

ВИКОРИСТАННЯ ВІДОМИХ ПОКАЗНИКІВ МАНЕВРОВОСТІ ТА МОБІЛЬНОСТІ ДЛЯ ОЦІНКИ ЕФЕКТИВНОЇ РОБОТИ КОМБІНОВАНИХ ПАРОГАЗОТУРБІННИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК

¹М.П. Кулик, ²Й.С. Мисак

¹ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15; тел. 050 3377437,
e-mail: m_p_kulik@ukr.net

²Національний університет «Львівська політехніка»; 79013, м. Львів, вул. С.Бандери 12;
тел. 096 4368063

Енергетичне забезпечення суспільного життя будь-якої держави лежить в основі концепції його ста-лого розвитку. Енергетика України, зокрема теплова, перебуває в передкризовому стані з причини майже повної зношеності технологічного обладнання та великих обсягів викидів шкідливих речовин в атмосферне повітря.

В роботі акцентується увага на необхідності її технічного переоснащення з врахуванням сучасних до-сягнень, наукових розробок та існуючих проблем у покритті пікових навантажень з одночасним зниженням екологічних ризиків. Таке завдання вирішується шляхом використання для генерування електричної енергії комбінованих парогазотурбінних енергетичних установок, які можуть працювати на вітчизняному вугіллі низької якості. Робота газового циклу генерування забезпечується продуктами газифікації кам'яного ву-гілля з використанням циркулюючого киплячого шару, а також додаткової топки циклонного типу.

Проведено аналіз придатності відомих коефіцієнтів маневровості та мобільності, а також запро-поновано коефіцієнти питомих валових викидів для оцінювання екологічності та ефективності роботи комбінованих парогазотурбінних енергетичних установок, у випадку спільного використання генерування за паровим і газовим циклами. Це дозволить значно "м'якше" проходити пікові навантаження, збільшити діапазон зміни потужності енергоблоків та суттєво зменшити викиди шкідливих речовин в атмосферне повітря.

Ключові слова: пікові навантаження, маневровість та мобільність енергоблоків, паровий та газовий ме-тод генерування, комбіновані парогазотурбінні енергетичні установки, додаткова топка циклонного типу, екологічна безпека.

Энергетическое социальное жизнеобеспечение любого государства лежит в основании концепции его стабильного развития. Энергетика Украины, в частности тепловая, находится в критическом состоянии из-за почти полного износа технологического оборудования и больших объемов выбросов вредных веществ в атмосферный воздух.

Акцентируется внимание на необходимости ее технического переоснащения с учетом современных достижений, научных разработок и существующих проблем в покрытии пиковых нагрузок с одновремен-ным снижением экологических рисков. Таковую задачу можно решить путем использования для генерации электрической энергии комбинированных парогазотурбинных энергетических установок, которые могут работать на отечественном низкокачественном угле. Работа газового цикла генерации обеспечивается продуктами газификации с использованием циркулирующего кипящего слоя, а также дополнительной топ-ки циклонного типа.

Проведен анализ пригодности известных показателей маневренности та мобільності, а также пред-ложены коэффициенты удельных валовых выбросов для оценки экологичности и экономичности работы комбинированных парогазотурбинных энергетических установок, с учетом возможности одновременного использования процесса генерации с помощью парового и газового циклов. Этим можно обеспечить пла-вное прохождение пиковых нагрузок, значительное увеличение диапазона изменения мощности, при этом значительно уменьшатся выбросы вредных веществ.

Ключевые слова: пиковая нагрузка, маневренность и мобільность энергоблоков, паровой и газовый цикл генерации, комбинированные парогазотурбинные установки, циклонный предтопок, экологическая безопасность.

The public life's power supply of any state is a basic concept of its sustainable development. Ukraine's power sector, namely thermal power, is in the critical state due to almost complete deterioration of technological equip-ment and large amounts of harmful emissions into the atmosphere. This paper focuses on the need of its technical rehabilitation, taking into account modern achievements, scientific developments and existing problems in covering peak loads while lowering environmental risks. This problem can be solved by using combined steam and gas tur-bine power plants for generation of electrical power, which can operate on domestic low quality coal. The gas cycle operation of generation is provided with coal gasification products using circulating fluidized bed and additional cyclonic-type furnace. The suitability of known maneuverability and mobility indicators is analyzed. Additionally, the carbon gross emission indices are proposed to assess environmental friendliness and operation efficiency of combined steam and gas turbine power plants in case of the combined use of generation in steam and gas cycles.

