

ПРОБЛЕМИ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СУМІСНОСТІ ПОТУЖНИХ ЕНЕРГООБ'ЄДНАНЬ ПРИ МАСОВОМУ ПРИЄДНАННІ ВІДНОВЛЮВАЛЬНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ

- ПАПАЙКА Ю.А. д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри електроенергетики Національного технічного університету «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна, e-mail: paraika@ukr.net;
- ЛИСЕНКО О.Г. канд. техн. наук, доцент кафедри електроприводу Національного технічного університету «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна, e-mail: lysenkoag@ukr.net;
- БУБЛІКОВ А.В. д-р техн. наук, професор кафедри кіберфізичних та інформаційно-вимірвальних систем Національного технічного університету «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна, e-mail: bublikov.a.v@nmu.one;
- ОЛІШЕВСЬКИЙ І.Г. асистент кафедри безпеки інформації та телекомунікацій Національного технічного університету «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна, e-mail: olishevskiyi@ukr.net;

Мета роботи. Проведення аналізу проблеми енергетичної ефективності та електромагнітної сумісності потужних енергооб'єднань з нелінійними навантаженнями та відновлювальними джерелами електроенергії. Знаходження перспективних шляхів підвищення енергетичної ефективності систем електропостачання.

Методи дослідження. Математичне моделювання електромагнітної сумісності.

Отримані результати. Проведений аналіз проблеми енергетичної ефективності та електромагнітної сумісності потужних енергооб'єднань з нелінійними навантаженнями та відновлювальними джерелами енергії дозволяє сформулювати наступні положення, що обумовлюють задачі цього дослідження. Перспективним шляхом підвищення енергетичної ефективності систем електропостачання є впровадження уточнених методик аналізу та прогнозування електричних режимів промислових підприємств, а також показників якості напруги та надійності електрообладнання.

Наукова новизна. Незважаючи на те, що задачі електромагнітної сумісності були предметом численних вітчизняних і зарубіжних досліджень, слід зазначити, що більшість таких робіт розглядають процеси генерації електромагнітних перешкод в електричну мережу без зав'язків з технологічними графіками роботи електрообладнання.

Практична цінність. Одним з електромагнітних ефектів, який проявляється при роботі перетворювачів частоти, є значні рівні інтергармонік та вищих гармонік, що генеруються в електричну мережу та сприяють зростанню втрат електроенергії та скороченню регламентного строку служби електрообладнання. Проте закономірності, що зв'язують параметри енергосистеми та режими потужних промислових перетворювачів, не вивчалися, і обґрунтування параметрів раціонального енергетично ефективного режиму системи електропостачання при врахуванні індивідуальних графіків вищих гармонік до сьогоднішнього дня не проводилося.

Ключові слова: електромагнітна сумісність; моделювання; якість електричної енергії; відновлювальні джерела енергії; інверторне обладнання.

І. ВСТУП

Надзвичайно важливою проблемою нормального функціонування енергосистеми України є енергетична ефективність передачі та споживання електроенергії, а також зниження кінцевого споживання електроенергії усіма об'єктами народного господарства [1]. Враховуючи надзвичайно швидкий темп зростання кількості перетворювачів різних типів в електричних мережах актуальною стає проблема електромагнітної сумісності та якості електроенергії (ЯЕ). Найбільш повно її ілюструє економічний аспект. За експертними оцінками щорічний економічний збиток для світової енергетики, обумовлений низькою якістю електроенергії, складає близько 500 млрд. дол./рік [2], [3],

за рахунок негативного впливу, головним чином, вищих гармонік, а також несиметрії і коливань напруги. В Україні, за даними 2017 року, щорічний збиток складає 5,1 млрд. дол. [2], [3].

Діапазони змін показників якості електроенергії на підприємствах різних галузей зазвичай великі і в багатьох випадках виходять за межі допустимих за нормами відповідних стандартів, наприклад, ГОСТ 13109-97 [4]. Зростання потужності нелінійних, несиметричних і різкозмінних навантажень, навіть в електричних мережах розвинених країн, випереджає впровадження заходів по мінімізації електромагнітних перешкод, що генеруються в мережу живлення [5]-[7].

Сумарна встановлена потужність керованих ти-

ристорних перетворювачів на листових і сортових прокатних станах досягає 1000 МВт, на алюмінієвих комбінатах - понад 1000 МВт, на гірничих підприємствах одинична потужність високовольтних перетворювачів досягає 5 МВт [8], [9]. Споруджуються електродугові сталеплавильні печі, що мають пічні трансформатори потужністю до 200 МВА [10]. Навіть ці приклади свідчать про масштаби джерел електромагнітних перешкод.

II. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПУБЛІКАЦІЙ

Як відомо, економічний збиток, пов'язаний з низькою якістю електроенергії, має електромагнітну та технологічну складові [11], [12]. Електромагнітна складова визначається збільшенням втрат активної потужності і скороченням терміну служби ізоляції електрообладнання [7]. Технологічна складова збитку виникає під впливом ЯЕ на продуктивність технологічних установок і собівартість продукції, що випускається, а також при частковій або повній зупинці виробництва.

Збільшення втрат електроенергії за рахунок її низької якості може досягати 15-20% [13]. Значення відносних втрат електроенергії в електричних мережах промислово розвинених країн за усередненими даними за 2013-2017 рр. знаходяться в межах 4-7%. Так, в Німеччині - 4%, у Франції-7, в Австрії, Бельгії, Чехії - 5, США -6, Італії, Швейцарії та Японії - 7% [13]. Ці країни мають високе значення внутрішнього валового продукту (ВВП) за паритету купівельної спроможності (ПКС) на душу населення, що перевищує 20 тис.дол.: США - 54,5 тис.дол, Австрія і Німеччина-46,5, Італія - 35,4, Франція - 40,7 тис.дол. Це дозволяє виділити зв'язок між відносними втратами електроенергії та рівнем життя населення в певній країні [13].

Високий рівень втрат в електричних мережах пов'язаний з низьким рівнем компенсації реактивної потужності, фізичним і моральним зносом мережі, недостатнім використанням засобів оптимізації режимів роботи і регулювання напруги і проблемною якістю електричної енергії [13], [25].

Низький рівень якості електричної енергії призводить до зниження енергетичної ефективності електричних мереж за рахунок збільшення втрат активної та реактивної потужностей, технологічних витрат електроенергії на її транспорт, до зниження терміну служби електрообладнання, збільшення капітальних вкладень в електричні мережі, порушення умов нор-

мального функціонування енергетичної системи [14].

Враховуючи, що жодних корекцій та поправок до методик визначення втрат електроенергії при зростанні частки нелінійного навантаження не було введено в нормативні документи, одне з першочергових завдань забезпечення енергетичної ефективності функціонування систем електропостачання є моделювання адекватних значень втрат потужності та енергії в електричних мережах при невизначеності початкових умов та довільних комбінаціях складу навантаження [14].

III. МЕТА РОБОТИ

Проведення аналізу проблеми енергетичної ефективності та електромагнітної сумісності потужних энергооб'єднань з нелінійними навантаженнями та відновлювальними джерелами електроенергії. Знаходження перспективних шляхів підвищення енергетичної ефективності систем електропостачання.

IV. ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ ТА АНАЛІЗ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Електромагнітна сумісність відновлюваних джерел енергії (ВДЕ). У ряді країн обсяги введення ВДЕ вже сьогодні значно перевищують обсяги введення джерел традиційної генерації.

