

РОЗДІЛ 6. СУЧАСНИЙ СТАН РОЗВИТКУ ГАЛУЗІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ ТА ЕНЕРГЕТИКИ

DOI <https://doi.org/10.36059/978-966-397-247-3-12>

Савченко Н. П.

кандидат технічних наук,

доцент кафедри електричної інженерії

ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»

м. Покровськ, Донецька область, Україна;

доцент кафедри міського будівництва та господарства

Донбаська національна академія будівництва і архітектури

м. Краматорськ, Донецька область, Україна

РЕГУЛЮВАННЯ ГРАФІКА НАВАНТАЖЕННЯ СПОЖИВАЧА-РЕГУЛЯТОРА З ГІБРИДНИМИ СИСТЕМАМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

Нерівномірність режиму електроспоживання, а отже і виробництва електроенергії у енергосистемі країни є негативним фактором, який частково можливо усунути залученням споживачів-регуляторів до вирівнювання графіка навантаження енергосистеми. Регулювання графіків навантаження споживачів-регуляторів є основою ефективного управління енергосистемою країни. Застосування інтелектуальних гібридних систем електропостачання з джерелами відновлюваної енергії та інтегрованими в них системами зберігання енергії є новітнім, високотехнологічним методом регулювання навантаження окремого споживача, який потребує подальшого розвитку. Також важливим питанням для забезпечення енергоефективності є організація гібридних систем електропостачання, а саме по-перше доцільність та енергоефективність складових такої системи і по-друге забезпечення ефективного алгоритму керування за допомогою інтелектуальних систем. Реалізація запропонованого методу регулювання навантаження розглянута окремо для кожної групи споживачів електричної енергії з урахуванням

типових графіків електричного навантаження з метою коригування складу гібридної системи електропостачання.

Вступ

Ефективність роботи Об'єднаної електроенергетичної системи (ОЕС) країни повністю залежить від забезпечення балансу між спожитою й виробленою електричними станціями енергією. Режими роботи енергосистеми країни наочно представляються графіками електричного навантаження (ГЕН). Оскільки енергосистема несе значні додаткові витрати, викликані нерівномірністю графіка електричного навантаження то питання регулювання ГЕН є актуальними.

Загальний вигляд ГЕН визначає режим роботи енергосистеми, а саме найбільш інформативним є добовий графік навантаження енергосистеми. Так графік зимового максимуму характеризується найбільшим добовим навантаженням енергосистеми, а графік літнього мінімуму характеризується найменшим навантаженням. Форма добового графіка навантаження енергосистеми залежить від багатьох факторів, але завжди має характерні максимуми та спади, визначається характером і тривалістю роботи споживачів електроенергії вона.

Складовими ГЕН енергосистеми є ГЕН споживачів, які здебільшого є нерівномірними. Регулювання параметрів графіків навантаження споживачів дозволить використовувати їх в якості регуляторів навантаження (споживачів-регуляторів) електричних мереж, а це в свою чергу призведе до зменшення фінансових витрат з виробництва електроенергії і підвищенню стабільності та надійності роботи електричних мереж. Враховуючи структуру генерації та споживання електроенергії країни у монографії були виявлені основні категорії споживачів, що мають суттєвий вплив на роботу енергосистеми та можуть бути регуляторами її навантаження.

Вдосконалення існуючих методів регулювання ГЕН можливе за рахунок впровадження інтелектуальних гібридних систем електропостачання споживачів-регуляторів, унаслідок цього у монографії запропоновані їх оптимальні структури.

1. Методи регулювання графіків навантаження

Оскільки енергосистема несе значні додаткові витрати, викликані нерівномірністю режиму електроспоживання, а отже і виробництва електроенергії, одним з дуже перспективних шляхів

економії паливно-енергетичних ресурсів, що витрачаються на вироблення електроенергії, є залучення споживачів-регуляторів до вирівнювання графіка навантаження енергосистеми.

У загальному випадку добові ГЕН електроенергетичних систем (ЕЕС) складаються з графіків окремих споживачів, які, як правило, нерівномірні. При цьому відомо, що щільність і рівномірність графіка навантаження має сильний вплив на економічні показники ЕЕС. Зміна графіків електричних навантажень (споживаної потужності) споживачів дає можливість суттєво скорегувати сумарний графік електричного навантаження ЕЕС в бік зниження потреби в генеруючих потужностях і поточних витрат на виробництво і передачу електроенергії

Типовий добовий графік електричного навантаження (ГЕН), що відбиває добові ритми життя суспільства й характерний для багатьох енергосистем (графіки різних енергосистем відрізняються не стільки формою, скільки рівнем навантаження), наведений на рис. 1. На такому графіку виділяють три тимчасові зони: зону мінімального навантаження (нічний час, або нічний провал) з потужністю не більш $P_{\min}$, зону середнього, або напівпікового навантаження з потужністю $P_{\text{нп}}$, такою, що $P_{\min} \leq P_{\text{нп}} \leq P_{\max}$, і зону максимального, або пікового навантаження з потужністю не більш $P_{\max}$. Напівпікова зона характеризується однократним протягом доби значним зростанням навантаження в ранковий час і його глибоким спадом наприкінці доби, а пікова – рядом відносно невеликих підйомів (до рівня максимального навантаження) і спадів (до рівня напівпікової зони) навантаження в денний час доби. Зазвичай присутні один або два максимуми споживання електроенергії: ранковий і вечірній. Перший зв'язаний найчастіше з ранковою зміною роботи промислових підприємств, а другий являє собою сполучення споживання вечірньої зміни підприємств зі споживанням електроенергії в житловому секторі й сфері побутового обслуговування населення. Тому другий пік нерідко перевищує по своїй величині перший [1].

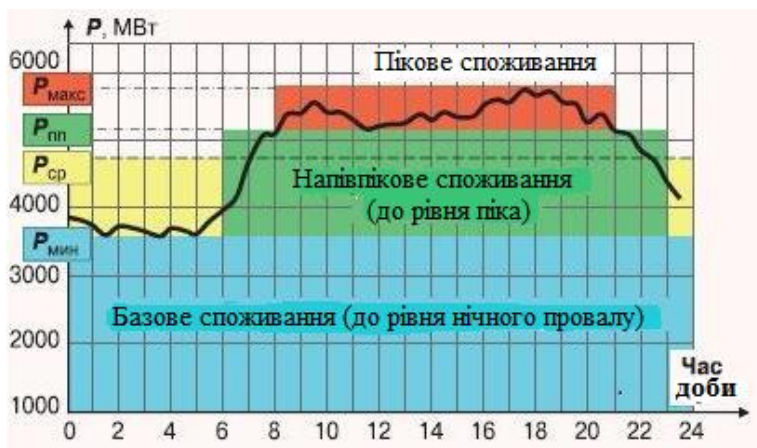


Рис. 1. Типовий добовий ГЕН енергосистеми

Для визначення рівномірності ГЕН необхідно проаналізувати наступну систему аналітичних характеристик:

1. Коефіцієнт нерівномірності.

$$\alpha = P_{\min} / P_{\max}, \quad (1)$$

де $P_{\min}$ і $P_{\max}$ – відповідно мінімальне та максимальне електричне навантаження.

2. Коефіцієнт заповнення.

$$\beta = P_{\text{ср}} / P_{\max}, \quad (2)$$

де $P_{\text{ср}}$ – середнє значення електричного навантаження.

3. Максимальний діапазон регулювання навантаження.

$$\Delta P_{\max} = P_{\max} - P_{\min}, \quad (3)$$

4. Напівпіковий діапазон регулювання навантаження.

$$\Delta P_{\text{нп}} = P_{\text{нп}} - P_{\min}, \quad (4)$$

5. Піковий діапазон регулювання навантаження.

$$\Delta P_{\text{п}} = P_{\max} - P_{\text{нп}}. \quad (5)$$

Згідно наведених вище характеристик ГЕН буде рівномірний якщо в системі характеристик матимемо наступні рівняння:

$$\alpha = \beta = 1, \quad (6)$$

$$P_{\min} = P_{\max} = P_{\text{ср}}, \quad (7)$$

$$\Delta P_{\max} = \Delta P_{\text{п}} = \Delta P_{\min} = 0. \quad (8)$$

Ідеально рівномірних ГЕН не існує, тому реальне наближення до рівномірності ГЕН з характеристикою $\alpha = 0,9$ розглядається як високий показник.

Характеристики ГЕН залежать від наступних факторів: добові ритми життя суспільства, сезонні зміни енергоспоживання; тривалість світового дня; природна освітленість; метеофактори (температура повітря; вологість, тиск); належність доби до певного типу дня, тижня та ін.[1;2].

Особливістю об'єднаної енергосистеми України є нерівномірний характер добових ГЕН, тому цій проблемі приділяється багато уваги та розроблено декілька основних методів та способів регулювання навантаження.

За формою графіка навантаження існує два способи регулювання ГЕН.

Ущільнення ГЕН виконується підключенням додаткових електроприймачів в години мінімуму навантаження. За рахунок цього середнє за період навантаження зростає, а максимум її залишається незмінним. Тим самим щільність графіка зростає, а нерівномірність зменшується. Недоліком ущільнення ГЕН є зростання площі під графіком навантаження й відповідно зростання кількості виробленої електроенергії [3].

Ущільнення ГЕН застосовують в надлишкових або збалансованих по активній потужності енергосистемах.

Вирівнювання ГЕН виконується перенесенням часу роботи електроприймачів з годин максимуму на години мінімуму навантаження. Вироблення електроенергії і середнє за період навантаження при цьому залишаються незмінними, максимум знижується, а мінімум зростає, тобто зростає щільність графіка навантаження і зменшується його нерівномірність.

Загальні методи регулювання ГЕН можливо поділити на три види за реалізацією [3]:

1. Методи засновані на загальноорганізаційних зовнішніх заходах держави і внутрішньогалузевих заходів у промисловості.

До загальноорганізаційних заходів слід віднести розподіл вихідних днів промислових підприємств, розпорядок початку роботи, обідніх і міжзмінних перерв промислових підприємств, а також зрушення годинникової стрілки в літній час. Проте ці заходи безпосередньо зачіпають соціально-побутові умови життя суспільства і тому повинні використовуватися достатньо обережно і продумано.

2. Створення оптимальної структури генераторів потужностей енергосистеми. Тобто покриття ГЕН засобами ЕЕС, а також об'єднання ЕЕС і акумуляція енергії в години провалу графіка навантаження і видача її в години максимуму ЕЕС, тобто використання накопичувачів енергії (ГАЕС, маховики і ін.).