It will make possible to smooth out peak loads, increase power alteration range of power units and significantly reduce harmful emissions into atmosphere.

Key words: peak loads, maneuverability and mobility of power units, steam and gas cycle of generation, combined steam and gas turbine power plants, cyclone burner, environmental safety.

Вступ. Рівень і надійність забезпеченості енергією, в тому числі і електричною, визначає економічну безпеку та незалежність будь-якої держави. Об'єднана енергосистема (ОЕС) України складається із сукупності різного типу електростанцій, електричних та теплових мереж та інших енергетичних об'єктів, які об'єднані спільним режимом генерування, передачі та розподілу електричної та теплової енергії. Централізоване управління основними технологічними процесами здійснює окремий диспетчерський центр НЕК "Укренерго".

В електроенергетичній галузі України за роки політичної незалежності зроблена спроба впровадження ринкових стосунків, а також наближення її структури до структури енергетики деяких провідних держав Європейського Союзу. Але для успішного завершення реформи в енергетичній сфері Україна повинна зробити ще досить багато.

Основними виробниками електричної енергії на території України є теплові електростанції (ТЕС), гідроелектростанції (ГЕС), а також атомні (АЕС) електростанції, які об'єднані в національну атомну енергетичну компанію (НАЕК) "Енергоатом". Потужність вказаних виробників на даний момент часу складає відповідно 54-56 % - для ТЕС, 9-10 % - для ГЕС, а також 25-26 % - для об'єктів "Енергоатому". Залишок 8-12 % припадає на нетрадиційні відновлювальні джерела та комунальні ТЕЦ. Основними джерелом генерування у теплової енергетиці, в основному, є вугільні енергоблоки потужністю 100 – 300 МВт. При цьому тільки Слав'янська ТЕС має блок потужністю 800 МВт, а Добротвірська - два енергоблоки по 150 МВт, п'ять котлів ТП-10, які працюють на спільний паропровод, і дві турбіни ВК-100-6 з окремими генераторами.

Більшість теплових електростанцій споруджені в середині минулого століття, у зв'язку з чим їх основне технологічне обладнання потребує термінової модернізації та заміни. АЕС збудовані та введені в експлуатацію відносно пізніше. Зокрема, блок №6 Запорізької АЕС введено в експлуатацію у 1995р., а енергоблоки №2 Хмельницької АЕС та № 4 Рівненської АЕС здані в експлуатацію у 2004 році [1]. В тій же роботі наведено характеристики потужностей ГЕС, окремі блоки яких мають потужність до 100 МВт, а з 15 блоків АЕС 13 мають потужність до 1000 МВт, решта – 400 і 415 МВт. Останнім часом було підвищено потужності Рівненської та Хмельницької АЕС. Спеціалісти стверджують, що за потреби можна відновити незруйновані блоки Чорнобильської АЕС. Згідно з Енергетичною програмою країни до 2030 року заплановано побудувати до 20 нових блоків АЕС, розглядається можливість побудови нових АЕС.

Останнім часом посилена увага приділяється розвитку гідроенергетики. Сьогодні потужність Дніпровського каскаду становить 3 900 МВт і в середньоводний рік ГЕС виробляють до 10 млрд. кВт.год. електроенергії. Всі ГЕС Дніпровського каскаду є низьконапірними. Оптимальною, з огляду на можливість безпроблемного регулювання потужностей в енергосистемі України, була б встановлена потужність ГЕС (включно із ГАЕС) порядку 15-20 % від загальної встановленої потужності ОЕС. Тобто доцільною для України спільна потужність ГЕС та ГАЕС повинна бути приблизно 8 –10 тис.МВт. Оскільки можливості обох основних великих рік України (Дніпро та Дністер) практично повністю вичерпані, то основну увагу почали приділяти так званій малій енергетиці, тобто відновленню та будівництву ГЕС на малих річках.

