УДК 621.7

ЗАЙЦЕВ Є.О., канд. техн. наук,
ЛЕВИЦЬКИЙ А.С., докт. техн. наук,
Інститут електродинаміки НАН України

СПОСОБИ ЖИВЛЕННЯ ГІБРИДНИХ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИХ ВИМІРЮВАЧІВ КОНТРОЛЬНО-ДІАГНОСТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ГІДРОГЕНЕРАТОРІВ

Розглянуто принципи практичної реалізації систем живлення гібридних волоконно-оптичних вимірювачів (ГВОВ) контрольно-діагностичних параметрів гідрогенераторів. Наведено розроблені схеми ГВОВ з батарейним живленням, через енергетичний та енергетично-інформаційний волоконно-оптичний канал. Описано загальну структуру та принципи роботи гібридного волоконно-оптичного вимірювача систем технічної діагностики. Наведено реалізацію ГВОВ з живленням через інформаційно-енергетичний канал, реалізований на основі технологій "Wavelength-Division Multiplexing"

К л ю ч о в і с л о в а: гідрогенератор, контрольно-діагностичні параметри, гібридний волоконно-оптичний вимірювач, ємнісний сенсор, інформаційно-енергетичний канал.

У відповідності до програми Кабінету Міністрів України про "політику енергетичної незалежності" — забезпечення інтеграції української енергосистеми в мережу європейських енергосистем ENT50-E потребує впровадження реформ в енергетичній галузі та докорінну модернізацію електроенергетичного обладнання електроенергетичного комплексу України [1]. Модернізація зумовлює необхідністю проведення робіт, спрямованих на забезпечення надійності електроенергетичного обладнання (генераторів, трансформаторів, двигунів внутрішніх потреб тощо). У періоди пікових навантажень протягом доби, коли не вистачає потужностей для збалансування роботи енергосистеми "залучаються" гідро- та гідро- акумулюючі електростанції (ГЕС та ГАЕС), які у 2016 р. виробили лише 6 778 млн. кВт·год. [2], що менше на 31 млн. кВт·год. в порівнянні з 2015 р., коли спостерігалась посуха, що зневоднила річки [3]. Сьогодні потенціал гідроенергетики використовується на 60%, переважно за рахунок Дніпровського каскаду та інших великих ГЕС. Залишок потенціалу можливо реалізувати за рахунок встановлення нових і відновлення старих потужностей малих ГЕС [4].

Однак, не дивлячись на не 100% використання потужностей ГЕС, гідроенергетичний потенціал кожного року дедалі більше виснажується [3]. Для уникнення втрати потенціалу є вкрай важливим встановлення нового гідро- та електроустаткування з більшою продуктивністю, що дозволить підвищити потенціал вітчизняних ГЕС.

Одним з напрямків підвищення продуктивності нового та вже існуючого електрообладнання є створення нових методів і засобів технічної діагностики ЕО. Особливістю технічної діагностики є використання гами спеціалізованих вимірювальних перетворювачів для реєстрація контрольно-діагностичних параметрів, які характеризують роботу обладнання. При використанні спеціалізованих вимірювальних перетворювачів на працюючому енергетичному обладнанні виникає ряд проблем, які перешкоджають отримати високу точність вимірювання діагностичних параметрів та забезпечити завадостійкість до впливу потужних електромагнітних полів. Підвищення завадостійкості вимірювальних перетворювачів, ліній передачі інформації та вторинних перетворювачів може бути частково вирішена за рахунок застосування в структурі системи технічної діагностики волоконно-оптичних світловодів.

Слід зазначити, що застосування первинних волоконно-оптичних перетворювачів фізичних параметрів побудованих на використанні оптичних ефектів для енергетичного обладнання ускладнено низкою недоліків і основний із них — це невисокий рівень стандартизації й уніфікації оптичних чутливих елементів. Для їх створення застосовуються спеціалізовані оптичні елементи і волокна, технологія виготовлення яких ще недостатньо освоєна. Крім того, забезпечення заданих метрологічних характеристик вимагає складної процедури калібрування. Як результат — відносно висока вартість, що значно обмежує широке застосування. З іншого боку, переважна більшість спеціалізованих первинних перетворювачів ємнісного типу [5] забезпечують необхідні метрологічні характеристики.

