intelligent SNRs in island or abnormal operating modes of a centralized power system.

Practical implementation. Data for calculating the values of voltage asymmetry coefficients for various combinations of symmetrical and asymmetrical loads have been obtained. The models include the parameters of typical power transformers and the possibility of changing the short-circuit power in wide ranges. A similar method of normalizing voltage quality indicators is important for the operation of industrial power supply systems in autonomous modes with generation from renewable energy sources and/or generators.

Keywords: *electromagnetic compatibility, higher harmonics, interharmonics, asymmetry, consumer-voltage quality regulator, short-circuit power.*