Якщо в 2015 р загальна частка ВДЕ в генерації електроенергії в світі становила лише 5%, то в 2030 році вона становитиме 18,6%, а до 2050 р збільшиться до 48% [16]. Таким чином, зміна загальної частки ВДЕ в генерації електроенергії в 2050 році збільшиться в 8,6 разів. При цьому генерація сонячних електростанцій зросте в 30 разів, при середньорічному темпі зростання 10,2%, а генерація вітряних електростанцій збільшиться в 11 раз при середньорічному темпі зростання 7,1% [16].

Сонячна генерація не створює коливань потужності в енергосистемі, але надлишок її протягом періодів максимальної сонячної активності викликає додаткові складності навіть для нормального режиму роботи енергосистеми. Ця нерегульована та складно прогнозована генерація повинна покриватися класичними джерелами енергії або іншими спеціальними пристроями для забезпечення балансів потужності в енергосистемі. Аналізуючи роботи закордонних вчених [17]-[20], визначено проблему різкозмінного навантаження за реактивною потужністю та коефіцієнтом викривлення синусоїдальності (рис. 1-2).

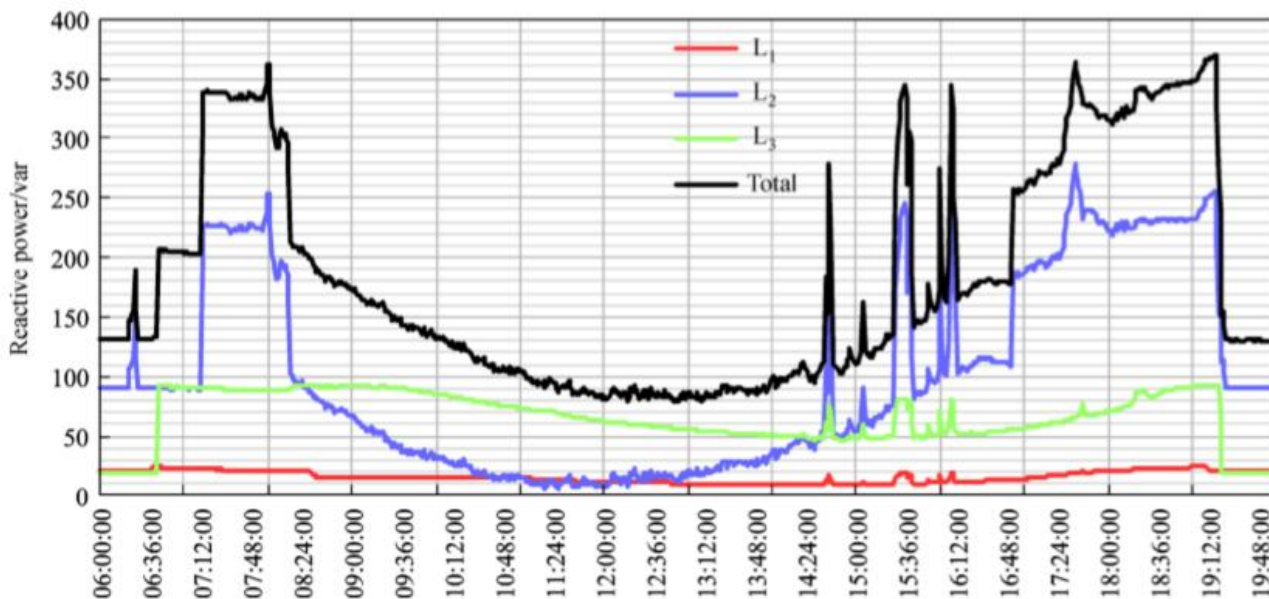


Рисунок 1. Денний графік реактивної потужності сонячної електростанції

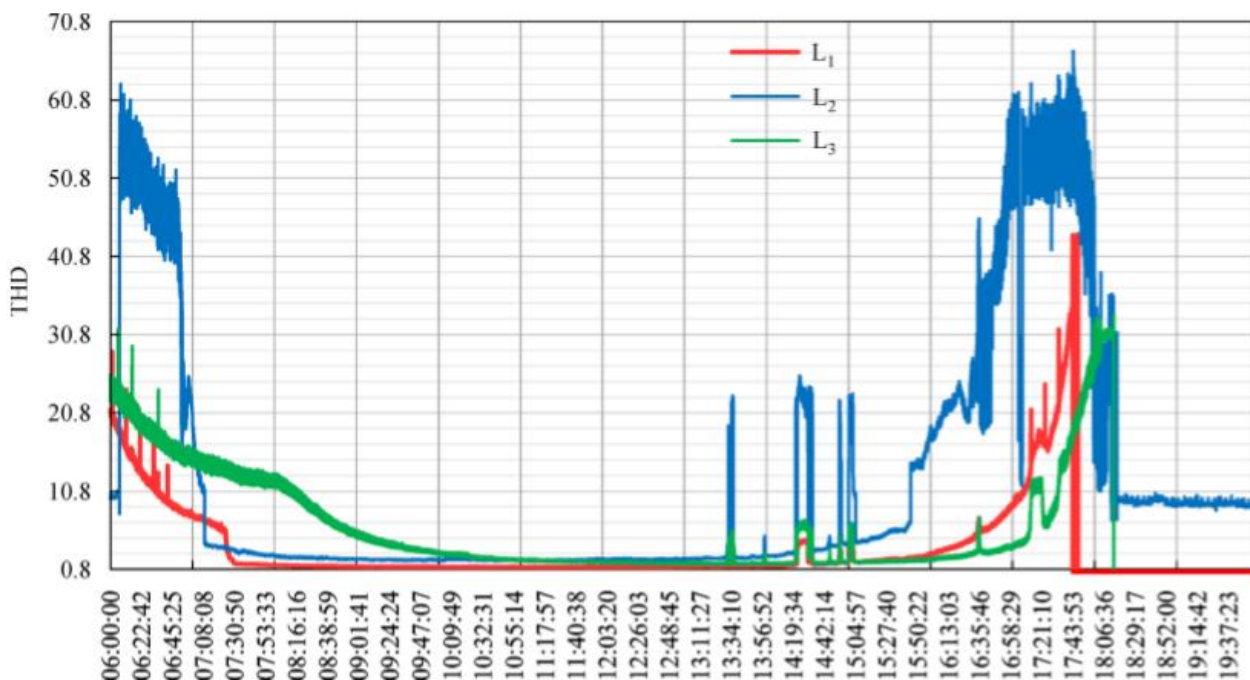


Рисунок 2. Денний графік коефіцієнта викривлення синусоїдальності сонячного інвертора

Більш складну ситуацію створює вітрова генерація. Вітроелектростанції є одним з найбільш використовуваних відновлюваних джерел. Однією з головних проблем використання енергії вітру є нестабільна генерація потужності, що постійно змінюється в залежності від сили вітру. Це призводить до непередбачуваних і нерегульованих змін потужності вітроагрегату і до нестаціонарного характеру генерації електроенергії, що впливає на надійність і ефективність

функціонування енергосистеми і створює значні складності для забезпечення її режиму [20]. Стохастичний характер видачі активної потужності вітроелектростанціями викликає коливання частоти в енергосистемі, зміни їх амплітуди і швидкості. Виникає також проблема впливу вітроелектростанції на ЯЕ в енергосистемі і приєднаних до неї споживачів, що також призводить до появи флікера, коливань та провалів напруги (рис. 3) [20].