Відносно велика потужність енергоблоків АЕС, яка обумовлює інерційність їхньої роботи, а отже, режимів експлуатації таких енергоблоків. Проектне призначення таких блоків – працювати у стаціонарних режимах, тобто при постійній потужності, близькій до номінальної, при якій економічні показники найкращі. АЕС можуть працювати тривалий час і не на повній потужності, однак при цьому значно погіршуються економічні показники з причин зростання питомих витрат на одиницю виробленої електроенергії, в якості якої прийнята кіловат*година.

Електрична енергія, як результат роботи електроенергетичної галузі, відрізняється від інших енергоносіїв тим, що електроенергію не можна накопичувати у сховищах, як, наприклад, природний газ, а вироблена кількість електричної енергії в будь-який момент часу одразу повинна бути спожита. Тому процеси її виробництва та споживання мусять збігатися в часі або відбуватися, принаймні послідовно, що вимагає наявності відповідної ланки передачі, яка має пов'язувати відповідним чином ці дві стадії.

Часта зміна потужностей енергоблоків АЕС, яка не передбачена проектом, приводить до прискореного зношування технологічного обладнання, збільшення експлуатаційних і ремонтних витрат, і в результаті збільшення ймовірності їх відмови. При цьому досить важко досягається баланс між виробленою та спожитою електроенергією. А зміна споживання електричної енергії може відбуватися під час підключення у мережу або відключення будь-якого електротехнічного пристрою – від системи освітлення у приватній оселі до електроплавильної печі на металургійному комбінаті.

За останні два-три роки через анексію території Кримської автономії та бойові дії в деяких районах Донецької та Луганської областей

вказані раніше співвідношення потужностей різних генерацій дещо змінилися.

Загальна потужність усіх типів електростанцій, які працюють в ОЕС України, за даними Міненергівугілля станом на 1 січня 2016 р. оцінюється у 56116 МВт. У тому числі загальна потужність ТЕС становить 27735 МВт (49.4 % від загальної), АЕС – 13 835 МВт (24.7 %), ТЕЦ та блок-станцій – 6728 МВт (12.0 %), ГЕС – 4600 МВт (8.2 %), електростанції на альтернативних джерелах енергії (вітрові, сонячні, біомаса тощо) – 2033 МВт (3.6 %), ГАЕС – 1186 МВт (2.1 %)

Крім названих потужних об'єктів енергетики існує значна кількість малих систем теплоелектрогенерування, зосереджених у районах великих міст, населених пунктів та різних об'єктах промисловості. До них належать районні опалювальні і опалювально-виробничі котельні, заводські ТЕС, ТЕЦ і котельні, промислові печі, автономні теплоцентралі, призначені для обслуговування певної кількості будинків та споруд, промислового та приватного призначення.

Аналіз відомих досліджень та публікацій. Як відомо, сучасне споживання електроенергії характеризується нерівномірністю протягом доби, робочого тижня, а також воно суттєво відрізняється протягом року, особливо у весняно-літній та осінньо-зимовий періоди. З іншого боку, в структурі потужностей основних виробників електричної енергії спостерігається суттєва диспропорція між об'єктами генерування, які ефективно працюють у базових, напівпікових та пікових режимах. Графіки, які ілюструють річну та добову зміну пікового споживання електроенергії, взяті із робіт [2, 3] зображені на рис. 1, 2.

Аналізуючи вказані графіки, слід зауважити, що існуючий в Україні парк енергоблоків погано пристосований до роботи у пікових та напівпікових режимах, який для більшості з них є непроєктованим. Деякі з них мають застаріле та зношене технологічне обладнання і, працюючи у таких умовах, спалюють велику кількість надлишкового палива, викидаючи додатково в атмосферу ще більше досить небезпечних шкідливих речовин.

Паливні ресурси (вугілля, нафта та природний газ) спалюються у таких кількостях, що продукти їх згоряння (шкідливі та токсичні речовини різного агрегатного стану) змінюють стан атмосфери, забруднюють гідросферу та літосферу.