Тому перспективним для побудови систем технічної діагностики енергетичного обладнання є використання гібридних волоконно-оптичних вимірювачів [6—-8]. ГВОВ конструктивно складаються із волоконно-оптичного каналу(ВОК) та традиційних сенсорів, як чутливих елементів (первинних перетворювачів).

Ціллю статті є огляд технічних рішень для практичної реалізації способів живлення гібрид-

них волоконно-оптичних сенсорів вимірювачів контрольно-діагностичних параметрів систем технічної діагностики обладнання ГЕС.

Застосування ВОК в структурі систем технічної діагностики дозволяє досягти:

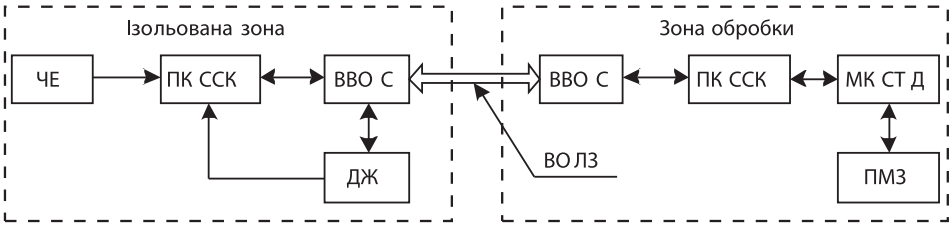

Рис. 1. **Структурна схема ГВОВ.**

1) *високого рівня захищеності* від впливу зовнішніх електромагнітних полів і міжканальних наведень;

2) *зменшення габаритів і маси* в порівнянні з використанням металевих ліній провідного зв'язку в 3—5 разів;

3) *вибухобезпеку волоконно-оптичного тракту* в середовищі з температурою самозаймання 450 — 600 °С (суміш водню, метану, пропану і подібних газів з повітрям) [8];

4) *підвищення достовірності контролю* завдяки отриманню інформації про стан окремих вузлів у вигляді кодованих світлових сигналів;

5) *низький рівень шумів*, як результат передачі вимірювальної інформації через ВОК;

6) *секретності передачі інформації*: випромінювання в навколишній простір ВОК майже відсутнє, а виготовлення відводів оптичної енергії без руйнування кабелю неможливе;

7) *потенційно низької вартості* (заміна дорогих кольорових металів (мідь, свинець) на матеріали з необмеженим сировинним ресурсом (скло, кварц, полімери) для виготовлення ВОК).

Узагальнена структурна схема ГВОВ зображена на Рис. 1., де: ЧЕ — чутливий елемент; ПКССК — перетворювач код світло та світло код (комунікаційна підсистема); ВВОС — вхідна-вихідна оптична система; ДЖ — джерело живлення. МКСТД — модуль керування роботою системи технічної діагностики; ПМЗ — програмно-математичні засоби вторинної обробки інформаційних даних; ВОЛЗ (волоконно-оптична лінія звязку) — волоконно-оптичний канал (ВОК);

Система, яка показана на Рис. 1., працює наступним чином. Первинний вимірювальний перетворювач неелектричних фізичних величин — чутливий елемент (ЧЕ) — перетворює зазначену величину в цифровий код типу NRZ. Далі комунікаційна підсистема ПКССК забезпечує збір вимірювальної інформації (закодованої в цифровому коді) та її перетворення в модульований оптичний сигнал. Цей сигнал далі передається по волоконно-оптичному кабелю до зони обробки, де за допомогою ВВОС та ПКССК (з використанням фотоприймача) перетворюється в електричний сигнал з послідуючим підсиленням до необхідного логічного рівня цифрових сигналів для МКСТД. Далі цифровий код поступає в систему обробки інформаційних даних ПМЗ.

У випадку передачі сигналів з МКСТД до вимірювальних перетворювачів система працює аналогічно. При цьому для усунення впливу зовнішніх впливів (електромагнітні поля, температура тощо), що виникають в ізольованій зоні під час роботи енергетичного обладнання, засоби обробки інформаційних сигналів з первинних перетворювачів віднесені на безпечну відстань.

Як відомо [6, 8—11] забезпечення живлення первинних вимірювальних перетворювачів ГВОВ в ізольованій зоні може здійснюватися наступними способами:

- за допомогою енергії із джерел, розташованих безпосередньо біля сенсора (батарейного живлення)(Рис. 2, *а*) [6];

- за допомогою енергії, переданої через енергетичний ВОК (Рис. 3, *а*) [6, 8, 11, 12];

- за допомогою енергії, переданої через інформаційно-енергетичний ВОК, реалізований на основі технологій "Wavelength-Division Multiplexing" (Рис. 3, *б*) [9—11].