3. Використання перетоків з сусідніми енергосистемами.

4. Залучення споживачів до вирівнювання графіки навантаження енергосистеми за рахунок адміністративних (обмежуючих) та економічних (стимулюючих) заходів.

Більш деталізована класифікація методів регулювання ГЕН має вигляд [4]:

1. Примусове регулювання електроспоживання (обмеження по потужності в години максимуму навантаження і лімітацію енергії на фіксованих періодах часу);

2. Зміщення навантаження в часі, у тому числі і перенесення її з годин максимуму на години мінімуму;

3. Політика енергозбереження, тобто фактично вертикальне маневрування електроспоживанням.

4. Регулювання електроспоживання за домовленістю між енергосистемою і споживачами електроенергії (виявлення і використання споживачів-регуляторів);

5. Формування вимушених графіків навантаження за принципом зустрічного регулювання електроспоживання для плавного регульованих споживачів-регуляторів;

6. Тарифне стимулювання регулювання графіка навантаження.

Перспективними методами регулювання навантаження, що потребують подальшого розвитку є метод створення оптимальної структури генераторів потужностей енергосистеми за рахунок альтернативної енергетики та метод залучення споживачів до вирівнювання ГЕН з гібридними системами електропостачання.

Задля виявлення впливу різних категорій споживачів на ГЕН енергосистеми необхідним є аналіз структури генерації та споживання електричної енергії, яка наведена на рис. 2 [5].

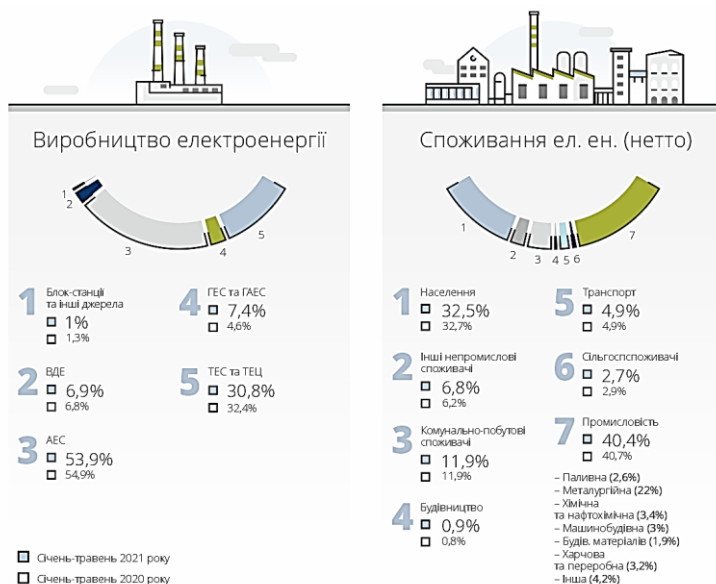


Рис. 2. Структура генерації та споживання електроенергії в економіці України

Найбільша частка у споживанні електричної енергії належить промисловим споживачам, вона є практично незмінною у відсотковому еквіваленті при аналізі споживання у динаміці.

Другою впливовою категорією за кількістю споживання електроенергії є населення. Частка споживання електричної енергії населенням з року в рік має позитивну динаміку зростання.

Також вагомим споживанням електричної енергії характеризуються комунально-побутові споживачі. Тенденція росту електроспоживання цієї категорії споживачів зберігається й по сьогоднішній день.

Фактично розглянуті вище три категорії споживачів є основними споживачами електричної енергії і навіть часткове регулювання їх графіків навантаження вплине позитивно на загальний ГЕН енергосистеми. Таким чином, залучення цих

споживачів до процесу регулювання навантаження енергосистеми за рахунок регулювання особистих графіків навантаження з використанням новітніх технологій є пріоритетним напрямком розвитку енергетики.

Споживачі-регулятори для регулювання ГЕН застосовують одночасно ущільнення графіка навантаження та його вирівнювання. Такі споживачі, здатні працювати в узгодженому з ЕЕС режимі, що сприяє заповненню провалів і (або) зняття піків графіка електричних навантажень (добових, тижневих, річних) [6].

Фізично можна виділити два основних види споживачів-регуляторів [6]:

- спеціальні споживачі-регулятори, що підрозділяються на системні і продуктові;
- споживачі-регулятори на базі звичайних виробництв, що підрозділяються на ті що здійснюють регулювання на основі наявних резервів і ті що вимагають установки додаткового обладнання.

До спеціальних споживачів-регуляторів відносяться теплові, електричні та інші види накопичувачів енергії, а також промислові, побутові та сільськогосподарські виробництва з попитом на електроенергію тільки в періоди провалів графіка навантаження. При цьому системні споживачі-регулятори споживають електроенергію з ЕЕС в провали графіка і видають її назад в години максимуму навантаження (ГАЕС, ПАЕС, акумулятори тепла на АЕС, надпровідні індукційні накопичувачі, кінетичні енергонакопичувачі), а продуктові витрачають електроенергію в провали графіка на виробництво власної продукції без зворотного видачі [6].

Наведемо більш детальну класифікацію споживачів-регуляторів по можливості управління режимами енергосистеми [6]:

а) електроприймачі, що мають можливість акумулювати енергію (акумуляційні електродкотли, інерційні маховики, печі, промислові холодильники, індуктивні накопичувачі, ГАЕС в режимі споживання та ін.);

б) споживачі-регулятори:

- перший тип споживача-регулятора відповідає ситуації, коли споживач може повністю забезпечити роботу технологічного процесу у непіковому режимі електроспоживання (умова 1). Такий режим його роботи не призводить до втрат (умова 2) і не

вимагає додаткових витрат на організацію внепікового режиму електроспоживання (умова 3).

- другий тип споживача-регулятора відрізняється від першого типу тим, що споживач може тільки частково (в часі) функціонувати у внепіковому режимі при виконанні умов 2 і 3 (умова 4).

- третій тип споживача-регулятора відповідає режиму роботи споживача, коли виконуються умови 1 і 2, і виникає необхідність витрат додаткових коштів для забезпечення внепікового режиму електроспоживання, тим часом, як економія коштів від переведення його на новий режим перевищує додаткові витрати (умова 5).

- четвертий тип споживача-регулятора відповідає режиму роботи, коли виконуються умови 2, 4 і 5.

- до споживачів-регуляторів примусового режиму (п'ятий тип) віднесені споживачі електричної енергії, які працюють при виконанні умов 1 і 2 і під час функціонування якого виникають збитки.

Таким чином, знаючи до якого класу належить той чи інший електроприймач, можна скласти перелік заходів для підвищення енергоефективності та зменшення втрат, а також досягти оптимального впливу споживачів на режим і надійність роботи енергосистеми [6].

Вирівнювання графіка навантаження енергосистеми не може бути мимовільним, випадковим процесом, а вимагає проведення цілеспрямованих заходів з відповідним матеріальним і фінансовим забезпеченням. Проте що при відсутності в енергосистемі збалансованої структури генеруючих потужностей головною можливістю вирівнювання графіків може стати режимна взаємодія енергосистеми зі споживачами на основі адміністративних або економічних заходів. Перші пов'язані з примусовим обмеженням навантаження споживачів в певні години доби і приносять споживачам прямий і непрямий збиток, який може суттєво перевищити виграш енергосистеми від ефекту вирівнювання добового графіка навантаження. В цьому випадку неефективність адміністративних заходів призводить до збитків для держави в цілому, хоча енергосистема і може тимчасово опинитися у виграші [4].

Шлях економічної зацікавленості споживачів електроенергії пов'язаний з введенням в стосунки між енергосистемою і

споживачами ефективної системи диференційованих по часу доби тарифів на електроенергію – погодинних тарифів [4].

Внаслідок масового і «доброго» регулювання з боку споживачів енергосистема хоча і зменшить свій грошовий збір за відпущену електроенергію (так звані доходи, що випадають), але ці фінансові втрати виявляться компенсованими зниженням вартості її основних фондів, експлуатаційних витрат та інших витрат, що визначають в цілому рівні тарифів на електроенергію [4].

Використання споживачів електричної енергії у якості регуляторів потребує впровадження нових технологій, побудованих на інтелектуалізації електричних мереж та гібридних систем електропостачання з альтернативними джерелами електроенергії. Початковий етап впровадження інтелектуальних технологій (Smart Grid) в енергетику – це «розумні» прилади, що дозволяють вирішити завдання єдиної системи енергообліку. Наступним етапом є розробка пристроїв і способів розподіленої генерації або локальних електричних мереж і об'єднання їх в єдину мережу подібно Інтернету [7].

Локальні електричні мережі, як правило, мають у своєму складі джерело відновлюваної енергії, накопичувачі енергії і системи інтелектуального управління [7].

В якості джерел відновлюваної енергії в таких мережах використовується як правило, енергія вітру і сонця, однак при їх використанні можливі суттєві коливання енергії, які можуть викликати нестабільність роботи системи [8,9]. Тому накопичувачі енергії скомпоновані у систему зберігання енергії та інтегровані у систему електропостачання з альтернативними джерелами електроенергії стають важливим засобом оптимізації режимів енергосистеми, підтримки розподіленої енергетики [10].

Потенційні можливості застосування накопичувачів електроенергії [10]:

1. Управління режимами навантаження – розряд накопичувача під час піку навантаження і зарядка в нічний час (вирівнювання денного і нічного графіків навантаження).

2. Управління потоками потужності – живлення місцевих навантажень, коли з цим не справляється загальна мережа.

3. Допомога установкам, що використовують відновлювальні джерела енергії – вирівнювання графіка подачі потужності.

4. Підвищення можливості передачі енергії – участь в управлінні стійкістю, регулюванні напруги, частоти і реактивної потужності, для підвищення стабільності роботи мереж.

5. Вирівнювання графіка навантаження в мережах зі значною часткою розподілених джерел енергопостачання.

6. Підвищення якості електроенергії – підтримка стабільності напруги установкою накопичувачів як на живлячих фідерах, так і безпосередньо у споживачів, особливо при різкозмінному характері навантаження.

Таким чином, впровадження гібридних систем електропостачання для споживачів як промислового так побутового характеру є вирішенням проблеми регулювання як індивідуальних так і групових графіків навантаження та використання їх у якості регуляторів навантаження енергосистеми з метою усунення проблем розбалансування.