З причини інтенсивного використання невідновлювальних паливно-енергетичних ресурсів наприкінці ХХ-го та на початку ХХІ-го століть їх запаси в окремих країнах суттєво зменшилися, собівартість зросла, а якість погіршилася.

До шкідливих впливів на навколишнє середовище, якими супроводжуються процеси спалювання вугілля, відносяться :

– використання атмосферного кисню, за який не береться плата як за природний ресурс;

– викиди в атмосферне повітря продуктів повного спалювання (CO_2 та H_2O);

– рівень звукового тиску від технологічного обладнання та транспорту;

– забруднення водного басейну та ґрунту важкими металами;

– необхідність накопичення золи у золовідвалах, які займають досить велику площу.

Однак найбільшу небезпеку для довкілля та населення (в тому числі і для оперативного та обслуговуючого персоналу), створюють наступні шкідливі речовини: частинки незгорілого палива, окисли азоту NO та NO_2 (паливни, швидкі, термічні), окисли сірки SO_2 і SO_3 , сажа, зола, продукти неповного згоряння CO , C_mH_n , H_2 , а також канцерогенні речовини (зокрема 1, 2 бенз(а)пірен $\text{C}_{20}\text{H}_{12}$, який відноситься до 1-го класу небезпеки).

Об'єкти малої енергетики є також джерелом забруднення навколишнього середовища, які через свою розрізненість та непередбачуваність, погано піддаються заходам із забезпечення екологічної безпеки,

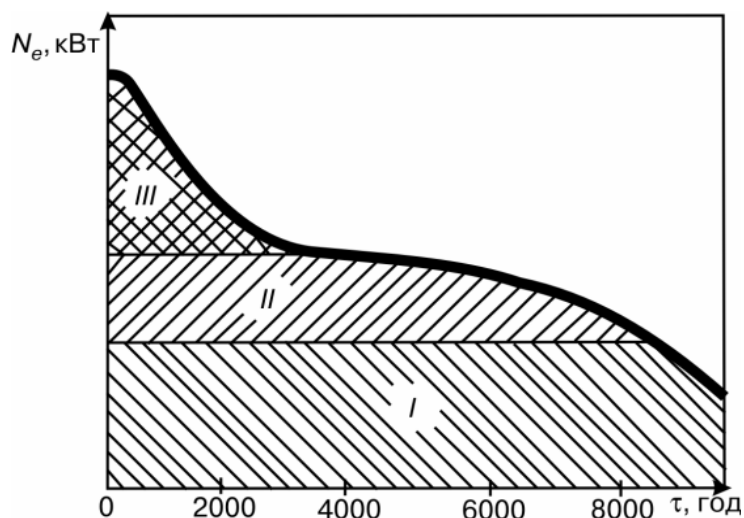
Концентрація і централізація енергопостачання збільшує дальність передачі енергії, що пов'язано із додатковими капітальними та експлуатаційними витратами і втратами енергії в розподільчій системі. Знизити ці втрати та збільшити дальність транспортування дозволяє підвищення потенціалу енергоносіїв, що використовують для передачі та розподілу енергії. Тому важливим елементом таких систем енергопостачання є трансформаторні (перетворювальні) електроустановки, що додатково забруднює довкілля різного виду та інтенсивності електромагнітними полями.

На рис. 3 зображено графік виробництва – споживання електроенергії в ОЕС України станом на 1 березня 2016 року, взятий із роботи [1]. З нього видно, що мінімальний рівень потужності усіх видів генерації в нічний період доби складає 16 000 МВт, а під час максимального споживання електроенергії після 19 години – 20 500 МВт.

Автор цитованої роботи вважає, що для покриття попиту на електроенергію під час піку споживання у 20 500 МВт ця потужність складає 36.5 % від сумарної потужності всіх видів генерування в ОЕС України (56 116 МВт) могла би бути забезпечена виключно ТЕС, загальна потужність яких складає більше 27 000 МВт.