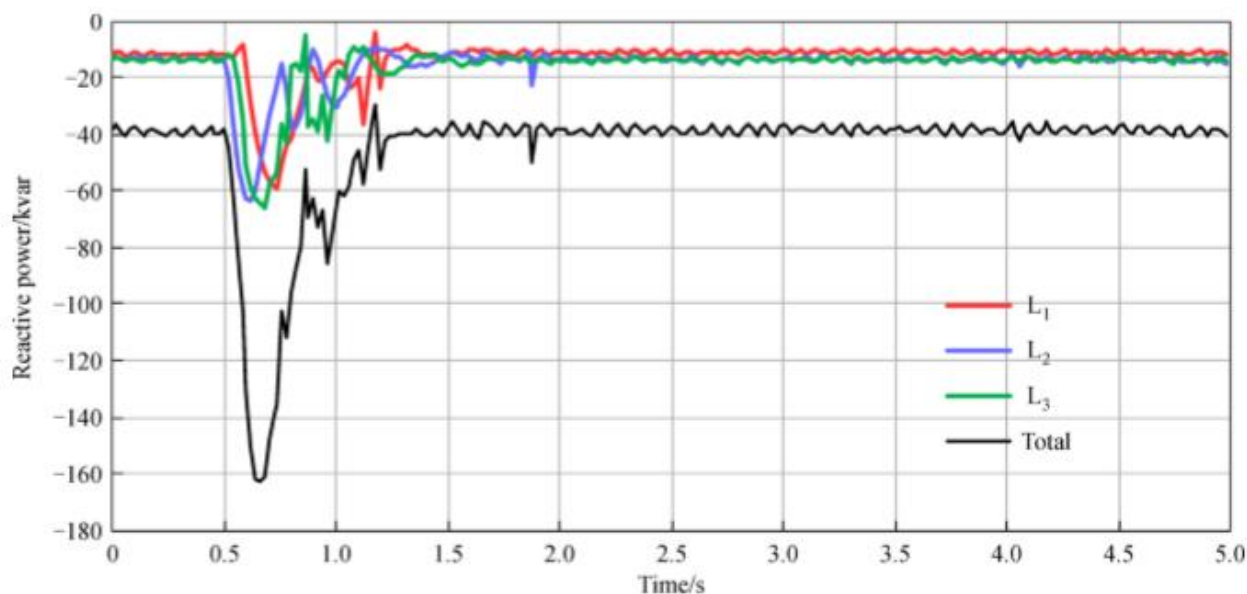


Рисунок 3. Несиметричний по фазам перехідний процес реактивної потужності при роботі вітроагрегату

Крім того розгойдування вітроелектростанцій при зміні швидкості вітру призводить до низькочастотних коливань і створює нові проблеми для стабільності енергосистеми і динамічної стійкості [20].

Зміна складу генерації, пов'язаних з впровадженням ВДЕ призводить до зменшення сталих інерції елементів систем електропостачання, збільшує чутливість параметрів режиму до малих збурень. В результаті енергосистема набуває нових властивостей, в тому числі і негативних, які проявляються, зокрема, в виникненні низькочастотних коливань її режимних параметрів. Експертними оцінками встановлено, що ситуація буде значно погіршуватися при поступовому переходу від централізованого електропостачання та обмеженні потужності енергосистеми [20].

Впровадження вітроелектростанцій призводить до додаткового (в порівнянні з традиційними джерелами електроенергії) зменшення інерційності енергосистеми і, як наслідок, до погіршення показників якості електроенергії (в першу чергу, провалів і флікер напруги).

Ця особливість в найбільшій мірі характерна для потужних промислових підприємств. Як свідчить досвід, раціональний діапазон значень потужності короткого замикання становить: в мережах 6-35 кВ – 150...1500 МВА, в мережах 110-220 кВ – 5000...10000 МВА. При зменшенні потужності короткого замикання у вузлі навантаження виникає необхідність уточнення теоретичних основ координації струмів короткого замикання та налаштування систем захисту [13].

Процес адаптації вітчизняної електроенергетики до стандартів країн Євросоюзу є складним. Важливо, що для успішної адаптації недостатньо виконати тех-

нічне переоснащення розподільчих та магістральних електричних мереж. Необхідні зміни в нормативно-правових документах та методиках забезпечення надійного та якісного електропостачання [21]. Вирішення проблеми якості електроенергії полягає у дослідженні режимів роботи так званих «проблемних» приймачів електричної енергії для подальшої розробки рекомендацій по забезпеченні режиму, сумісного з електричною мережею за певними параметрами. Для підприємств гірничо-видобувного профілю такі дослідження необхідно провести першочергово, враховуючи високі значення встановленої потужності споживачів та їх відповідальність.

Розглядаючи електромагнітну сумісність як показник якості продукції, необхідно на різних етапах її створення дотримуватися цілого ряду рекомендацій і норм, що охоплюють комплекс системних рішень [22].

Таким чином, при дослідженні проблеми економічності та електромагнітної сумісності систем електропостачання гірничих підприємств, визначено комплексне поняття «енергетична ефективність», яке об'єднує вимоги до якості та надійності електропостачання при формуванні спеціальних режимів споживання електроенергії з раціональним перетоком реактивної потужності та врахуванні обмеження потужності енергосистеми [22].

Вплив показників якості напруги на енергетичну ефективність систем електропостачання

Енергетична ефективність процесів передачі та споживання електроенергії оцінюється комплексними показниками, в основі яких покладено принцип мінімізації кінцевого споживання електроенергії. Так, при зниженні якості електричної енергії виникають додаткові втрати електроенергії та порушується нормаль-

на робота технологічного обладнання [22].

Оцінка негативного впливу процесів погіршення якості напруги в системах електропостачання гірничих підприємств має важливе значення для пошуку заходів підвищення енергоефективності та вибору параметрів корегуючих пристроїв [22].

Відхилення напруги

Головна причина відхилень напруги в СЕП гірничих підприємств – зміна навантажень, що викликається перш за все [22]:

- режимом роботи споживачів електроенергії;
- зміною числа підключених споживачів;
- оперативними перемиканнями;
- порушеннями роботи мережі.

Значення відхилення δU_t напруги в даному пункті мережі є функцією багатьох змінних:

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

де P і Q – споживана активна та реактивна потужність в розглянутій мережі;

U_s – напруга мережі живлення;

Z і Y – опір і провідність елементів мережі живлення за різних варіантів електричних схем;

$\sum \delta U^d$ – сума «добавок» (додаткових значень напруги, наприклад, у трансформаторі або трансформаторах мережі живлення).

Несиметрія напруг у СЕП обумовлена наявністю потужних однофазних навантажень (індукційних плавильних і нагрівальних печей, зварювальних агрегатів, печей електрошлакового переплаву), а також трифазних, що тривалий час працюють в несиметричному режимі (наприклад, ДСП). Трифазна система напруг може бути несиметричною при живленні мережі підприємства від тягової підстанції змінного струму [22].

При несиметрії напруг у **трифазних мережах** з'являються додаткові втрати в елементах електромереж, скорочується термін служби електрообладнання, зменшуються економічні показники його роботи [22].

В **електричних машинах змінного струму** виникають магнітні поля, що обертаються з синхронною швидкістю в напрямку обертання ротора і з подвійною синхронною швидкістю – у протилежному. В результаті виникає гальмівний електромагнітний момент, а також додатковий нагрів активних частин машини, головним чином ротора, за рахунок струмів подвійної частоти [23].

В **асинхронних двигунах** (АД) при коефіцієнтах зворотної послідовності напруг, що зустрічаються на практиці ($K_{2U} < 0,05 - 0,06$), зниження обертового моменту АД виявляється дуже незначним [22]. Вплив несиметрії на втрати в електродвигуні більшою мірою

супроводжується скороченням терміну служби ізоляції [23].