2. Оптимальні параметри гібридної системи електропостачання з системою зберігання енергії та альтернативними джерелами енергії

Застосування гібридних систем електропостачання є рішенням багатьох задач у енергетиці, а насамперед вирівнювання графіків середньодобового енергоспоживання споживачів-регуляторів за рахунок паралельної роботи з мережею у період пікових навантажень.

Вибір оптимального варіанту гібридної системи електропостачання передбачає облік багатьох взаємопов'язаних факторів і проводиться за допомогою серії уточнюючих розрахунків [11].

До основних параметрів гібридної системи, що підлягають обґрунтуванню відносяться[11]:

- оцінка енергетичних потреб споживача;
- оцінка економічного потенціалу відновлюваного енерго-ресурсу (вітру і сонячного випромінювання);
- параметри енергетичного обладнання;
- встановлена потужність системи і її складових;
- параметри комунікацій.

В залежності від складу джерел живлення гібридні системи поділяються на наступні три види [12]:

1) Автономна вітро-сонячна електростанція (ВСЕ). Такі станції працюють при відсутності зовнішньої мережі і містять сонячну

фотоелектричну станцію (СФЕС), вітроенергетичну станцію (ВЕС) і систему накопичення енергії. Крім того, такі автономні енергетичні комплекси для підвищення надійності роботи можуть містити дизельні, бензо- або газопоршневі електростанції.

2) Мережева вітро-сонячна електростанція. Такі гібридні електростанції працюють синхронізовано з зовнішньої електричної мережею. В основному режимі функціонування споживачі отримують енергію від ВДЕ, а при недостатньому її кількості вона надходить від зовнішньої мережі, а при її надлишку – віддається в промислову мережу. В цьому режимі традиційні автономні джерела електроенергії (АДЕ), як правило, не використовуються.

3) Система резервного електропостачання. В основному режимі функціонування в таких системах джерелом електроенергії для споживачів є зовнішня електрична мережа. при пропажі зовнішньої мережі, джерелом живлення для споживачів є ВДЕ і система зберігання електроенергії або традиційні АДЕ.

Таким чином, рішенням оптимального складу гібридних систем електропостачання є наявність таких складових як традиційне джерело енергії, а саме міська електрична мережа, нетрадиційне джерело енергії, система накопичення та зберігання електричної енергії і система керування генерацією та споживанням електроенергії. Для підвищення енергоефективності гібридної системи електропостачання більша частина споживаної енергії повинна використовуватися від встановленого альтернативного джерела енергії. Надлишки енергії, отриманої від альтернативного джерела енергії, повинні накопичуватися у системах зберігання енергії. Широке впровадження гібридних систем електропостачання повинно ґрунтуватися в першу чергу на привабливості для споживачів, яка полягає у підвищенні енергоефективності, у збільшенні незалежності від режимів роботи розподільчих електричних мереж, у підвищенні якості та надійності електропостачання, у зменшенні витрат на закупівлю електроенергії та теплоносіїв.

Узагальнена структурна схема гібридної системи електропостачання наведена на рис.3, перелік її складових зміються в залежності висунутих споживачем вимог продуктивності.

Продуктивність наведеного гібридного комплексу завжди залежить від зовнішніх факторів, таких як географічне розташування регіону; кліматичні та погодні умови; тривалість світлової доби. Обраний набір обладнання гібридної системи у різних зовнішніх умовах демонструє відмінні друг від друга показники, тому кожен випадок потребує індивідуального підходу. Для ВДЕ важливо те, що комбінування вітряної та сонячної електростанцій особливо ефективно при цілорічному характері споживання, оскільки взимку генерація сонячної енергії значно падає, при цьому, як правило, зима – саме має більше вітряного часу.

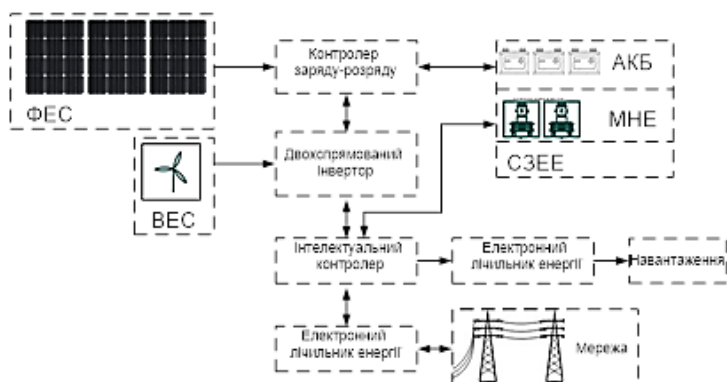


Рис. 3. Узагальнена структурна схема гібридної системи електропостачання: ФЕС – фотоелектрична станція; ВЕС – вітроелектрична станція; СЗЕЕ – система зберігання електроенергії; МНЕ – механічні накопичувачі енергії; АКБ – акумуляторні батареї

Особливостями фотоелектричних перетворювачів і вітротурбін є зміни їх режимів роботи в залежності від енергетичного потенціалу первинного енергоносія і потужності, що йде на навантаження. Енергоефективність цих режимів може істотно відрізнятись. Для максимального використання потужності і енергії первинного енергоресурсу і, відповідно, встановленої потужності енергетичного обладнання слід формувати оптимальні робочі режими вітрових і сонячних електростанцій. Основним фактором цілеспрямованого впливу на

режими роботи розглянутих електростанцій є електричне навантаження. Величина навантаження може регулюватися за певними законами в процесі заряду накопичувачів електричної енергії, або в процесі передачі потужності в електроенергетичну систему [13].

При реалізації гібридного електропостачання від декількох джерел постає завдання розподілу режиму роботи і ступеня завантаження електростанцій в часі.

Розробка алгоритму ефективного управління робочими режимами гібридної системи електропостачання будівлі базується на виборі схемної конфігурації системи. Маємо наступні конфігурації [13]:

1. Роздільна робота електромережі і ФЕС з накопичувачем електроенергії (рис. 4, а).
2. Робота ФЕС паралельно з електромережею (рис. 4, б).
3. Гібридний варіант, що передбачає можливість реалізації роздільної та спільної роботи ФЕС і електромережі (рис. 4, в).
4. Робота ЕМ, що передбачає можливість реалізації електропостачання лише з використанням системи зберігання електричної мережі (рис. 4, г).
5. Робота ФЕС паралельно з електромережею та спільною можливістю використання СЗЕЕ (рис. 4, д).

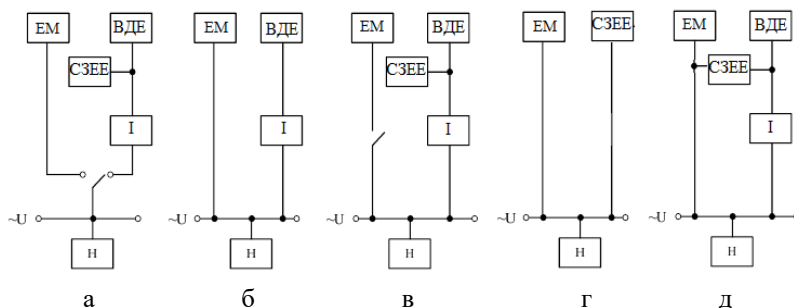


Рис. 4. Схемна конфігурація гібридної системи електропостачання: ВДЕ – Відновлювальні джерела енергії, ЕМ – електромережа, СЗЕЕ – система зберігання електричної енергії, Н – навантаження, U – шина змінного струму, І – інвертор

Алгоритм функціонування гібридної системи електропостачання з гібридним інвертором може бути описаний за

допомогою функцій алгебри логіки. При цьому необхідно розділяти системи генерації та споживання.

Для системи генерації в якості незалежних змінних можна вибрати наступні величини:

1. Потужність генерації ВДЕ. Дискретне значення $X1 = 1$ відповідає перевищенню потужності ВДЕ над поточним електроспоживанням навантаження. $X1 = 0$ відповідає нестачі генерації.

2. Стан СЗЕЕ: $X2 = 1$ якщо вона зберігає енергію, $X2 = 0$ якщо кількість енергії нижче встановленого рівня.

Керуючі впливи здійснюються за допомогою логічних функцій:

$U1 = 1, U1 = 0$ включає або відключає батарейний режим роботи гібридного інвертора;

$U2 = 1, U2 = 0$ включає або відключає мережевий режим роботи інвертора ВДЕ;

$U3 = 1, U3 = 0$ включає або відключає електромережу;

$U4 = 1, U4 = 0$ включає складові СЗЕЕ на заряд або розряд.

Логіка функціонування гібридної системи електропостачання в залежності від зміни незалежних змінних наведена в таблиці 1.

Таблиця 1

X1	X2	Y1	Y2	Y3	Y4
0	0	0	1	1	1
0	1	0	1	0	0
1	0	1	0	0	1
1	1	1	0	0	1

Сформований алгоритм у вигляді функцій алгебри логіки:

$$Y1 = X1 \& \bar{X}2 \vee X1 \& X2 = X1, \quad (9)$$

$$Y2 = \bar{X}1 \& \bar{X}2 \vee \bar{X}1 \& X2 = \bar{X}1, \quad (10)$$

$$Y3 = \bar{X}1 \& \bar{X}2, \quad (11)$$

$$Y4 = \bar{X}1 \& \bar{X}2 \vee X1 \& \bar{X}2 \vee X1 \& X2 = X1 \vee \bar{X}2. \quad (12)$$

Таким чином, можливо сформулювати принципи інтелектуального управління гібридними системами електропостачання, які можуть слугувати вихідною інформацією для розробки схем з використанням конкретного обладнання [13].

Принципи розподілу навантаження між генеруючими потужностями представлено на рис. 3 гібридної системи електропостачання наступні:

1. Визначається максимальна потужність ФЕС і ВЕС генерації електроенергії для потреб споживача.

2. Визначаються втрати активної потужності при передачі сгенерованої ФЕС і ВЕС електроенергії до споживача.

3. Якщо сумарна потужність ФЕС і ВЕС перевищує або дорівнює навантаженню споживача, то усе навантаження покривається за рахунок ВДЕ.

4. Якщо спостерігається надлишок потужності, то вона спочатку надходить на зарядку накопичувачів у СЗЕЕ, а після повного заряду надлишки електричної енергії віддаються у електричну мережу.