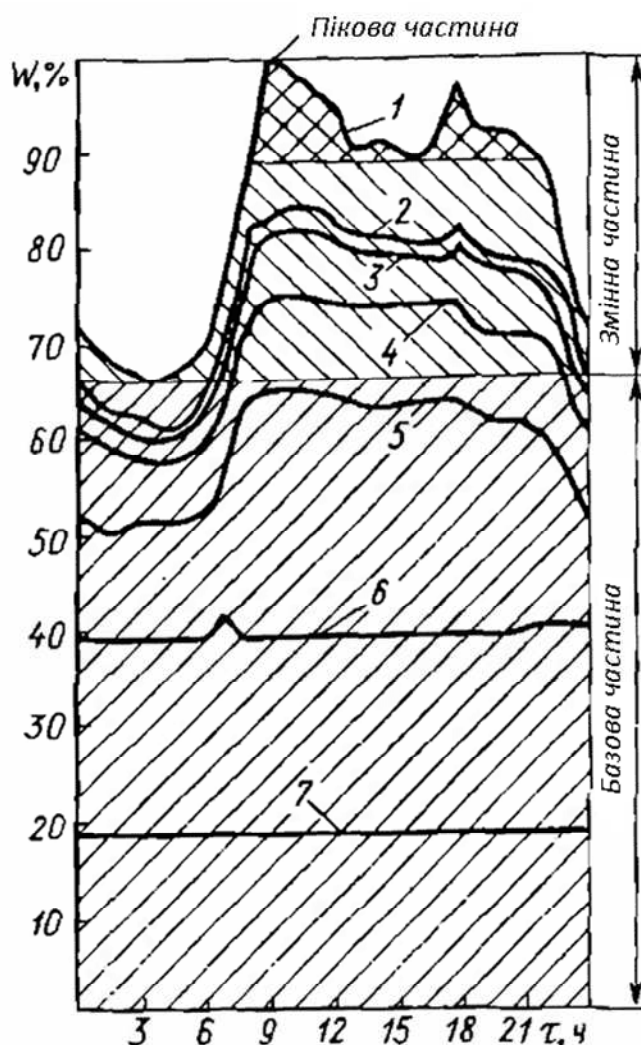
Протягом доби АЕС працюють у базовому режимі практично із постійною сумарною потужністю близько 10 2150 МВт. Потужність ТЕЦ також практично не змінюється і дорівнює 2 299 МВт, ТЕС і ГЕС у нічний період доби з 00:00 до 07:00 працюють з мінімальною (близько 3 500 МВт), а у денний період збільшують сумарну потужність до 7 000 МВт.

В період нічного спаду споживання електроенергії до роботи у насосному режимі (як споживач електроенергії) залучаються ГАЕС та закачують воду у верхні водосховища, а у напівпікові та пікові години споживання електроенергії збільшують свою потужність ТЕС і ГЕС та до роботи в генераторному режимі залуча-



I – тривалість зони базового навантаження, II – тривалість зони напівпікового (проміжного) навантаження, III – тривалість зони пікового навантаження

Рисунок 1 – Графік річних електричних навантажень за тривалістю



1 – ГЕС, 2 – конденсаційні ТЕС на тиску пари 9 МПа, 3-5 – енергоблоки 150, 200, 300 МВт, 6 – ТЕЦ, 7 – АЕС

Рисунок 2 – Внесок основних типів електростанцій у добове регулювання пікового навантаження за день річного максимуму споживання