При несиметрії напруг мережі в **синхронних двигунах** (СД) поряд з виникненням додаткових втрат, нагріванням статора і ротора можуть виникнути небезпечні вібрації в результаті появи знакозмінних обертаючих моментів і тангенціальних сил [23].

При значній несиметрії вібрація може виявитися небезпечною, особливо при недостатній міцності або наявності дефектів зварних з'єднань. При несиметрії струмів, що не перевищує 30 %, небезпечні перенапруження в елементах конструкцій, як правило, не виникають.

Додаткові втрати потужності в СД при несиметричному навантаженні викликають появу місцевих (локальних) нагрівів обмотки збудження, що призводить до необхідності знижувати струм збудження і тим самим зменшувати значення реактивної потужності (РП), яка видається в мережу. При цьому може виникнути необхідність знизити активне навантаження генератора або момент на валу СД [23].

Коливання напруги, що виникають при роботі шахтних підйомних машин, негативно позначаються на зоровому сприйнятті предметів, деталей, графічних зображень і, в кінцевому рахунку, на продуктивності праці й зорі працівників. Подразником зорового аналізатора є світлова енергія. Процеси, що відбуваються в зоровому аналізаторі біологічної системи, як і всі процеси в природі, мають енергетичний сенс. Процес зорового сприйняття носить енергетичний характер. Рівні коливань напруги досліджувались під час комплексного моніторингу показників якості напруги в системах електропостачання ДТЕК «Павлоградугілля» та було показано, що доза флікера знаходиться в межах, допустимих нормативними документами [22].

При наявності вищих гармонік в СЕП з'являються додаткові втрати в електричних машинах, трансформаторах і мережах [22], ускладнюється компенсація реактивної потужності (КРП) за допомогою БК [23]; скорочується термін служби ізоляції електричних машин і апаратів [75]; погіршується робота пристроїв автоматики, телемеханіки і зв'язку, мають місце й інші негативні наслідки [23].

При роботі асинхронних двигунів в умовах не-синусоїдальної напруги їх коефіцієнт потужності та обертовий момент на валу знижуються [7]. Практично вплив вищих гармонік на коефіцієнт потужності АД можна не враховувати [7]. Аналогічно це стосується моментів, що створюють ВГ струму: вони не перевищують кількох десятків відсотка моменту, що існують при промисловій частоті [7].

Батарей конденсаторів можуть тривало працювати при перевантаженні їх струмами ВГ не більше ніж на 30 %; допустиме підвищення напруги становить 10 % [22]. Однак в цих умовах термін їх служби скорочується. У СЕП гірничих підприємств, як правило, БК можуть виявитися в режимі, близькому до резона-

несу струмів на частоті будь-якої з вищих гармонік або інтергармонік. Внаслідок перевантажень вони виходять з ладу [22].

Облік електроенергії при несинусоїдальних режимах пов'язаний із значними похибками [5]. Їх значення залежать від вимірювальної системи лічильника, його частотної характеристики, місця установки лічильника (на лінійному або нелінійному навантаженні) й інших факторів.

При вимірюванні потужності нелінійного навантаження $P_{нл}$ мають місце два зустрічні потоки потужності: основні частоти P_1 та ВГ $\sum_{n=2}^{\infty} P_n$. Нелінійне навантаження є джерелом ВГ, тому [7]

$$P_{нл} = P_1 - \sum_{n=2}^{\infty} \Delta P_n.$$

Відповідно для лінійного навантаження справедливо [7]

$$P_n = P_1 + \sum_{n=2}^{\infty} \Delta P_n.$$

Ці вирази легко перетворюються до вигляду:

$$P_{нл} = P_1(1 - \gamma_{сч}) \text{ та } P_n = P_1(1 + \gamma_{сч}),$$

де $\gamma_{сч} = \sum_{n=2}^{\infty} \Delta P_n / P_1$ – сума похибок лічильника на частотах ВГ.

При $n > 1$ частотна похибка індукційного лічильника негативна, тому $\gamma_{сч} < 1$. Останні вирази дозволяють зробити висновок, що при нелінійних навантаженнях відбувається переоблік електроенергії, при лінійних – недооблік [7].

Результати впливу інтергармонік (міжгармонік).

Струми інтергармонік викликають викривлення напруги залежно від амплітуди складових струму й опору системи електропостачання на відповідній частоті [3,22]. Чим більше гамма-частот складових струму, тим більше ризик виникнення небажаних резонансних явищ, що можуть збільшити викривлення напруги і призвести до перевантаження або порушення роботи обладнання споживача [22]. Найбільш поширеними **наслідками впливу** інтергармонік є [7]: тепловий ефект; низькочастотні коливання механічних систем; проблеми в роботі флуоресцентних ламп і електронного устаткування; створення перешкод сигналом захисту й управління в проводах електричної мережі; перевантаження пасивних фільтрів ВГ; перешкоди для телекомунікацій; акустичний вплив; насичення вимірювальних трансформаторів.

Провали напруги (ПН) часто призводять до перерв електропостачання і, відповідно, до виникнення

технологічного збитку [14]. ПН часто виникають в результаті відключень повітряних ліній і подальшого автоматичного повторного включення (однофазного чи іншого), а також в результаті включення потужних споживачів та інших причин, вони негативно впливають на роботу елементів систем управління і контролю, чутливих до перешкод. Вплив ПН в ряді випадків призводить не тільки до локальних аварійних ситуацій, а й до повної зупинки виробництва [3]. Особливу небезпеку ПН представляють для виробництв з використанням автоматичних роботизованих ліній (наприклад, в машинобудуванні).

Головними чинниками, що визначають вплив ПН на стійкість чутливих до перешкод пристроїв (тобто відсутність помилкового спрацьовування), є глибина провалу (в меншій мірі тривалість), склад навантаження мережі підприємства, а також рівень гармонік. Отже, нормувати необхідно допустиме значення комплекс цих параметрів [3], [14].

Компенсація реактивної потужності (КРП) в електричних мережах дозволяє за рахунок оптимізації завантаження окремих ліній і підстанцій нормалізувати рівні напруги в дефіцитних по реактивній потужності районах, зняти обмеження на відключення окремих ліній в зв'язку з ліквідацією аварій та виведення їх в ремонт або на реконструкцію [3], [14].

З огляду на порівняно високу економічну і енергетичну ефективність компенсації реактивної потужності, в промислово розвинених країнах їй приділяють велику увагу. Зокрема, у Франції, Швеції, Німеччині потужність конденсаторних установок становить 35% від активної пікової потужності, в США і Японії – близько 70%. В окремих енергокомпаніях США потужність встановлених компенсуючих пристроїв становить 100% від потужності генераторів [22]. При цьому в багатьох країнах спостерігається тенденція зменшення видачі генераторами електростанцій реактивної потужності за рахунок збільшення частки реактивної потужності, що виробляється конденсаторами [22].

Коефіцієнт реактивної потужності $tg\varphi$ в режимі максимальних навантажень в США, Японії і більшості європейських країн в залежності від номінальної напруги мережі підтримується на рівні 0,2 - 0,4, що відповідає $\cos\varphi = 0,98 - 0,92$. В останні роки в багатьох енергосистемах США розподільні електричні мережі в режимі максимальних навантажень працюють з $tg\varphi = 0$ [22].