5. Якщо сумарна потужність ВДЕ менше навантаження споживачів, то недолік потужності покривається за рахунок накопичувачів, а при їх повному розряді (заряд 30% від номінального) перемикається на споживання з електричної мережі.

Математичний опис наведених вище принципів розподілу навантаження між джерелами енергії у гібридній системі:

– максимально можлива генерація електричної енергії ВЕС:

$$P_{BEC}(t) = \frac{\rho(t)}{2} \cdot F_{BEC} \cdot V_{\theta}^3(t) \cdot C_p, \quad (13)$$

де $\rho(t)$ – щільність повітря, кг/м³; $V_{\theta}(t)$ – швидкість вітру на висоті встановлення вітроколеса, м/с; F_{BEC} – площа ометання, м²; C_p – коефіцієнт потужності, в.о.; (t) – поточний момент часу.

– максимально можлива генерація електричної енергії ФЕС:

$$P_{FEC}(t) = I_c(t) \cdot S \cdot k_p \cdot \eta, \quad (14)$$

де $I_c(t)$ – інтенсивність сонячного випромінювання, Вт/м²; S – площа фотоелемента, м²; k_p – коефіцієнт, що враховує вплив температури для потужності, в.о.; η – номінальний ккд сонячного елемента, в.о.; (t) – поточний момент часу.

– потужність СЗЕЕ:

$$P_{\text{CЗЕЕ}}(t) = P_{\text{МНЕ}}(t) + P_{\text{АКБ}}(t), \quad (15)$$

– балансова потужність системи

$$P(t) = P_{\text{ВЕС}}(t) + P_{\text{ФЕС}}(t) - \sum \Delta P(t) - P_{\text{Н}}(t) \pm P_{\text{CЗЕЕ}}(t) \pm P_{\text{ЕМ}}(t), \quad (16)$$

де $\sum \Delta P(t)$ – підсумкові електричні втрати у системі електропостачання, кВт; $P_{\text{Н}}(t)$ – навантаження споживача, кВт; $P_{\text{ЕМ}}(t)$ – потужність, що відбирається або віддається у електричну мережу, кВт.

Оптимальна комплектація гібридної системи електропостачання в загальні визначається вимогами споживачів до якості електроенергії та надійності електропостачання. Також важливим для обрання обладнання є аналіз форми та показників графіку навантаження споживача.

Вибір джерел генерації енергії виконується за результатами техніко-економічного порівняння капітальних і експлуатаційних витрат.

У табл. 2 наведені в відносних одиницях результати оціночного техніко-економічного порівняння капітальних і експлуатаційних витрат і вартості 1 кВт×години енергії чотирьох різних джерел енергії [15].

Таблиця 2

Порівняння джерел енергії

Джерело енергії	Відносні витрати			Вартість 1 кВт×години енергії
	капі- тальні	експлуатаційні		
		за 10 років	за 20 років	
Дизельна електростанція	1,0	1,0	1,0	1,0
Електрична мережа	0,13	0,75	0,63	0,95
Вітроелектрична станція	0,7	0,5	0,5	0,15
Фотоелектрична станція	0,6	0,4	0,4	0,1

Аналіз таблиці 2 дозволяє зробити висновок, що використання дизельних електростанцій характеризується великими капіталовкладеннями та експлуатаційними витратами, при цьому отримуємо найбільшу вартість електроенергії. Таким чином використання дизельних електростанцій у складі гібридних систем електропостачання є недоцільним. ФЕС та ВЕС мають практично однакові показники – середні відносні витрати та

низьку вартість енергії. Електрична мережа має навпаки низькі капіталовкладення та високі експлуатаційні витрати і відповідно велику вартість електроенергії. Тому оптимальний склад джерел гібридної системи електропостачання саме комбінація ФЕС, ВЕС та паралельно працюючої електричної мережі.

Встановлена потужність кожного незалежного енергоджерела гібридної системи електропостачання повинна забезпечувати можливість покриття електричного навантаження. Отже, доступна потужність кожного енергоджерела повинна відповідати максимальній потужності споживача. Доступна потужність вітрової або сонячної електростанцій, крім встановленої потужності, визначається енергетичним потенціалом, відповідно, вітру чи сонячного випромінювання.

Наступним по важливості елементом гібридної системи електропостачання є система зберігання енергії, яка у свою чергу може складатися з різних типів накопичувачів енергії. Саме склад та енергоємність СЗЕЕ впливають на ефективність регулювання графіків навантаження споживача.

На рис. 5 показані різні види акумуляторів, їх енергоємність, а також час, протягом якого кожен з них може віддавати енергію. На рисунку виділені три області: зліва внизу зібрані пристрої, що забезпечують точну відповідність параметрів електроживлення заданим параметрам, справа вгорі – відрізняються простотою управління і перемикання режимів, а між цими областями – джерела, які підходять для резервного живлення [16;17].

Наведений на рис.5 поділ накопичувачів дозволяє чітко визначити області їх застосування відповідно до необхідних характеристик. Таким чином для гібридних систем електропостачання найбільш прийнятними є маховики і спеціальні хімічні акумулятори тому що вони забезпечують високу якість накопиченої потужності, а також акумулятори теплової енергії, які мають досить високий ККД.

Крім традиційних кислотних електрохімічних накопичувачів, все ширше застосовуються вдосконалені акумулятори на основі сульфиду натрію і нікель-кадмієві з кращими характеристиками і великим терміном служби, ніж кислотні. Впроваджуються особливо компактні іонно-літієві акумулятори.

У США існує безліч проектів по акумуляванню енергії, пов'язаних з батареями, на основі свинцево-кислотних, літій-іонних, нікелевих, натрієвих та проточних акумуляторів. Ці

батареї номінальною потужністю 0,38 ГВт в 2016 році мають ККД в діапазоні 60-95%.

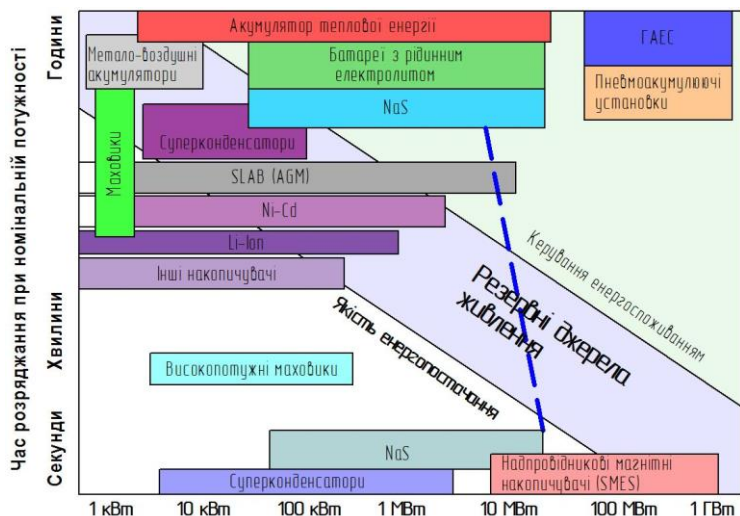


Рис. 5. Різноманітні види накопичувачів енергії

Акумуляторні батареї застосовують також у якості накопичувачів енергії у системах електропостачання споживачів-регуляторів, але вони мають суттєвий недолік – це обмежене число зарядно-розрядних циклів, наявність саморозряду і негативний екологічний вплив.

Маховикові накопичувачі запасають кінетичну енергію при розгоні ротора, щоб віддати її в потрібний момент у вигляді електроенергії. У якості розгінного двигуна і засобу відбору електроенергії використовується зазвичай вертикальний двигун-генератор.

Кількість збереженої енергії в маховику залежить від його маси, геометричних розмірів і швидкості обертання. При однаковій масі більше енергії можна накопичити при більшій швидкості, але швидкість обертання обмежується механічною міцністю матеріалу. Найпоширеніші конструкційні матеріали такі як сталь, алюміній і інші, поступаються легким матеріалам по здатності накопичувати енергію в маховиках.

Перевагами маховика є висока екологічність, простота технічного обслуговування, масштабованість, великий термін служби (тобто велика кількість циклів зарядки – розрядки), швидкий час реакції, все це важливі характеристики для застосування у складі системи електропостачання споживачів-регуляторів з метою підтримки якості електроенергії та регулювання їх ГЕН

При сучасному вирішенні питання щодо вибору накопичувача електроенергії приймають до уваги параметри, які визначають його функціональні можливості і ступінь екологічності. До таких параметрів належать – максимальна потужність накопичувача, повна енергоємність, час роботи, час реверсу потужності. Також важливими критеріями при виборі накопичувача є капітальні витрати, термін служби і ККД. На рис. 6 [16] наведено зв'язок перерахованих критеріїв для різних типів накопичувачів.

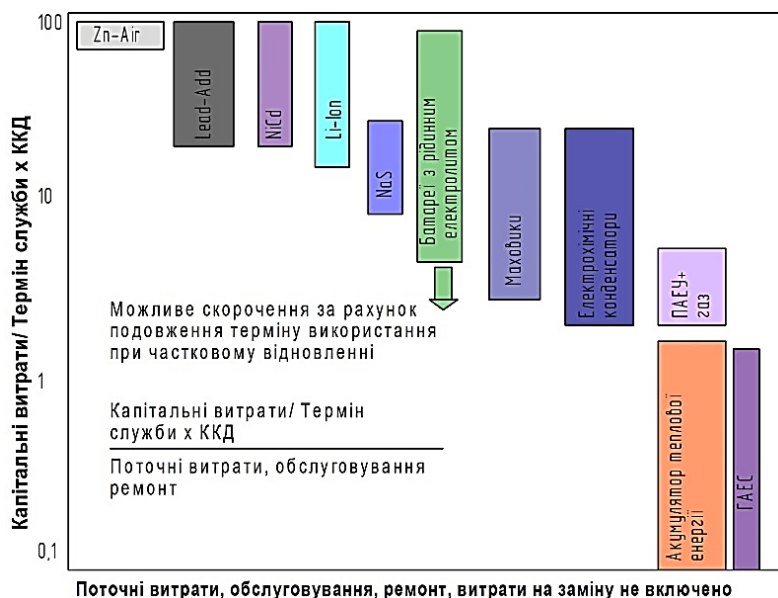


Рис. 6. Загальна вартість технологій збереження енергії за термін служби

У відповідності з представленими на рис.6 даними є цілком обґрунтованим те, що МНЕ стає найбільш актуальною заміною акумуляторних джерел безперебійного живлення.