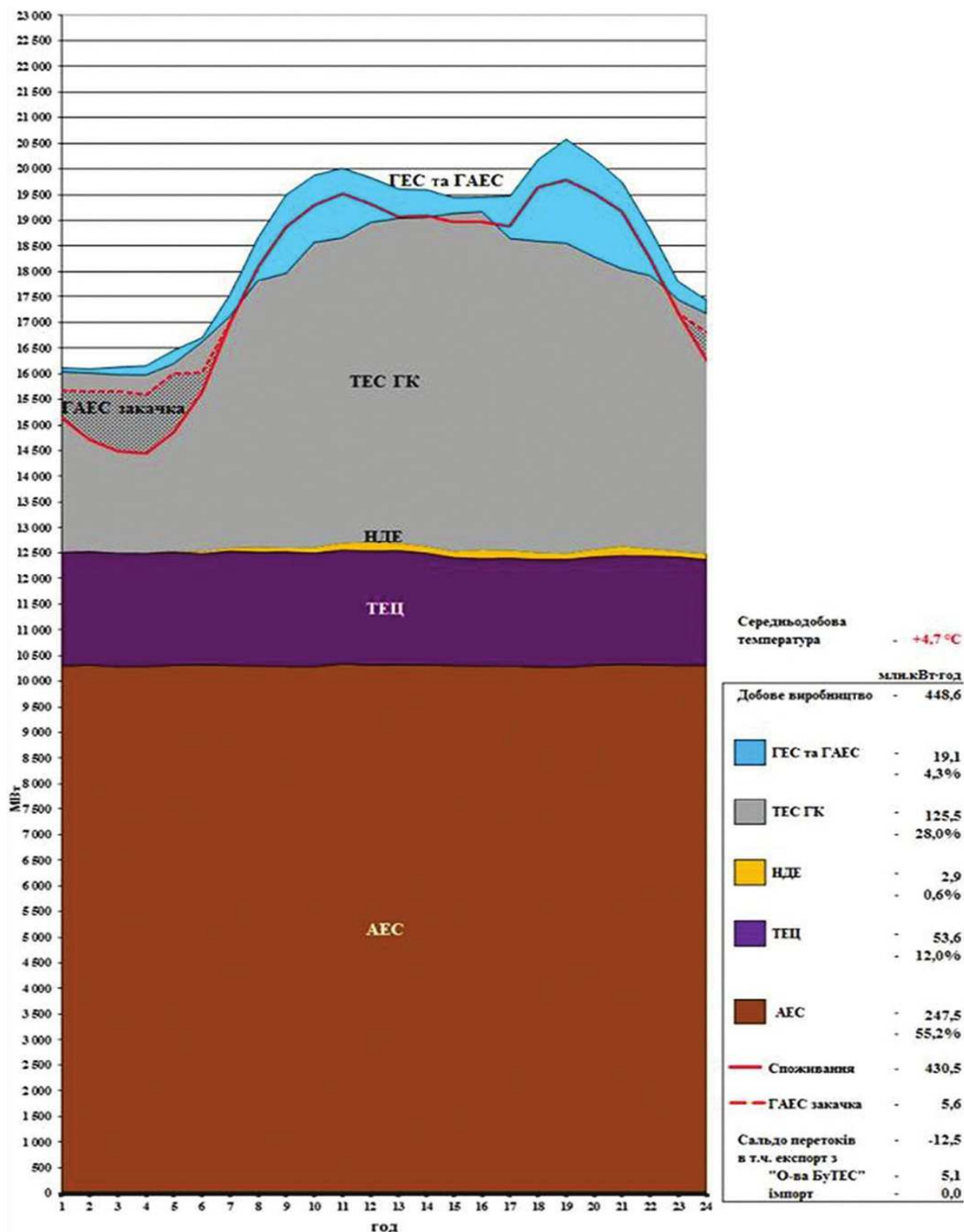


Рисунок 3 – Добовий графік виробництва та споживання електроенергії в ОЕС України за 1 березня 2016 року

ються ГАЕС. Під час піку споживання близько 19:00 сумарна потужність усіх видів генерування досягла 20 500 МВт, після чого зменшується до нічного мінімуму. Без роботи ГАЕС у насосному режимі в період нічного мінімуму споживання електроенергії необхідно було би значно зменшувати потужність енергоблоків ТЕС або зупиняти їх роботу. А це, зазвичай,

негативно вплине на їх технічний стан, економічні показники та суттєво збільшить викиди шкідливих речовин в атмосферне повітря. Відомі способи підвищення маневровості вугільних енергоблоків ТЕС [4] технологічними засобами на сьогоднішній день не можуть вирішити вказаних проблем.