Сьогодні в системах електропостачання гірничих підприємств та в електричних мережах України взагалі увага до проблеми КРП дещо знизилася. З іншого боку, з ряду об'єктивних причин значно зросли реактивні навантаження при істотному відставанні введів генеруючих активних потужностей і будівництва електричних мереж. Виникла велика кількість промислових енергорайонів, що характеризуються дефіцитами

реактивної потужності та працюють зі зниженими рівнями напруги в нормальних режимах [23]. До цих «проблемних» енергооб'єднань відносяться гірничо-видобувні регіони, де все частіше стали виникати труднощі з виводом обладнання в ремонт внаслідок аварійних відключень. При цьому відбувалося зниження напруги на 20-30% від номінальної на головних знижувальних підстанціях з наступним автоматичним розвантаженням мережі [23].

Ці приклади свідчать про необхідність значних обсягів робіт з підвищення рівня КРП в електричних мережах гірничих підприємств. Недостатня увага до питань КРП призводить до значного зростання відносних втрат електроенергії в електричних мережах [23].

Компенсація реактивної потужності як і раніше залишається одним з пріоритетних заходів в актуальній сьогодні програмі підвищення, ефективності процесу передачі і розподілу електричної енергії [23].

Сьогодні одночасно з методичною базою необхідно розробити нові принципи вибору компенсуючих пристроїв з урахуванням несинусоїдальності напруги для забезпечення електромагнітної сумісності з електричними мережами децентралізованого принципу побудови [23].

Особливості систем електропостачання та енергетичних балансів гірничих підприємств

Умови експлуатації систем електропостачання гірничих підприємств визначають як сукупність кліматичних та механічних чинників, що впливають на режими основного електрообладнання [24]. На підземних гірничих роботах з кліматичних чинників найбільше впливає вологість, температура, пил та корозійно-активні речовини [24]. Все це впливає на ізоляцію електрообладнання та знижує надійність його роботи.

Умови роботи гірничого обладнання сформували особливий клас електричних «гірничих» мереж, до яких не можуть бути застосовані стандартні підходи до проектування та моделювання електричних режимів при наявності нелінійних навантажень [24]. Для введення обґрунтованих допущень та початкових умов при математичному моделюванні врахуємо особливості даного класу електричних мереж [24]:

- високі вимоги до надійності системи електропостачання для шахт небезпечних за газом

та пилом;

- відокремлене живлення підземних споживачів;
- складність організації компенсації реактивної потужності в умовах нестабільності підземних виробок;
- велика протяжність силових кабельних ліній напругою 6-10 та 0,66-1,14 кВ;
- велика потужність стаціонарних установок (до 5 МВт);
- особливості технології підземного видобування вугілля, що призводить до циклічності роботи машин та механізмів з частими зупинками та холостим ходом;
- складність виконання норм якості напруги для поверхневих та підземних електроприймачів.

Дані чинники покладені в основу нових моделей розрахунку якості та надійності електропостачання гірничих підприємств для досягнення максимальної енергетичної ефективності.

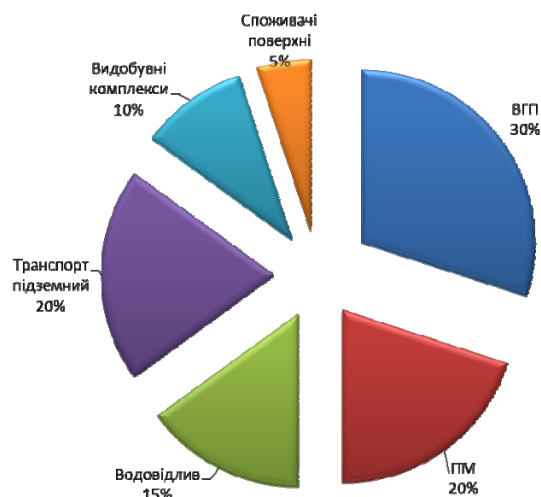


Рисунок 4. Енергетичний баланс вугільної шахти по технологічним ланкам

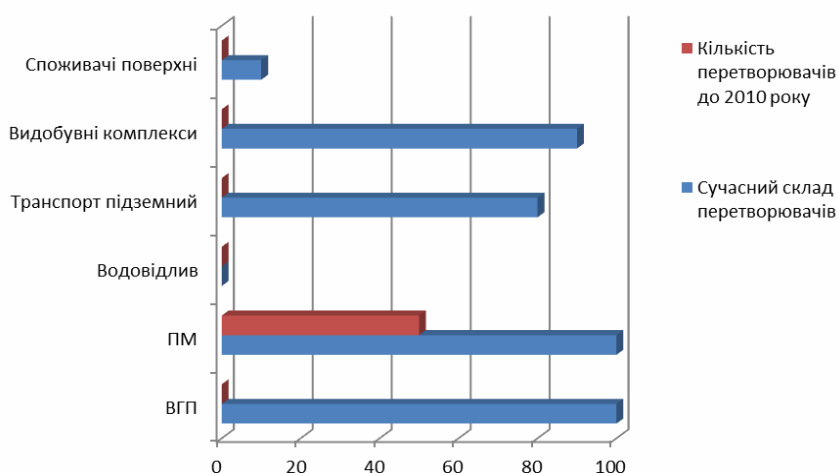


Рисунок 5. Динаміка зростання нелінійних навантажень в енергетичному балансі

Аналізуючи складові енергетичних балансів вугільних шахт по технологічним ланкам (рис. 4), було виявлено, що стаціонарні установки займають до 60% загальних витрат та формують режим споживання електроенергії за особливими повторно-короткочасними циклами [24]-[25].

Протягом останніх 10 років відбулось масштабне переоснащення технологічного електрообладнання на всіх виробничих ділянках гірничих підприємств з застосуванням перетворювачів частоти різних типів та потужностей. На рис. 5 демонструється динаміка зростання нелінійного навантаження в енергетичному балансі гірничих підприємств:

Вентилятори головного провітрювання - застосовуються асинхронні тиристорні каскади та перетворювачі частоти з ланкою постійного струму потужністю 1,6...5,0 МВт.

Підйомні машини (вугільні та породні) – в основному використовуються випрямлячі за 6 або 12 фазною схемою комутації вентилів потужністю 0,8...4,0 МВт.

Витрубувальні комплекси – встановлена потужність електрообладнання 1 лави приблизно складає 1 МВт, при чому майже всі електродвигуни мають частотний привод.

Транспорт підземний – акумуляторні та безконтактні електровози, а також сучасні конвеєрні лінії комплектуються перетворювачами та майже повністю витіснили так званий «чистий» електропривод в підземних електричних мережах.

Водовідлив – на сьогоднішній день перетворювачі частоти не використовуються за технічних особливостей насосного обладнання.

Таким чином, існуючі методики проектування та аналізу електричних навантажень та режимів гірничих підприємств є застарілими та не відповідають сучасним умовам. Для забезпечення енергетичної

ефективності функціонування даного класу електричних мереж з нелінійними навантаженнями та значною часткою генерації ВДЕ необхідна розробка нових комплексних критеріїв якості та надійності електропостачання з урахуванням режимів перетворювачів.

V. ВИСНОВКИ

Проведений аналіз проблеми енергетичної ефективності та електромагнітної сумісності потужних енергооб'єднань з нелінійними навантаженнями та ВДЕ дозволяє сформулювати наступні положення, що обумовлюють задачі цього дослідження. Перспективним шляхом підвищення енергетичної ефективності систем електропостачання є впровадження уточнених методик аналізу та прогнозування електричних режимів промислових підприємств, а також показників якості напруги та надійності електрообладнання.