Основна перевага механічного накопичувача полягає в простоті технічного обслуговування, високій екологічності і живучості (приблизно до 10 років), і величезною питомою потужністю з усіх типів акумуляторів енергії. Перші такі пристрої не були конкурентоздатні з електрохімічними акумуляторами. Але за минулий час з'явилися надміцні і легкі матеріали, підвищилися характеристики постійних магнітів, магнітних підшипників, електроніки. Завдяки їм сучасні механічні накопичувачі наділені великою енергоємністю і здатністю швидко віддавати запас енергії. А також у накопичувача відсутній вплив циклів заряду – розряду на термін експлуатації пристрою [16; 17].

Особливістю роботи МНЕ є його здатність швидкої розрядки на навантаження, що є позитивним фактором при різкому зростанні енергоспоживання.

Незважаючи на всі наведені переваги МНЕ, вони ще нездатні повністю замінити акумуляторні джерела безперебійного живлення, тому гібридні системи накопичення енергії на теперішній час є актуальними.

Запропонована гібридна система електропостачання може бути використана для регулювання графіків навантаження як промислових так і побутових споживачів. Піки навантаження ГЕН можуть бути компенсовані як за рахунок ВДЕ довгостроково так і за рахунок СЗЕЕ для згладжування короточасних піків ГЕН.

3. Регулювання графіків навантаження споживачів-регуляторів різних категорій

Для якісного регулювання навантаження енергосистеми необхідним є статистичний аналіз даних та визначення основних характеристик ГЕН окремих споживачів, які можуть бути використані як споживачі-регулятори.

3.1. Промислові споживачі-регулятори

При вирішенні задачі управління електричним навантаженням комплексу енергосистема-промислове підприємство зазвичай розглядають управління заздалегідь виділених споживачів-регуляторів на рівні підприємства. У якості споживачів-регуляторів частіше виділяють споживачів, які не

приймають участь у технологічному процесі, а виконують допоміжні функції.

При управлінні електричної навантаженням промислових підприємств повинен враховуватися імовірнісний характер режиму роботи обладнання. Управління навантаженням промислових підприємств повинно розглядатися як дворівнева ієрархічна структура. Верхній рівень управління встановлює планові значення потужності, а нижній рівень, залежно від стану обладнання, виробляє відпрацювання керуючих впливів [18].

Загальні типові графіки навантаження промислових споживачів будуються та розглядаються в залежності від кількості робочих змін. На рис. 7 наведені типові графіки типових активних навантажень промислових споживачів при однозмінному, двозмінному та трьохзмінному графіках роботи.

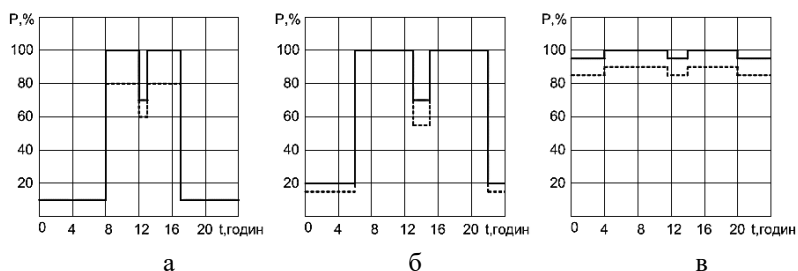


Рис. 7. Типові графіки навантажень промислових споживачів:
а – однозмінні, б – двозмінні, в – трьохзмінні

Аналіз графіків, представлених на рис. 7 за основними характеристиками, дозволяє зробити висновок, що графіки трьохзмінних споживачів є рівномірними та не потребують регулювання, але при застосуванні гібридних систем електропостачання можливе часткове зниження енергоспоживання з електричної мережі та зменшення навантаження на традиційні електростанції мережі. Стосовно графіків навантаження при однозмінному та двозмінному режимі роботи, то регулювання піків та спадів навантаження за допомогою гібридних систем електропостачання є актуальним та енергоефективним.

Регулювання ГЕН промислових споживачів-регуляторів при однозмінному та двоззмінному режимі роботи можливе за наступними алгоритмами:

1. Зниження пікового навантаження при схемній конфігурації гібридної системи електропостачання, представленої на рис. 4б. У цьому випадку система працює паралельно з загальною мережею і зменшує навантаження на неї.

2. Зменшення спадів навантаження в нічний та вечірній час при схемній конфігурації гібридної системи електропостачання, представленої на рис. 4г, коли СЗЕЕ заряджається у часи спаду навантаження і віддає у час пікового навантаження.

3. Зменшення спадів та піків навантаження при схемній конфігурації гібридної системи електропостачання, представленої на рис. 4д, коли задіяні усі складові системи та електричної мережі і електрична енергія вільно переходить між джерелами у стан зберігання або вивільнення.

В залежності від складу гібридної системи електропостачання промислового споживача-регулятора та її максимальних об'ємів генерації електричної енергії можливе регулювання загального ГЕН або індивідуальних ГЕН окремих електричних установок, задіяних у виробництві.

Математична модель споживання електричної навантаження в функції часу згідно [18] має вигляд

$$P(t) = P_{БАЗ}(t) + P_{ПТ}(t), \quad (17)$$

де $P_{БАЗ}(t)$ – базисне електричне навантаження споживачів виробництва, що складається з k цепів без урахування споживачів-регуляторів, кВт; $P_{ПТ}(t)$ – електричне навантаження споживачів-регуляторів, кВт.

Математична модель управління електричним навантаженням з урахуванням опису стану об'єкта управління, режиму його роботи і виробничих обмежень має вигляд [18]

$$P(t) = P_{БАЗ}(t) + \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^V u_{kij}(t) P_{ПТ(kij)}, \quad (18)$$

де $u_{kij}(t)$ – керуючий вплив, приймається рівним одиниці, якщо i -тий споживач електроенергії k -го цеху в момент часу t знаходиться в j -ом режимі роботи і має значення, рівне одиниці і

нуля у всіх інших випадках; $P_{PT(kij)}$ – електричне навантаження споживача-регулятора, кВт.

Важливо відмітити, що графіки навантаження промислових споживачів також визначаються особливостями технологічного процесу даного виробництва і для кожної галузі маємо окремі ГЕН виробництв, які наведені на рис. 8 [19].

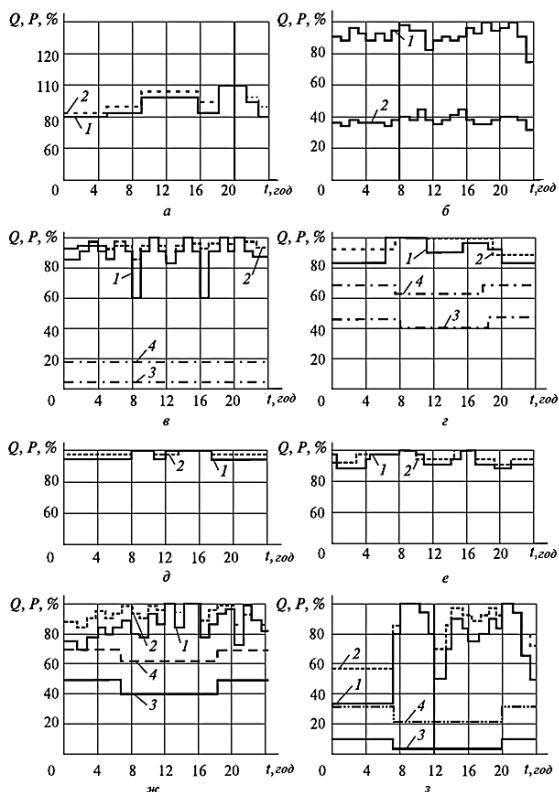


Рис. 8. Характерні добові графіки електричних навантажень підприємств вуглевидобутку (а), нафтопереробки (б), торфорозробки (в), чорної металургії (г), кольорової металургії (д), хімії (е), важкого машинобудування (ж) ремонтно-механічних заводів (з) 1,2 активна і реактивна навантаження робочого дня; 3,4 – активна і реактивна навантаження вихідного дня

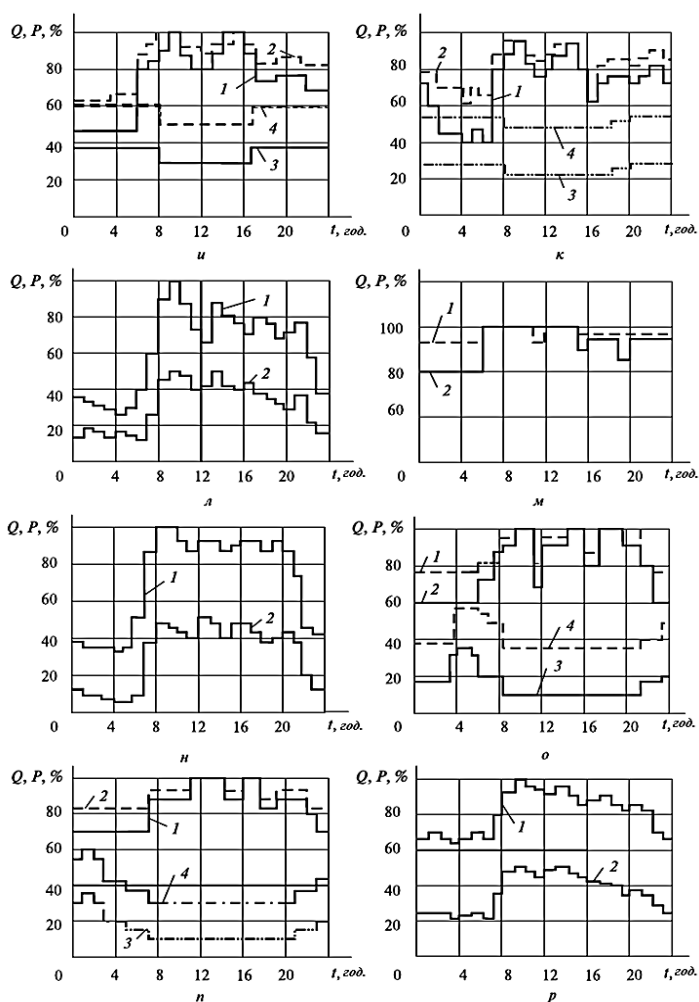


Рис. 8. Закінчення. Характерні добові графіки електричних навантажень підприємств верстатобудівних (і), автомобільних (к), деревообробної промисловості (л), целюлозно-паперової промисловості (м), легкої промисловості (н), прядильно-ткацьких фабрик (о), друкованих та оздоблювальних фабрик (п), харчової промисловості (р); 1,2 активна і реактивна навантаження робочого дня; 3,4 – активна і реактивна навантаження вихідного дня

Таким чином, при виборі промислового споживача-регулятора важливий індивідуальний підхід у регулюванні ГЕН за допомогою гібридних систем електропостачання.