Добова нерівномірність пояснюється неоднаковим споживанням різними групами споживачів (промислові, комунальні, спортивні, побутові та ін.). Вона характеризується коефіцієнтом добового навантаження f_{min} – відношенням мінімального W_{min} до максимального: W_{ma} навантаження

$$f_{min} = W_{min} / W_{max}, \quad (1)$$

Різниця між максимальним і мінімальним навантаженням енергосистеми визначає діапазон регулювання навантаження працюючих агрегатів:

$$\alpha_{рег.} = W_{max} - W_{min} \quad (2)$$

Відношення цієї різниці між максимальним і мінімальним навантаженням до максимального навантаження споживачів називається коефіцієнтом змінної частини графіка навантаження, або коефіцієнтом регулювання

$$f_{zmin} = (W_{max} - W_{min}) / W_{max} = 1 - f_{min}. \quad (3)$$

Коефіцієнт густини навантаження визначають як відношення середнього навантаження до максимального

$$f_{cp} = W_{cp} / W_{max}, \quad (4)$$

де $W_{cp} = \int_0^{T_{раб}} W dT / T_{раб}$ або в дискретному

$$\text{вигляді } W_{cp} = \frac{\sum_{i=0}^n W_i T_i}{T_{раб}},$$

$T_{раб}$ – число годин роботи генеруючого обладнання.

Крім того, для оцінки ефективності роботи окремого енергоблока використовується коефіцієнт робочого часу на добу $e_{доб.} = T_{роб} / 24$, а мобільність характеризує швидкість набору або спаду навантаження $\omega = \Delta W / \Delta T$.

Генеруюче обладнання об'єктів великої енергетики України, з одного боку, погано пристосоване до роботи у пікових режимах споживання, а, з другого, деякі із них, а особливо об'єкти теплового генерування, майже повністю вичерпали свій проектний ресурс. Цей факт, крім негативного навантаження, має ще додаткову перевагу – з'явився сприятливий момент, щоб розпочати технічне переоснащення генеруючих потужностей у сфері теплової енергетики, усуваючи при цьому диспропорцію між потужностями, які працюють у базовому, напівпіковому та піковому навантаженнях, та позбутися одночасно з цим деяких недоліків традиційного паротурбінного генерування.

Виділення невирішеної задачі. Пікові навантаження в енергосистемах покриваються за допомогою спеціальних пікових електростанцій, які розташовують поблизу споживачів, що характеризуються неритмічним виробничим циклом, Пікові електростанції проєктують пристосованими до частих зупинок та пусків, їх вартість є значно нижчою за базові, а кількість годин використання потужності є відносно не-

великою. Пікові навантаження можна покривати за рахунок експлуатації електростанцій із застарілим обладнанням, гідроелектростанцій. Однак, часті пуски і зупинки застарілого обладнання є затратним вирішенням проблеми, а також робота обладнання у нестационарних режимах призводить до значного викиду шкідливих речовин.

Можливі шляхи вирішення поставленого завдання. Відомі газотурбінні установки для генерування електричної енергії на території України не використовуються з невідомих причин, хоча цей спосіб генерування має ряд переваг над традиційним паровим генеруванням. До таких переваг відносяться висока маневровість та мобільність, а також значно менший об'єм шкідливих речовин, які викидаються в атмосферне повітря [5].

Технологічні методи поліпшення маневрових властивостей енергетичних блоків теплових електростанцій проаналізовані в роботах [3,4], але у них відсутня прив'язка цих методів до екологічних показників, що на даний момент часу стає більш актуальним.

Найдоцільніше покриття пікових навантажень здійснювати установками, що працюють на спеціальному турбінному паливі, яке через його високу вартість слід замінити альтернативним.

На нашу думку, поєднання в одній установці парового та газового способів генерування зможе вирішити для України дві основні проблеми теплової енергетики, що існують на сьогоднішній день:

- підвищити її ефективність, маневровість та мобільність,
- поліпшити екологічну ситуацію в зоні розташування об'єктів теплової енергетики.

У зв'язку з тим, що запаси низькоякісного вугілля в Україні переважають запаси антрацитного, то актуальним стає використання для роботи парового та газового циклів продуктів його газифікації.

Важливе значення має коефіцієнт використання максимального навантаження, що визначається за таким виразом:

$$g_{max} = \frac{W_{cp} e_{доб}}{W_{max}} = f_{cp} e_{доб}, \quad (5)$$

а також кількість годин використання максимального навантаження

$$T_{max} = \mathcal{E}_{доб} / W_{max} = 24 g_{max} = 24 f_{cp} e_{доб}, \quad (6)$$

де $\mathcal{E}_{доб.}$ – добове виробництво електричної енергії

Інтенсивність $P_{азр.}$ викидання шкідливих речовин окремим технологічним агрегатом, що характеризує його потужність як джерела забруднення, визначається з виразу

$$P_{азр.} = V_{сум} * T_{сум},$$

де $V_{сум}$ – потужність викидання окремого джерела,

$T_{сум}$ – сумарний час його роботи за звітний період (квартал, півріччя чи рік).