Одним з електромагнітних ефектів, який проявляється при роботі перетворювачів частоти, є значні рівні інтергармонік та вищих гармонік, що генеруються в електричну мережу та сприяють зростанню втрат електроенергії та скороченню регламентного строку служби електрообладнання. Проте закономірності, що зв'язують параметри енергосистеми та режими потужних промислових перетворювачів, не вивчалися, і обґрунтування параметрів раціонального енергетично ефективного режиму системи електропостачання при врахуванні індивідуальних графіків вищих гармонік до сьогоднішнього дня не проводилося. З іншого боку, доцільно розглядати перетворювач частоти, як елемент системи електропостачання та формувати раціональні режими з урахуванням технологічних особливостей роботи та обмежень енергосистеми.

Незважаючи на те, що задачі електромагнітної сумісності були предметом численних вітчизняних і зарубіжних досліджень, слід зазначити, що більшість таких робіт розглядають процеси генерації електро-

магнітних перешкод в електричну мережу без зав'язків з технологічними графіками роботи електрообладнання. Існуючі методики розрахунку не дозволяють прогнозувати та регулювати зони виникнення резонансних явищ на частотах канонічних гармонік та інтергармонік, що унеможлиблює оптимальну компенсацію реактивної потужності.

Недостатня вивченість процесів електромагнітної сумісності потужних перетворювачів з особливим класом електричних мереж гірничих підприємств є одним із факторів, який обмежує впровадження інноваційних принципів інтелектуальної енергетики.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Аналітична доповідь до щорічного Послання Президента України до Верховної Ради України «Внутрішнє та зовнішнє становище України в 2016 році». - К.: НІСД, 2016. - 688 с.: С. 544- 546.
- [2] Жежеленко І.В. Електромагнітна сумісність у системах електропостачання: Підручник / І.В. Жежеленко, А.К. Шидловський, Г.Г. Півняк, Ю.Л. Саенко. – Д.: Нац. гірнич. ун-т, 2009. – 319 с.: іл.
- [3] Избранные вопросы несинусоидальных режимов в электрических сетях предприятий / И.В. Жежеленко, Ю.Л. Саенко, Т.К. Бараненко, А.В. Горпинич, В.В. Нестерович; Под ред. И.В. Жежеленко. – М.: Энергоатомиздат, 2007. – 296 с.
- [4] ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. - М.: Стандартинформ, 1997. - 60 с.
- [5] Гриб О.Г. Контроль потребления электроэнергии с учетом ее качества / О.Г. Гриб, В.И. Васильчиков, Ю.С. Громадский и др. Под ред. О.Г. Гриба. – Харьков: ХНУРЕ, 2010. – 300 с.
- [6] Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промышленных предприятий. – 5-е изд., перераб. и доп. / И.В. Жежеленко. – М.: Энергоатомиздат, 2004.
- [7] Жежеленко И.В. Электромагнитная совместимость в электрических сетях / И.В. Жежеленко, М.А. Коротчевич. – Минск: Высшая школа, 2012. – 197 с.
- [8] Papaika Y. Normalization of voltage quality as the way to ensure energy saving in power supply systems / G. Pivnyak, I. Zhezhelenko, Y. Papaika // CRC Press/Balkema – Taylor & Francis Group: Power Engineering Control and Information Technologies in Geotechnical Systems. – Leiden, The Netherlands, 2013 annual publication. – P. 11-18.
- [9] Папаїка Ю.А. Аналіз несинусоїдальності напруги в системі електропостачання ТОВ МЗ «Дніпросталь» при роботі потужної дугової сталеплавильної печі / Ю.А. Папаїка, О.В. Берковський // Гірнична електромеханіка та автоматика. – 2015. – № 94. – С. 17-20.
- [10] Гриб О. Г. / Анализ и оценка экономических ущербов от низкого качества электрической энергии : монография / В.А. Онищенко, И.А. Самойленко, О.Г. Гриб, А.Ф. Жаркин, В.И. Васильченко, К.В. Ущатовский, Г.А. Сендерович, А.Д. Светелик, К.И. Кондратенко, О.Н. Довгалюк, П.Г. Щербакова, Н.С. Захаренко ; под. общ. ред. проф. В.А. Онищенко. – Харьков : ХНУРЭ, 2013. – 328 с.
- [11] Жежеленко И.В. Оценка потерь электрической энергии, вызванных снижением ее качества / И.В. Жежеленко, В.В. Нестерович // Вісник Приазовського технічного університету: зб. наукових праць / ПДТУ. – Маріуполь, 2017. – Вип.34. – с.119-126.
- [12] Жежеленко И.В. Электрические потери от высших гармоник в системах электроснабжения / И.В. Жежеленко // Электрика. – 2010. - №4.
- [13] Папаїка Ю.А. Оцінка енергетичної ефективності систем електропостачання за допомогою індексу надійності / І.В. Жежеленко, Ю.А. Папаїка, О.Г. Лисенко // Гірнична електромеханіка та автоматика. – 2018. – № 100. – С. 25-30.
- [14] Папаїка Ю.А. Застосування індивідуальних графіків вищих гармонік в задачах електромагнітної сумісності та енергоефективності гірничих підприємств / І.В. Жежеленко, Ю.А. Папаїка, О.Г. Лисенко, К.С. Родна// Гірнична електромеханіка та автоматика. – 2019. – № 101. – С. 3-7.
- [15] Інтелектуальні електричні мережі: елементи та режими: за заг. ред. акад. НАН України О.В. Кириленка / Інститут електродинаміки НАН України. – К.: Ін-т електродинаміки НАН України, 2016. – 400 с.
- [16] Ущатовський К.В. Прогнози розвитку електроенергетики України: оцінка надійності та достовірності / К.В. Ущатовський // Енергосбереження. Енергетика. Енергоаудит. – 2015. - №7. С. 14-23.
- [17] Ryszard Strzelecki, Henryk Supronowicz. Wspolczynnik mocy w systemach zasilania pradu przemienneho i metody jego poprawy / Ryszard Strzelecki, Henryk Supronowicz, Warszawa: Oficyna Wydaw. Politechniki Warszawskiej, 2000, 452 s.
- [18] A. Ghosh and G. Ledwich, Power Quality Enhancement Using Custom Power Devices. Norwell, MA: Kluwer, 2002.
- [19] Janik P. Photovoltaic Power Generation Assessment Based on Advanced Signal Processing and Optimisation Techniques. Wroclaw: Publishing house of Wroclaw University of Science and Technology Wroclaw, 2014.
- [20] Janik P., Kosobudzki G., Schwarz. Influence of increasing numbers of RE-inverters on the power quality in the distribution grids: A PQ case study of a rep-