3.2. Побутові споживачі-регулятори

Категорія побутових споживачів-регуляторів складається з електроприймачів житл багатоквартирних будинків, будинків громадського призначення, приватних домогосподарств.

Клас побутових споживачів-регуляторів можна розділити на підкласи [6]:

1 тип – електроприймачі, роботу яких можна без жодного збитку перенести з «піку» на час «провалу» навантаження в енергосистемі. Сюди можна віднести: електроопалення, електроводонагрівачі (ЕВН), живлючі пристрої, які вимагають підзарядки і т.д.;

2 тип – електроприймачі, роботу яких можна перенести на нічний час (на час «провалу» навантаження) з незначними незручностями для людини. Це пральні машини (з програмним управлінням), кондиціонери і т.д.

3 тип – електроприймачі, робота яких не може використовуватися для регулювання. Сюди можна віднести всі побутові електроприймачі з короткочасним режимом роботи або з невеликою потужністю.

Регулювання ГЕН житл багатоквартирних будинків практично неможливо реалізувати без згоди та мотивації співвласників будинку, тому на практиці таке регулювання провадиться індивідуально, поодинокі та практично не має впливу на енергосистему.

Найбільш привабливими з точки зору регулювання ГЕН та використання у якості споживача-регулятора є приватні домогосподарства. Саме для них на сьогоднішній час актуальне питання енергетичної незалежності.

Порівняльний аналіз гібридних систем електропостачання, розглянутих у розділі 2 дозволив зробити висновок що схема з фотоелектричними перетворювачами енергії є найбільш оптимальною та енергоефективною для приватних домогосподарств. З урахуванням питань екологічності розроблена блок-схема гібридної системи електропостачання будівлі з інтелектуальним керуванням, яка наведена на рис. 9 [19]. Основними компонентами розробленої схеми є

1. фотоелектрична станція (ФЕС), яка складається з фотоелектричних перетворювачів (ФЕП) та гібридного інвертора;
2. кінетичний енергонакопичувач (КЕН);
3. система контролю, яка складається з датчиків струму, температури та присутності;
4. система керування, яка має у своєму складі інтелектуальний контролер задля керування енергопотоками.

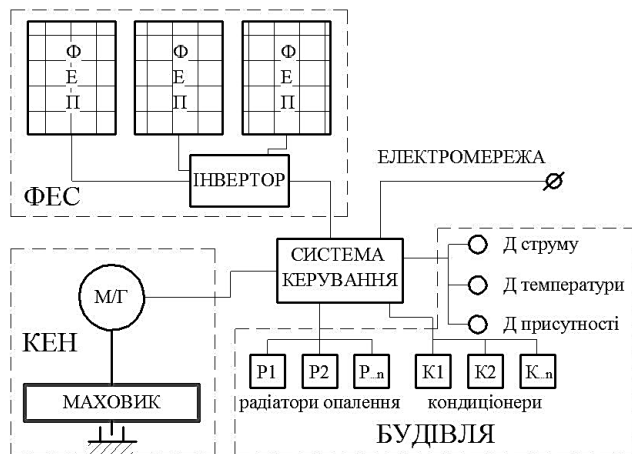


Рис. 9. Схема гібридної системи електропостачання будівлі з інтелектуальним керуванням

Проведений аналіз схемної конфігурації вказує, що схема наведена на рис. 4, є привабливішою у плані енергоефективності та зручності регулювання ГЕН.

Таким чином, згідно з обраною схемною конфігурацією, робота гібридної системи електропостачання, наведеної на рис. 9, полягає в наступному: користувач задає необхідні налаштування в системі керування, яка представляє собою програмований логічний контролер з набором необхідних у кожному окремому випадку інтерфейсів. До параметрів налаштувань входить необхідна температура у будівлі, її окремих приміщеннях, можливо окремих ділянках досить великих кімнат. Також можливо керування освітленням, якщо потужність освітлення суттєво впливає на енергоспоживання будівлі (для великих будівель).

Під час роботи система опитує наявні датчики та по заданому алгоритму вмикає/вимикає або регулює радіатори опалення, систему кондиціонування, вентиляції. У разі необхідності підігріву/охолодження частини великої кімнати, система отримавши з датчиків присутності розташування людей у кімнаті підігріє ті радіатори, які розташовані ближче до людей.

У разі обмеження на навантаження міської електромережі, система отримавши дані з датчику струму, встановленого на введенні напруги в будівлю скорегує системи будівлі належним чином, або зменшивши потужність відключенням, регулюванням або переключенням на накопичувач.

У теплу пору року можливо керування кондиціонуванням та вентиляцією.

Енергію для опалення / кондиціонування система використовує переважно від встановленого на будівлі ВДЕ, коли її не вистачає то добавляє з міської електромережі. У разі надлишку запасає її у кінетичному накопичувачі.

Для опалення при такій системі економічно доцільно використовувати керамічні нагрівальні панелі або теплові насоси. Адже ці системи добре піддаються керуванню, досить швидко змінюють температуру у заданій секції будівлі та енергоефективні.

Таким чином регулювання ГЕН будівлі реалізовано за рахунок інтелектуальної системи керування енергоспоживання, що веде до зниження навантаження загальної електричної мережі та відповідно зниження величини піків загального ГЕН.

Розглянута гібридна система електропостачання може бути застосована і для будівель громадського призначення. Змінною частиною у системі може бути склад СЗЕЕ.

Регулювання ГЕН будівлі громадського призначення може бути організовано за алгоритмом функціонування, представленим на рис. 4, г.

На рис. 10 наведена розроблена структурна схема системи електропостачання будівлі з застосуванням кінетичного енергонакопичувача за умови випадкового характеру навантаження споживача протягом доби.

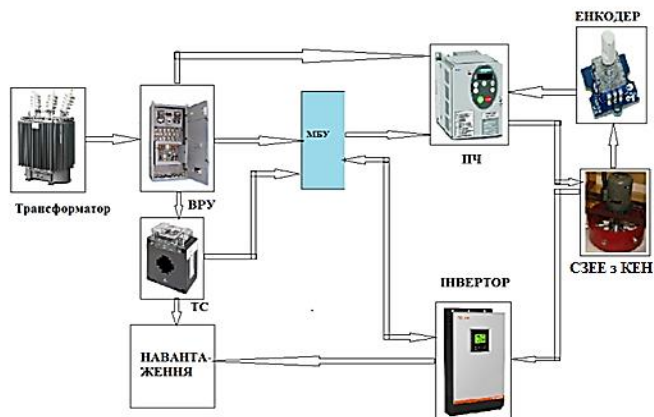


Рис. 10. Деталізована структурна схема гібридної системи електропостачання будівлі: ВРУ – ввідно-розподільний устрій; ТС – трансформатор струму; МБУ – мікропроцесорний блок управління; ПЧ – перетворювач частоти

Математичний опис розподілу енергії в СЕП будівлі може бути представлений функцією потужності [10, 20]

$$P_{\Sigma}(t) = P_{\tau}(t) - \sum \Delta P(t) - P_{\text{н}}(t), \quad (19)$$

де $P_{\text{н}}(t)$ - навантаження споживача (адміністративної будівлі);
 $\sum \Delta P(t)$ - сумарні електричні втрати СЕП,

$$\sum \Delta P(t) = \Delta P_{\tau} + \Delta P_{\text{ЛЕМ}} + \Delta P_{\text{ІНВ}} + \Delta P_{\text{ТС}} + \Delta P_{\text{КЕН}}, \quad (20)$$

де $\Delta P_{\tau}, \Delta P_{\text{ЛЕМ}}, \Delta P_{\text{ІНВ}}, \Delta P_{\text{ТС}}, \Delta P_{\text{КЕН}}$ - електричні втрати в трансформаторі, в лінії електропередач, в інверторі, в трансформаторі струму і в КЕН відповідно.

Математична модель обміну енергією СЕП з КЕН має вигляд [21]:
 – фаза накопичення енергії

$$P_{\Sigma}(t) = \begin{cases} P_{\Sigma}(t) - P_{\text{КЕН}}(t) & \text{при } P_{\text{н}}(t) \rightarrow \min, P_{\text{ГЕН}}(t) = P_{\text{н}}(t) + P_{\text{КЕН}}(t); \\ P_{\text{ЛЕМ}}(t) - \sum \Delta P(t) - P_{\text{КЕН}}(t) & \text{при } P_{\text{н}}(t) = 0, P_{\text{ГЕН}}(t) = P_{\text{КЕН}}(t); \\ 0, P_{\text{ГЕН}}(t) = P_{\text{н}}(t) = P_{\text{КЕН}}(t) = 0. \end{cases} \quad (21)$$

– фаза передачі енергії

$$P_{\Sigma}(t) = \begin{cases} P_{\Sigma}(t) + P_{\text{КЕН}}(t) & \text{при } P_{\text{н}}(t) \rightarrow \max, P_{\text{ГЕН}}(t) = P_{\text{н}}(t) - P_{\text{КЕН}}(t); \\ P_{\text{ЛЕМ}}(t) - \sum \Delta P(t) & \text{при } P_{\text{н}}(t) = 0, P_{\text{ГЕН}}(t) = 0; \\ 0, P_{\text{н}}(t) = P_{\text{КЕН}}(t), P_{\text{ГЕН}}(t) = 0. \end{cases} \quad (22)$$

Згідно з отриманими виразами (21) і (22) на рис. 11 приведений добовий ГЕН будівлі. При цьому характеристики КЕН такі як час заряду, час розряду, накопичена енергія та потужність розраховуються та підбираються з урахуванням характеристик ГЕН та необхідності його регулювання в залежності від величини навантаження у пікові години.

Характеристика ГЕН кінетичних накопичувачів виконується у якості навантажувальної діаграми, яка потім накладається на ГЕН будівлі з метою регулювання нерівномірності ГЕН.