При переході до оцінки екологічної небезпеки окремого технологічного процесу автори [6, 7] пропонують, при продуктивності технологічної установки N визначити показник інтенсивності технологічного режиму за формулою

$$T_{реж} = \frac{T_{агр}}{N} = \frac{V_{сум} T_{сум}}{N} . \quad (7)$$

При оцінці забруднення атмосферного повітря об'єктами теплової енергетики, на нашу думку, доцільніше користуватися не показником режиму спалювання твердого чи газоподібного палива, а кількістю виробленої електричної енергії за відповідний період часу. Тоді з врахуванням цього твердження вираз (7) буде мати вигляд

$$T_{реж} = \frac{V_{сум} T_{сум}}{\mathcal{E}} . \quad (8)$$

Слід зауважити, що будь-який графік навантаження (добовий, тижневий, сезонний чи річний) складається із двох частин: базової та змінної. Перша частина характеризується стаціонарністю, при цьому викиди шкідливих речовин стабільні. А змінна частина навантаження супроводжується значно більшими об'ємами викидів шкідливих речовин в атмосферне повітря через нестационарні перехідні процеси. Звичайна ТЕС може викидати на рік тільки по одній димовій трубі близько 100 тис. тонн оксидів азоту. Частка викидів під час перехідних режимів приблизно на 20-30 % перевищує усталені режими роботи.

Висновки

Відомі показники маневровості, мобільності та екологічності можуть бути використані для порівняння ефективності роботи комбінованих парогазотурбінних енергетичних установок. Деякі з наведених характеристик необхідно обчислювати окремо для парового генерування (блока стандартної потужності) як базовий варіант, а потім для комбінованого блока (парової і газової частини). Тільки після порівняння питомих викидів на одиницю виробленої енергії можна робити висновки про зниження екологічної небезпеки. Водночас діапазон навантаження буде ширшим для комбінованого способу генерування, а його мобільність вища.

1 Шавлаков О. Проблеми формування прогнозного балансу електроенергії / О.Шавлаков // ЕнергоАтом України. – 2016. – № 1(42), січень-квітень. – С. 10-12.

2 Варламов Г.Б. Теплоенергетичні установки та екологічні аспекти виробництва енергії / Г.Б. Варламов, Г.М.Любчик, В.А.Маляренко. – Київ: Політехніка, 2003. – 225 с.

3 Прокопенко А.Е. Стационарные переменные и пусковые режимы энергоблоков ТЭС / А.Е.Прокопенко, И.С. Мысак. – М.: Энергоиздат, 1990. – 345 с.

4 Мысак И.С. Повышение маневренности энергоблоков / И. С. Мысак, И.А.Кусков К. – М.: Техніка, 1982. – 135 с.

5 Семчук Я.М. Екологічні та техніко-економічні аспекти спільної роботи парогазотурбінних енергетичних установок / Я.М.Семчук, М.П.Кулик // Нафтогазова енергетика. – 2008. – № 1(6). – С. 65-68.

6 Кулик М.П. Порівняльний аналіз критеріїв екологічної безпеки промислових підприємств / М.П.Кулик // Наукові вісті Інституту менеджменту та економіки "Галицька академія". – 2006. – № 1(9). – С. 72-75.

7 Сігал І.Я. Оцінка впливу різних джерел газових викидів на забруднення атмосферного повітря / І.Я.Сігал, М.О.Гуревич // Укр. хім. журнал. – 1971. – № 2. т. 37. – С. 139-144.

Стаття надійшла до редакційної колегії
18.05.17

Рекомендована до друку
професором **Костишиним В.С.**
(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)
канд. техн. наук **Винницьким І.П.**
(ПАТ «ЛьвівОРГРЕС», м. Львів)