- representative wind turbine and photovoltaic system. Higher Education Press and Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2017, DOI 10.1007/s11708-017-0469-3.
- [21] Жаркин А.Ф. Нормативно-правовое регулирование качества электрической энергии. Анализ украинских и европейских законодательных актов и нормативно-технических документов / А.Ф. Жаркин, В.А. Новский, С.А. Палачев. – К.: Ин-т электродинамики НАН Украины, 2010. – 167 с.
- [22] Папаика Ю.А. Энергетична ефективність систем електропостачання / Г.Г. Півняк, І.В. Жежеленко, Ю.А. Папаїка. – Д.: НТУ «ДП», 2018. – 149 с.
- [23] Электромагнитная совместимость потребителей: моногр. /И.В. Жежеленко, А.К. Шидловский, Г.Г. Пивняк, Ю.С. Саенко, Н.А. Нойбергер. – М.: Машиностроение, 2012. – 351 с.
- [24] Олишевский И. Г. Обоснование применения теплонасосного оборудования для утилизации тепловых потерь в силовых трансформаторах большой мощности / И. Г. Олишевский, Г. С. Олишевский // Вісник Дніпропетровського університету. Серія: Ракетно-космічна техніка. / Дніпр. нац. ун-т ім. О. Гончара. – Дніпропетровськ, 2015. – № 4. – Т. 23. – Вип. 18(1) – С. 131-136.
- [25] Півняк Г.Г. Електрифікація гірничих робіт / Г.Г. Півняк, М.М. Білий та ін. – Дніпропетровськ: Національний гірничий університет, 2005. – 320 с.
- [26] Олишевский Г. С. Обоснование метода утилизации теплоты системы кондиционирования для теплонасосной системы отопления / Г. С. Олишевский, И. Г. Олишевский // Інформаційні системи, механіка та керування / НТУУ «Київський політехнічний інститут». – Київ. – 2017. – № 17. – С. 86 – 94.
- [27] Олишевский И. Г. Обоснование рациональной схемы теплонасосной системы отопления / И. Г. Олишевский // Механіка гіроскопічних систем / НТУУ «Київський політехнічний інститут». – Київ. – 2015. – № 30. – С. 26 – 35.
- [28] Papaika, Y., Lysenko, O., Koshelenko, Y. and Olisheskiyi, I., 2021. Mathematical modeling of power supply reliability at low voltage quality. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (2), pp.97-103.

Стаття надійшла до редакції 02.02.2021

ПРОБЛЕМЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ МОЩНЫХ ЭНЕРГООБЪЕДИНЕНИЙ ПРИ МАССОВОМ ПОДКЛЮЧЕНИИ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ

- ПАПАИКА Ю.А. д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой электроэнергетики НТУ «Днепропетровская политехника», Днепр, Украина, e-mail: papaika@ukr.net;
- ЛЫСЕНКО А. Г. канд техн. наук, доцент кафедры электропривода НТУ «Днепропетровская политехника», Днепр, Украина, e-mail: lysenkoag@ukr.net;
- БУБЛИКОВ А.В. д-р техн. наук, профессор кафедры киберфизических и информационно-измерительных систем НТУ «Днепропетровская политехника», Днепр, Украина, e-mail: bublikov.a.v@nmu.one.
- ОЛИШЕВСКИЙ И.Г. ассистент кафедры безопасности информации и телекоммуникаций НТУ «Днепропетровская политехника», Днепр, Украина, e-mail: olisheskiyi@ukr.net;

Цель работы. Проведение анализа проблемы энергетической эффективности и электромагнитной совместимости мощных энергообъединений с нелинейными нагрузками и возобновляемыми источниками энергии. Нахождение перспективных путей повышения энергетической эффективности систем электроснабжения.

Методы исследования. Математическое моделирование электромагнитной совместимости.

Полученные результаты. Проведенный анализ проблемы энергетической эффективности и электромагнитной совместимости мощных энергообъединений с нелинейными нагрузками и возобновляемыми источниками энергии позволяет сформулировать следующие положения, которые обуславливают задачи этого исследования. Перспективным путем повышения энергетической эффективности систем электроснабжения является внедрение уточненных методик анализа и прогнозирования электрических режимов промышленных предприятий, а также показателя качества напряжения и надежности электрооборудования.

Научная новизна. Несмотря на то, что задачи электромагнитной совместимости были предметом многочисленных отечественных и зарубежных исследований, следует отметить, что большинство таких работ рассматривают процессы генерации электромагнитных помех в электрическую сеть без связей с технологическими графиками работы электрооборудования.

Практическая ценность. Одним из электромагнитных эффектов, который проявляется при работе преобразователей частоты, имеются значительные уровни интергармоник и высших гармоник, генерируемых

в электрическую сеть и способствующих росту потерь электроэнергии и сокращению регламентного срока службы электрооборудования. Однако закономерности, связывающие параметры энергосистемы и режимы мощных промышленных преобразователей, не изучались, и обоснование параметров рационального энергетически эффективного режима системы электроснабжения при учете индивидуальных графиков высших гармоник до сегодняшнего дня не проводилось.

Ключевые слова: электромагнитная совместимость; моделирование; качество электрической энергии; возобновляемые источники энергии; инверторное оборудование.

PROBLEMS OF ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY OF POWERFUL ENERGY ASSOCIATIONS DURING MASS CONNECTION OF RENEWABLE ENERGY SOURCES

- PAPAİKA YU. A. Sci.D, Professor, Head of the Department of Power Engineering, Dnipro University of technology, Dnipro, Ukraine, e-mail: papaika@ukr.net;
- LYSENKO O. H. PhD, docent of the Electric Drive department, Dnipro University of technology, Dnipro, Ukraine, e-mail: lysenkoag@ukr.net;
- BUBLIKOV A.V. Sci.D, Professor of the Department of Cyberphysical and Information-measuring Systems, Dnipro University of technology, Dnipro, Ukraine, e-mail: bublikov.a.v@nmu.one
- OLISHEVSKYI I. H. Assistant of Department of Information Security and Telecommunications, Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine, e-mail: olishevskiyi@ukr.net,

Purpose. Analysis of the problem of energy efficiency and electromagnetic compatibility of powerful energy associations with nonlinear loads and renewable energy sources. Finding promising ways to increase energy efficiency of power supply systems.

Methodology. Mathematical modeling of electromagnetic compatibility.

Findings. The analysis of the problem of energy efficiency and electromagnetic compatibility of powerful energy associations with nonlinear loads and renewable energy sources allows us to formulate the following provisions that determine the objectives of this study. A promising way to increase the energy efficiency of power supply systems is the introduction of refined methods of analysis and forecasting of electrical modes of industrial enterprises, as well as indicators of voltage quality and reliability of electrical equipment.

Originality. Although the problem of electromagnetic compatibility has been the subject of numerous domestic and foreign studies, it should be noted that most of these works consider the processes of generating electromagnetic interference in the electrical network without reference to the technological schedules of electrical equipment.

Practical value. One of the electromagnetic effects, which is manifested in the operation of frequency converters, are significant levels of interharmonics and higher harmonics, which are generated in the electrical network and contribute to the growth of electricity losses and reduce the service life of electrical equipment. However, the regularities connecting the parameters of the power system and the modes of powerful industrial converters have not been studied, and the substantiation of the parameters of a rational energy efficient mode of the power supply system, taking into account individual graphs of higher harmonics, has not been carried out until today..

Keywords: electromagnetic compatibility; modeling; quality of electric energy; renewable energy sources; inverter equipment.