Задля забезпечення безперебійності регулювання ГЕН у пікові години стає потреба використання двох КЕН, які будуть керуватися МБУ та працювати по черзі, тобто коли один знаходиться у стані заряду, другий буде у стані розряду та навпаки. Блок керування завдає необхідний режим роботи КЕН. У режимі зберігання енергії у обох КЕН з метою зменшення споживання з мережі електричної енергії можливо живлення одного КЕН від другого КЕН.

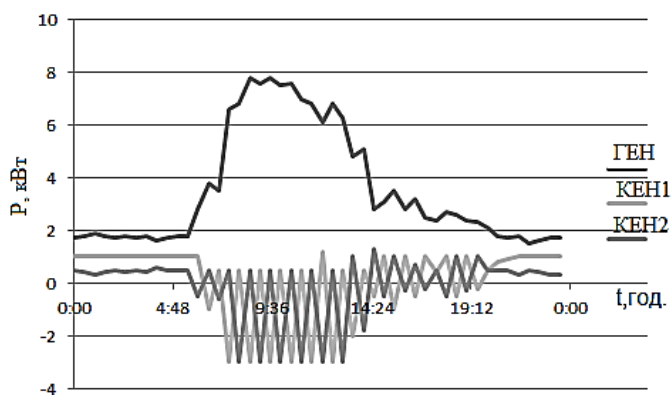


Рис. 11. Добовий ГЕН споживача-регулятора з блоками КЕН у складі СЗЕЕ

Сумарний ГЕН будівлі і навантажувальні діаграми КЕН буде мати більш рівномірний характер, таким чином задаючи закон роботи КЕН маємо можливість ефективно регулювати ГЕН, що призведе до зменшення втрат в СЕП. Сумарний ГЕН наведений на рис. 12.

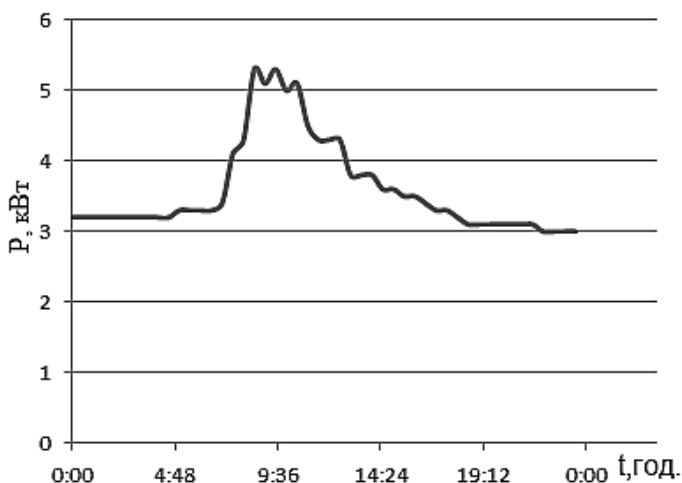


Рис. 12. Сумарний добовий ГЕН споживача-регулятора

Розрахунок основних характеристик отриманого сумарного ГЕН приведений у таблиці 3.

Таблиця 3

**Характеристика сумарного добового
ГЕН споживача – регулятора**

Характеристики ГЕН	ГЕН до регулювання	ГЕН після регулювання КЕН	відхилення
P_c , кВт	3,54	3,58	-0,04
P_E , кВт	4,16	3,66	0,5
K_Φ	1,175	1,022	0,153
α	0,19	0,57	-0,38
β	0,45	0,68	-0,23
$P_{\max}$, кВт	7,8	5,3	2,5
$P_{\min}$, кВт	1,5	3,0	-1,5

Аналіз отриманих характеристик сумарного добового ГЕН вказує на вирівнювання ГЕН за рахунок переносу навантаження у непікову зону графіка, а саме маємо ріст коефіцієнту рівномірності α та коефіцієнту заповнення β .

Зменшення коефіцієнту форми K_Φ вказує на зменшення пікового характеру графіка навантаження.

ГЕН після регулювання має щільність 0,68, тобто мінімальне навантаження відрізняється від максимального у межах 32%, що значно менше ніж до регулювання

Таким чином можливо накласти тахограми роботи блоку КЕН на любий добовий ГЕН та отримати регульований ГЕН.

Удосконалити процес регулювання ГЕН розглянутої системи можливо при організації алгоритму функціонування, представленого на рис. 4,д. Це дозволить заряджати блок СЗЕЕ у часи спаду навантаження від електричної мережі, що зменшить провали ГЕН та підпитувати блоки СЗЕЕ від ФЕС невеликої потужності, що у сукупності зменшить піки навантаження.

3.3. Комунально-побутові споживачі-регулятори

До класу комунально-побутових споживачів віднесено електроприймачі міст загального користування житлових будинків (освітлення, ліфти, санітарно-технічні установки) а також вуличне освітлення.

На рис. 13 наведені типові графіки активних навантажень комунально-побутових споживачів житлових будинків.

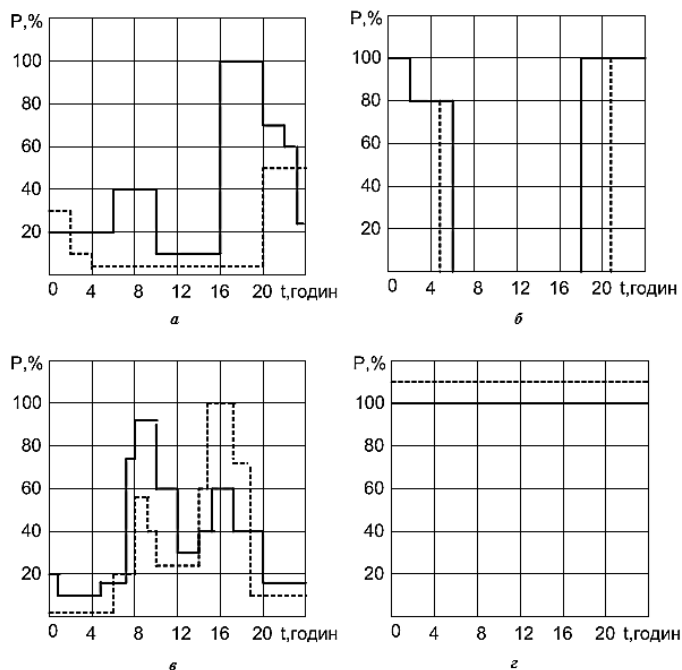


Рис. 13. Типові добові літні та зимові графіки активних навантажень комунально-побутових споживачів: а – освітлення житлових будинків; б – вуличне освітлення; в – побутові двигуни; з – насосні установки водопроводу та каналізації

Аналіз наведених графіків виявив, що вони практично повторюють графік навантаження енергосистеми, тобто мають два піки навантаження, причому вечірній максимум більший ніж ранковий. Навантаження освітлення істотно залежить від пори року й має найбільше значення у вечірні зимові години (суцільні лінії). Улітку (штрихові лінії) добовий максимум навантаження зніжується за значенням і тривалістю та настає в більш пізній час.

Навантаження освітлення самій вагомий споживач, який найбільше впливає на навантаження енергомережі, тому саме його ГЕН потребує регулювання.

Регулювання ГЕН освітлення житлових будинків може бути реалізовано за алгоритмами наведеними на рис.4, а та в. у якості ВДЕ логічне приймати ФЕП.

Системи на сонячних панелях для живлення світлодіодного освітлення знаходять застосовувати в різних сферах: виробничій, комерційній та побутовій. Основною причиною малого застосування таких систем є те, що вони поки ще мають високу вартість в порівнянні з іншими джерелами світла. Але з швидким розвитком світлодіодних технологій, LED джерела мають потенціал, щоб стати кращими джерелами світла для систем з живленням від сонячних батарей для освітлення будівель та будинків в найближчому майбутньому [22].

Світлодіодне освітлення на основі фотомодулів має багато переваг [23]:

- недороге обслуговування;
- яскравість і максимальна природність світла;
- свобода у виборі кольору освітлення (світлодіоди мають різні кольори і відтінків);

- системи освітлення на підставі сонячних модулів нешкідливі для природного середовища, не потребують переробки (крім акумуляторних осередків), не мерехтять, відсутній шум, виділяють приємний і м'яке світло. В ультрафіолетовому діапазоні відсутня випромінювання. Також запропоновані технології мають підвищену міцність поряд зі звичайними системами застарілих видів;

- дані рішення ефективні і економічні при використанні, в порівнянні зі звичайними освітлювальними джерелами. Термін окупності світлодіодних світильників становить до 1,5 років.

- висока енергоефективність;
- ресурс роботи світлодіодів до 100000 годин;
- компактність, легкість і надійність обладнання.

Мінусами можна назвати, лише невелика генерація енергії в похмурі дні і можливі збої в роботі акумуляторів в сильні морози, але у разі виникнення такої ситуації можливе підключення до загальної мережі

Зазвичай система освітлення для будівель встановлюється як стандартна сонячна електростанція, а всі лампи наявні в будинку змінюють на світлодіодні. Схематично така система представлена на рис. 14.

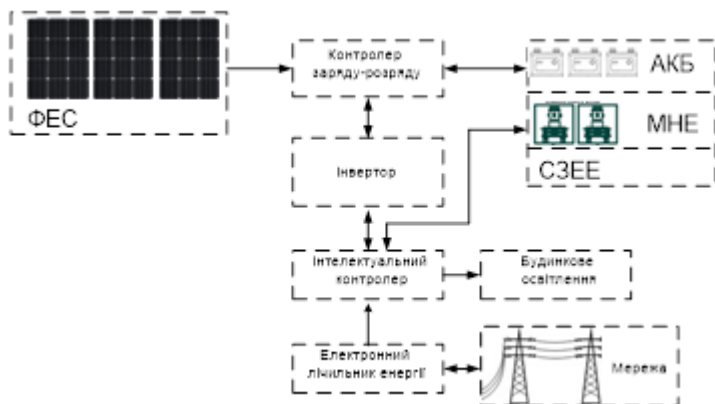


Рис. 14. Структурна схема гібридної системи електропостачання освітлення будівлі

Сонячні батареї встановлюються на даху будинку, все решту складових системи встановлюються в будинку (інвертор, контролер і акумулятори). Енергія сонячних панелей живить освітлювальні прилади і заряджає акумулятори. Контролер не допускає перезарядження акумуляторів або їх зворотного розряду, від акумуляторів надходить постійний струм, який перетворює інвертор і передає уже змінний струм в мережу будинку.