Організація живлення первинних перетворювачів за допомогою енергії гальванічних елементів(Рис. 2) потребує їх розташування безпосередньо біля сенсора в ізольованій зоні. У цьому випадку до компонентів первинних перетворювачів висуваються вимоги за контролем регламенту споживання енергії при обміні інформацією з обмеження трафіка передаваної інформації для економії енерговитрат, до параметрів батарей та періодичності їх заміни [13]. Тому за сукупністю вимог використання автономних джерел живлення для первинних перетворювачів є недоцільним для живлення ГВОВ контрольно-діагностичних параметрів систем технічної

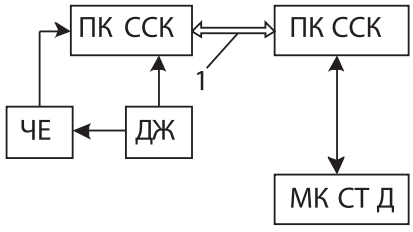

Рис. 2. **Варіант батарейного живлення первинних перетворювачів**

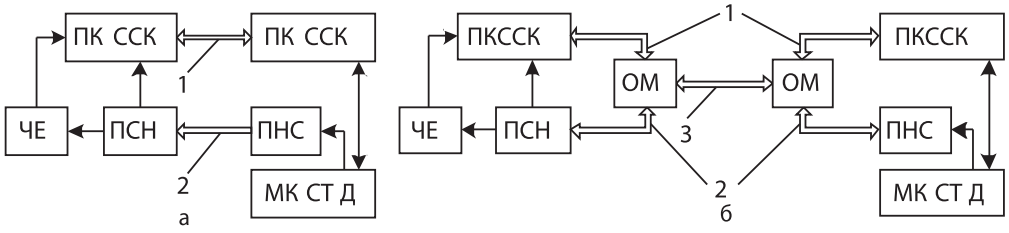

Рис. 3. **Варіант живлення первинних перетворювачів через ВОК: *а* — енергетичний ВОК; *б* — інформаційно-енергетичний ВОК.**

діагностики обладнання ГЕС в ізольованій зоні, які можна віднести до систем жорсткого реального часу, в яких порушення виконання часових вимог рівнозначно відмові системи [14, 15].

Використання енергії, переданої через ВОК, має цілу низку переваг перед використанням традиційних електричних ліній живлення та батарейним живленням [16]. До них відносяться: несприйнятливість до впливу електромагнітних завад, відсутність власного електромагнітного випромінювання, повна гальванічна розв'язка, відсутність струмів витоку, відсутність ризику короткого замикання і іскріння, відсутність необхідності захисту від блискавки, повну гальванічну розв'язку по живленню, несприйнятливість до корозії і вологи, відсутність необхідності заземлення, відсутність сильних спотворень, що вносяться в результати вимірювань металевими лініями живлення тощо [12, 17].

При використанні оптичного живлення необхідно враховувати, що їх ККД залежить від багатьох факторів, таких як температура, тип матеріалів, коефіцієнт ослаблення оптичного випромінювання в ВОК. Обмеження по ККД оптичних систем живлення в основному залежить від ефективності середовища передачі і типу фотогальванічних перетворювачів. Як зазначено в [18] при використанні звичайних сонячних елементів на основі одного напівпровідникового матеріалу в якості фотовальтаїчного перетворювача використовується лише частина енергії переданого багатоспектрального випромінювання. Крім того, напруга холостого ходу таких елементів не може перевищити ширину забороненої зони напівпровідника (наприклад: поширений елемент, що використовують в фотовальтаїчних перетворювачах — арсенід галію (GaAs) —має ширину забороненої зони 1,424 еВ [19]). Ці два ефекти призводять до великих внутрішніх втрат енергії в звичайних елементах, і їх ККД при виборі оптимальної ширини забороненої зони обмежений значенням в 25%. Одним із варіантів збільшення ККД фотовальтаїчних перетворювачів є використання не менше двох елементів з різних напівпровідникових матеріалів з відповідним чином підібраними значеннями ширини забороненої зони, які при послідовному з'єднанні забезпечують високу напругу холостого ходу. Застосування напівпровідників із забороненими зонами, які значно відрізняються по ширині, сприяє більш ефективному використанню оптичного випромінювання і зменшення внутрішніх втрат енергії. При практичній реалізації фотовальтаїчних перетворювачів знаходять застосування два способи побудови елементів [18]. Перший з них пов'язаний із застосуванням оптичних фільтрів в поєднанні з декількома елементами[20], другий — зі створенням елементів, у яких переходи розташовані послідовно по ходу світлових променів[21]. Також при побудові систем оптичного живлення для ГВОВ контрольно-діагностичних параметрів систем технічної діагностики обладнання ГЕС необхідно враховувати [22], що:

- спектральний діапазон джерела оптичного випромінювання повинен відповідати спектральному діапазону фотовальтаїчного перетворювача;

- вихідна напруга та її потужність повинна відповідати потребам споживання віддаленого обладнання в ізольованій зоні;

- ККД оптичної системи живлення в цілому повинно бути якомога вище;

- для забезпечення ефективного зв'язку в ВОК необхідно узгоджувати форму і розмір світлової плями на фотовальтаїчному перетворювачі;

- робота фотовальтаїчного перетворювача повинна здійснюватися в режимі фото сенсора;

- термін служби елементів ВОК повинен відповідати терміну служби системи вимірювачів контрольно-діагностичних параметрів в системах технічної діагностики;

- вплив специфічних умов навколишнього середовища і умов застосування не повинен впливати на роботу системи оптичного живлення.

Враховуючи вище наведене, авторами були розроблені варіанти побудови систем живлення первинних перетворювачів ГВОВ за допомогою енергії, переданої через ВОК, наведені на Рис. 3, *а* та *б*, на яких: ПНС — перетворювач напруга-світло; ПСН — перетворювач світло-напруга; ОМ — оптичний мультиплексор; *1* — ВОК даних; *2* — енергетичний ВОК; *3* — інформаційно-енергетичний ВОК.

При живленні первинних перетворювачів оптичною енергією, через енергетичний ВОК (Рис. 3, *б*) передача оптичної енергії і інформаційні сигнали використовують різні ВОК. У [8] описано такий

перетворювач, розроблений на основі використання фотовальтаїчного перетворювача з гетероструктурою AlGaAs-GaAs, який в діапазоні 790...830 нм забезпечує перетворення оптичного випромінювання в електричну енергію. Як зазначено в [8, 18, 23] ефективність фотовальтаїчних перетворювачів на сьогодні складає до 45 % при щільності потужності 42 W/cm^2 та до 50.2 % для монохроматичного світла при щільності потужності G = 6.5 W/cm^2 [19], що є основою для створення джерел живлення ГВОВ з вихідною напругою 3...5 В і потужністю до 30 мВт[8].

Варіантом збільшення потужності без використання додаткових оптичних елементів — є використання замість волоконно-оптичного кабелю волоконно-оптичного джгута. В [25] описано систему розроблену у 2000 році в NTT Photonics Laboratories (Японія) для передачі електроживлення по волоконно-оптичному кабелю, що забезпечує електричну потужність 2 Вт при напрузі 5 В. В якості оптичного джерела, що перетворює електричну енергію в оптичну, використовувався AlGaAs/GaAs лазерний діод з довжиною хвилі 808 нм та максимальною потужністю оптичного випромінювання 3 Вт, що дозволяє отримати ефективність перетворення електричної енергії в оптичну 11%. Для передачі оптичного випромінювання використовується багатомодове оптоволокно довжиною 200 м і з діаметром серцевини 200 мкм. Для перетворення оптичної потужності в електричну використовувалися шість p-i-n фотодіодів в якості фотовальтаїчних перетворювачів на основі структур GaAs, що дозволило отримати ефективність 31%. В описаній системі для передачі 2 Вт застосовано 5 пар перетворювач-волокно-фотовальтаїчний перетворювач(6-ть фотодіодів), по кожній з пар передавалося 400 мВт оптичної потужності. Сумарна ефективність всієї системи склала 3%. Фірма RLH Industries (США) розробила систему передачі електроживлення з двома багатомодовими волоконно-оптичними кабелями діаметром 62,5 мкм, при цьому система споживає 45 Вт електричної потужності і забезпечує вихідну електричну потужність до 600 мВт [17], та має ефективність 1,3%. В [12] описано оптичну систему живлення, застосування якої дозволяє отримати на виході торця як мінімум 1000 мВт.