REFERENCES

- [1] Analitichna dopovid' do shhorichnogo Poslannja Prezidenta Ukraїni do Verhovnoї Radi Ukraїni «Vnutrishne ta zovnishne stanovishhe Ukraїni v 2016 roci». - K.: NISD, 2016, 688, 544- 546.
- [2] Zhezhelenko I.V. (2009). Elektromagnitna sumisnist' u si-stemah elektropostachannja: Pidruchnik / I.V. Zhezhelenko, A.K. Shidlovs'kij, G.G. Pivnjak, Ju.L. Saenko. D.: Nac. girnich. un-t., 319 s.: il.
- [3] Izbrannyye voprosy nesinusoidal'nyh rezhimov v jelektricheskij setjah predpriyatij / I.V. Zhezhelenko, Ju.L. Saenko, T.K. Baranenko, A.V. Gorpi-nich, V.V. Nesterovich; Pod red. I.V. Zhezhelenko. – M.: Jenergoatomizdat, 2007, 296 s.
- [4] GOST 13109-97. Jelektricheskaja jenergija. Sovmestimost' tehničeskijh sredstv jelektromagnitnaja. Normy kachestva jelektricheskijh jenergij v siste-mah jelektrosnabzhenija obshhego naznachenija. M.: Standartinform , 1997, 60 s.
- [5] Grib O.G. (2010). Kontrol' potreblenija jelektrojen-gerij s uchetom ee kachestva / O.G. Grib, V.I. Va-

- sil'chikov, Ju.S. Gromadskij i dr. Pod red. O.G. Griba. Har'kov: HNURE., 300 s.
- [6] Zhezhelenko I.V. Vysshie garmoniki v sistemah jelektronsabzhenija promyshlennyh predpriyatij. 5-e izd., pererab. i dop. / I.V. Zhezhelenko. – M.: Jenergoatomizdat, 2004.
- [7] Zhezhelenko I.V. (2012). Jelektromagnitnaja sovместimost' v jelektricheskijh setjah / I.V. Zhezhelenko, M.A. Korotchevich. Minsk: Vyshejs'haja shkola., 197 s.
- [8] Papaika Y. Normalization of voltage quality as the way to ensure energy saving in power supply systems / G. Pivnyak, I. Zhezhelenko, Y. Papaika // CRC Press/Balkema – Taylor & Francis Group: Power Engineering Control and Information Technologies in Geotechnical Systems. – Leiden, The Netherlands, 2013 annual publication. – P. 11-18.
- [9] Papaika Ju.A. (2015). Analiz nesinusoidal'nosti naprugi v sistemi elektropostachannja TOV MZ «Dnipro-stal'» pri roboti potuzhnoï dugovoï staleplavil'noï pechi / Ju.A. Papaika, O.V. Berkovskij // Girnicha elektromehanika ta avtomatika. No 94, S. 17-20.
- [10] Grib O. G. (2013). Analiz i ocenka jekonomicheskijh ushherbov ot nizkogo kachestva jelektricheskijh jenergij : monografija / V.A. Onishhenko, I.A. Samojlenko, O.G. Grib, A.F. Zharkin, V.I. Vasil'chenko, K.V. Ushhapovskij, G.A. Senderovich, A.D. Svetelik, K.I. Kondratenko, O.N. Dovgaljuk, P.G. Shherbakova, N.S. Zaharenko ; pod. obshh. red. prof. V.A. Onishhenko. – Har'kov : HNURJe, 328 s.
- [11] Zhezhelenko I.V. (2017). Ocenka poter' jelektricheskijh jenergij, vyzvannyh snizheniem ee kachestva / I.V. Zhezhelenko, V.V. Nesterovich // Visnik Priazov's'kogo tehničnogo universitetu: zb. naukovijh prac' / PDTU. – Mariupol', Vip.34, s.119-126.
- [12] Zhezhelenko I.V. (2010). Jelektricheskije poteri ot vys-shih garmonik v sistemah jelektronsabzhenija / I.V. Zhezhelenko // Jelektrika. No 4.
- [13] Papaika Ju.A. (2018). Ocinka energetichnoï effektivnosti sistem elektropostachannja za dopomogoju indeksu nadijnosti / I.V. Zhezhelenko, Ju.A. Papaika, O.G. Lisenko // Girnicha elektromehanika ta avtomatika. No 100, 25-30.
- [14] Papaika Ju.A. Zastosuvannja individual'nih grafikiv vishhijh garmonik v zadachah elektromagnitnoï sumisnosti ta energoefektivnosti girnichijh pidpriemstv / I.V. Zhezhelenko, Ju.A. Papaika, O.G. Lisenko, K.S. Rodna// Girnicha elektromehanika ta avtomatika. – 2019. – № 101. – S. 3-7.
- [15] Intelektual'ni elektrichni merezhi: elementi ta rezhimi: za zag. red. akad. NAN Ukraïni O.V. Ki-rilenka / Institut elektrodinamiki NAN Ukraïni. – K.: In-t elektrodinamiki NAN Ukraïni, 2016. – 400 s.
- [16] Ushhapovskij K.V. (2015). Prognozi rozvitku elektro-nergetiki Ukraïni: ocinka nadijnosti ta dostovirnosti. Jenergosbere-zhenie. Jenergetika. Jenergoaudit. No 7. S. 14-23.
- [17] Ryszard Strzelecki, Henryk Supronowicz. Wspolczynnik mocy w systemach zasilania pradu przemiennego i metody jego poprawy / Ryszard Strzelecki, Henryk Supronowicz, Warszawa: Oficyna Wydaw. Politechniki Warszawskiej, 2000, 452 s.
- [18] A. Ghosh and G. Ledwich, Power Quality Enhancement Using Custom Power Devices. Norwell, MA: Kluwer, 2002.
- [19] Janik P. (2014). Photovoltaic Power Generation Assessment Based on Advanced Signal Processing and Optimisation Techniques. Wroclaw: Publishing house of Wroclaw University of Science and Technology Wroclaw,.
- [20] Janik P., Kosobudzki G., Schwarz. 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. Higher Education Press and Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2017, DOI 10.1007/s11708-017-0469-3.
- [21] Zharkin A.F. Normativno-pravovoe regulirovanie kachestva jelektricheskijh jenergij. Analiz ukraïnskijh i evropejskijh zakonodatel'nyh ak-tov i normativno-tehničeskijh dokumentov / A.F. Zharkin, V.A. Novskij, S.A. Palachev. – K.: In-t jelektrodinamiki NAN Ukraïni, 2010, 167 s.
- [22] Papaika Ju.A. (2018). Energetichna effektivnist' sistem elektropostachannja / G.G. Pivnyak, I.V. Zhezhelenko, Ju.A. Papaika. – D.: NTU «DP», 149.
- [23] Jelektromagnitnaja sovместimost' potrebitelej: monogr. /I.V. Zhezhelenko, A.K. Shidlovskij, G.G. Pivnyak, Ju.S. Saenko, N.A. Nojberger. – M.: Mashinostroenie, 2012, 351 s.
- [24] Olishevskij I. G. (2015). Obosnovanie primenenija tep-lonasosnogo oborudovanija dlja utilizacii teplovyh poter' v silovyh transformatorah bol'shoj moshhnosti / I. G. Olishevskij, G. S. Olishevskij // Visnik Dnipropetrovs'kogo universitetu. Serija: Raketno-kosmichna tehnika. / Dnipro. nac. un-t im. O. Gonchara. – Dnipropetrovs'k, No 4.
- [25] Pivnyak G.G. (2005). Elektrifikacija girnichijh robot / G.G. Pivnyak, M.M. Bilij ta in. – Dnipropetrovs'k: Nacional'nij girnichij universitet, 320 s.
- [26] Olishevskij G. S. (2017). Obosnovanie metoda utilizacii teploty sistemy kondicionirovanija dlja teplonasosnoj sistemy otoplenija / G. S. Olishevskij, I. G. Olishevskij // Informacijni si-stemi, mehanika ta keruvannja / NTUU «Kiïv'skij politehničnij institut». Kiïv, No 17, 86 – 94.
- [27] Olishevskij I. G. (2015). Obosnovanie racional'noj shemy teplonasosnoj sistemy otoplenija / I. G. Olishevskij // Mehanika giroskopichnijh sistem / NTUU «Kiïv'skij politehničnij institut». Kiïv, No 30, 26-35.
- [28] Papaika, Y., Lysenko, O., Koshelenko, Y. and Olishevskij, I., (2021). Mathematical modeling of power supply reliability at low voltage quality. Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu, (2), pp.97-103.