Для підвищення ефективності та екологічності, розглянутої на рис. 14 системи освітлення, пропонується модернізувати її, таким чином щоб підвищити потужність сонячної електростанції при зменшенні її площини встановлення та заміни хімічних акумуляторів на кінетичний накопичувач енергії, так як вони не шкодять навколишньому середовищу і не потребують переробки. Розроблена конструкція автономної системи освітлення наведена на рис. 15 [22].

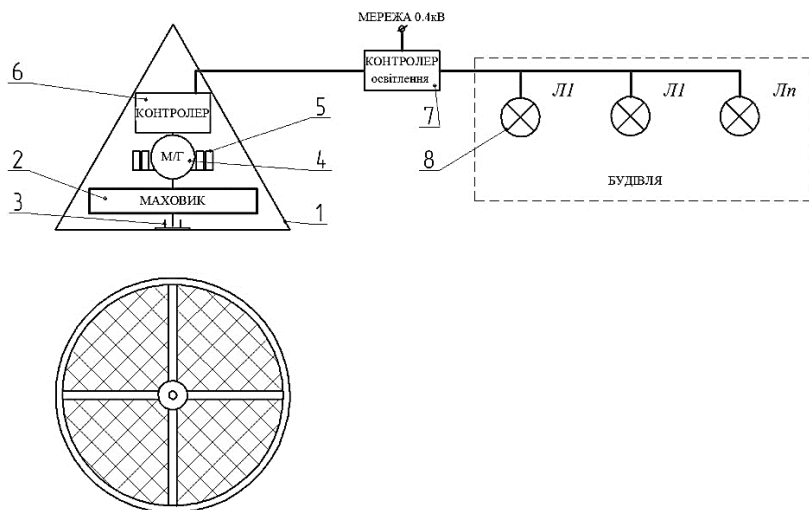


Рис. 15. Система освітлення будівлі

Розроблена система (рис.15) конструктивно складається з нерухомої круглої пустотілого конусу 1, на поверхні якої встановлені гнучкі великі або негнучкі маленькі фотоелектричні панелі, маховика 2, встановленого на опорах обертання 3, безщіткового мотор-генератора з постійними магнітами 4, електролітичних конденсаторів великої ємності 5 та електронної системи управління 6 яка забезпечує роботу установки в цілому, контролера освітлення 7, який за потреби вмикає або вимикає освітлення, у разі розряду накопичувача, перемикає освітлення на зовнішню мережу живлення та ліхтарів 8 в середині та зовні будівлі. Такий склад системи дозволяє одночасно перетворювати енергію сонячного світла у електрику та накопичувати і деякий час зберігати її у вигляді кінетичної енергії в маховику, а потім витратити на освітлення.

Сонячна енергія у фотоелементах на поверхні корпусу конусу 1 перетворюється у електричну і через систему управління 6 на мотор-генератор 4, який у свою чергу розганяє масивний маховик 2. При досягненні максимальних проектних обертів маховика система переходить у режим видачі енергії системі освітлення. У разі відсутності потреби в освітленні, система переходить у режим очікування. В цей час короткими імпульсами, присутніми при обертанні безщіткового мотора з постійними

магнітами через контролер відбувається заряд конденсаторів завдяки яким потім деякий час підтримується стабільна частота обертання маховика, тим самим підвищуючи загальний ККД системи, який є відношення отриманої енергії сонця до виданої у навантаження. Коли з'являється потреба у освітленні, система починає віддавати енергію у навантаження.

Запропонована система має наступні переваги:

- сонячні панелі, виготовлені у вигляді конусу не потребують механізмів повороту і виробляють однакову величину електроенергії незалежно від кута розвороту сонця;

- сонячна електростанція у вигляді конусу займає меншу площину встановлення, має високі енергетичні показники та сучасний естетичний дизайн;

- підвищену екологічність установки за рахунок відсутності хімічних акумуляторів.

Задля організації вуличного освітлення краще застосовувати автономні ФЕС. Повна автономність вуличного освітлення розвантажить загальні електричні мережі та зменшить фінансові витрати на генерацію традиційними джерелами енергії.

Висновки

Небаланси між генерацією та споживанням електричної енергії негативно впливають на енергосистему країни як з технічної так і з економічної точки зору. Бездіяльність у цьому питанні може призвести до незворотних наслідків.

Одним з перспективних методів вирішення проблеми небалансів енергосистеми є виявлення та залучення споживачів-регуляторів для участі у процесі стабілізації стану енергосистеми.

Регулювання графіків навантаження споживачів-регуляторів є основою ефективного управління енергосистемою. Для цього запропоновано застосування гібридної системи електропостачання з джерелами відновлюваної енергії та пристроїв зберігання електричної енергії. Ефективність регулювання графіка навантаження споживача-регулятора залежить від складу гібридної системи електропостачання та вибору оптимальних її параметрів. Також важливим є організація алгоритму функціонування системи, а саме розподілу режиму роботи і ступеня завантаження джерел електричної енергії в часі.

Узагальнена структура гібридної системи електропостачання повинна складатися з декількох джерел енергії, системи

зберігання електричної енергії, системи керування комплексом, інверторів та комутуючої апаратури. Порівняльний аналіз джерел енергії виявив, що економічно обґрунтованою є комбінована система «ФЕС-ВЕС-електрична мережа». Система зберігання електроенергії для ефективної роботи повинна також бути гібридною, тобто складатися з декількох типів накопичувачів енергії, було запропоновано хімічні та механічні накопичувачі.

Відомо, що найбільші частки споживання електричної енергії належать промисловим, побутовим та комунально-побутовим споживачам, тому саме їхні графіки навантаження потребують регулювання. Але при цьому слід додержуватися індивідуального підходу у регулюванні ГЕН споживачів-регуляторів та також корегувати склад гібридної системи електропостачання у кожному окремому випадку з метою зменшення навантаження на електричні мережі енергосистеми.

Література:

1. Гуртовец А.Л., Забело Е.О. Электрическая нагрузка энергосистемы. Выравнивание графика. *Новости электротехники*. 2008. № 5 (53). С. 108–114.
2. Макоклюев Б.И., Павликов В.С., Владимиров А.И., Фефелова Г.И. Влияние колебаний метеорологических факторов на электропотребление энергообъединений. *Энергетик*. 2003. № 6. С. 14 – 19.
3. Черкашина Г.І. Вирівнювання графіку електричного навантаження у побутовому секторі. *Methodology of modern research Abu Dhabi: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference, Dubai, 21-22 march 2015. Dubai, 2015*. С. 24 – 32.
4. Маляренко В.А., Нечмоглод И.Е., Колотило И.Д. Неравномерность графика нагрузки энергосистемы и способы ее выравнивания. *Світлотехніка та електроенергетика*. 2011. № 4. С. 61– 66.
5. Сайт Міністерства енергетики та вугільної промисловості. http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/uk/publish/officialcategory?cat_id=35109. (дата звернення: 21.10.2021)
6. Лазуренко А.П., Черкашина Г. И., Лисичкина Д. С. Новый подход к классификации потребителей электрической энергии. *Світлотехніка та електроенергетика*. 2008. № 1. С. 76 – 80.
7. Смоленцев Н.И. Накопители энергии в локальных электрических сетях. *Ползуновский вестник*. 2013. № 4(2). С. 176 –181.

8. Четошникова Л. М., Смоленцев Н. И., Четошников С. А. Процесс управления мощностью в распределенной интеллектуальной сети. *Электрика*. 2012. № 7. С. 6–9.
9. Четошникова Л. М., Смоленцев Н. И., Четошников С. А., Смоленцев А.Н. Снижение колебаний энергии в локальных сетях с распределенной энергией. *Электрика*. 2013. № 5. С. 37–39.
10. Алексеев Б.А. Применение накопителей энергии в электроэнергетике. *Электро. Электротехника, электро-энергетика, электротехническая промышленность*. 2005. № 1. С. 42 – 46.
11. Лукутин Б.В., Муравлев И.О., Плотников И.А. Системы электроснабжения с ветровыми и солнечными электростанциями: учебное пособие. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2015. 128 с.
12. Новокрещенов О.В., Отмахов Г.С., Хуаде М.Ю. Комбинированные системы электроснабжения на возобновляемых источниках энергии. *Научный журнал КубГАУ*. 2017. № 132(08). С. 3 – 15.
13. Лукутин Б.В. Интеллектуальные системы электроснабжения с ветровыми и солнечными электростанциями: учебное пособие. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2019. 115 с.
14. Савченко Н.П. Трет'як А. В. Аналіз енергоефективності будівлі з гібридною системою електропостачання при інтелектуальному керуванні генерацією та споживанням електроенергії. *Новітні технології у будівництві*. 2020. № 37. С. 63-68. DOI <https://doi.org/10.32782/2664-0406.2020.37.10>
15. Степаненко В.П. . Возобновляемые источники и накопители энергии в системах автономного электроснабжения. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2017. № 6. С. 143–152.
16. МакКракен Марк. Накопление энергии как способ радикально сократить углеродные выбросы. *Вестник центра организации объединенных наций по промышленному развитию. ЮНИДО*. 2012. № 8. С. 66 –71.
17. Северянин В. С. Накопители энергии. *Вестник Брестского государственного технического университета*. 2018. №2. С. 72–74
18. Розен В.П. Математическая модель программного управления электрической нагрузкой производственных систем. *Вісник НТУУ «КПІ». Серія «Гірництво»*. 2012. Вип. 22. С. 150 – 155.

19. Савченко Н.П., Трет'як А.В. Аналіз енергоефективності будівлі з гібридною системою електропостачання при інтелектуальному керуванні генерацією та споживанням електроенергії. *Нові технології в будівництві*. 2020. № 37. С. 63 – 68. DOI <https://doi.org/10.32782/2664-0406.2020.37.10>

20. Солодовников Д.Н. Применение накопителей энергии в энергетических системах транспортных и технологических машин. *"Теория и практика современной науки"*. 2017. № 2(20). С. 534 – 537.

21. Савченко Н.П., Шевченко С.Ю. Математична модель системи електропостачання адміністративної будівлі з кінетичним енергонакопичувачем. *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. 2018. №1/2018(41). С. 47–52. doi: 10.30929/2072-2052.2018.1.41.47 – 52.

22. Савченко Н.П., Трет'як А.В. Конструктивні рішення щодо складу автономних енергоефективних систем освітлення будівель. *Збірник наукових праць ДонНАБА*. 2020. № 1(19). С. 94 – 98.