При реалізації систем технічної діагностики електрообладнання з обмеженнями на кількість ліній, що можуть бути використані або з обмеженням на діаметр таких ліній доцільно використання інформаційно-енергетичних(ІЕ) ВОК, в яких передача інформації і живлення здійснюється по спільному багатоходовому волоконно-оптичному кабелю(Рис. 3, *б*) шляхом хвильового оптичного мультиплексування WDM (Wave division multiplexing) [9, 10, 24]. Використання технології WDM дозволяє у порівнянні із традиційними розділеними ВОК для передавання вимірювальної інформації та живлення отримати ряд переваг:

- забезпечення об'єднаного передавання енергетичного живлення, даних керування та вимірювальної інформацій;
- забезпечення підвищеної інформаційної захищеності каналу;
- підвищення пропускної здатності ВОК;
- можливість організації двостороннього зв'язку;

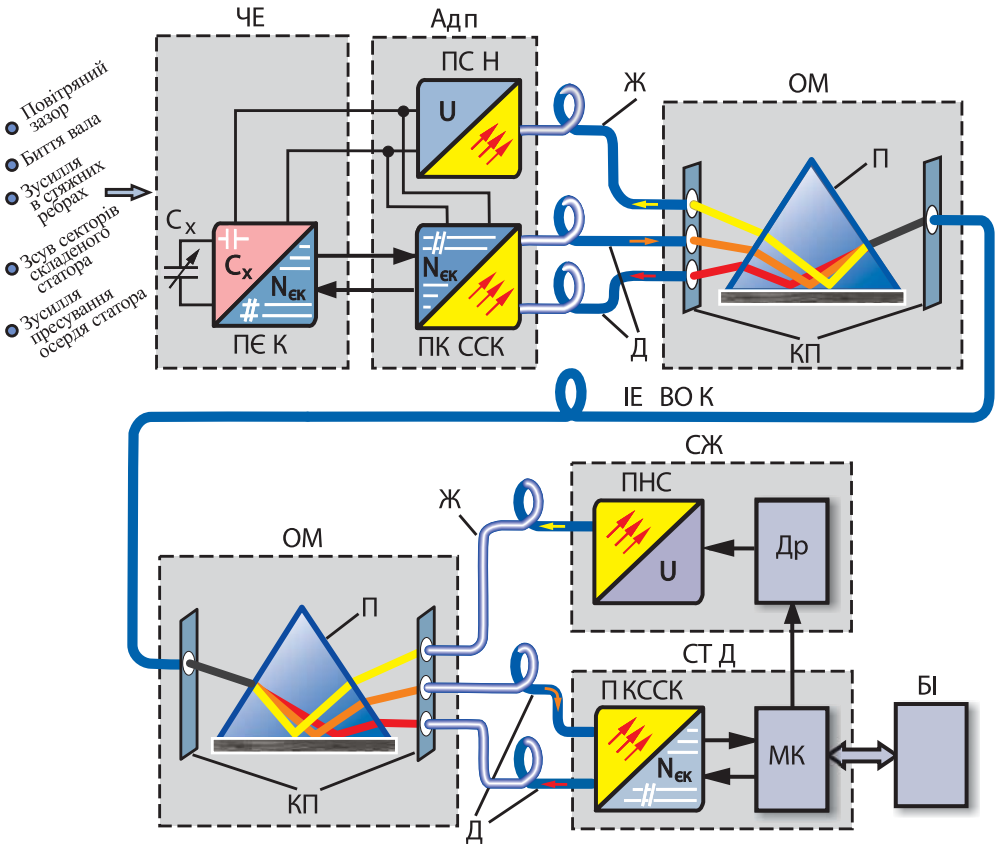

Рис. 4. **Варіант побудови ГВОВ в системі технічної діагностики електрообладнання з інформаційно-енергетичним ВОК**

- нарощування інформаційної ємності вже прокладених оптичних ліній зв'язку;

- здійснення передачі різних видів даних на різних несучих хвилях від різних типів первинних перетворювачів до одного МКСТД.

- використання оптичного волокна (діаметром ∅ 200—1000 мкм), в якому крім передачі інформації реалізується передавання енергії живлення оптичним потоком високої потужності шляхом хвильового оптичного мультиплексування.

У [10] описано використання ІЕ ВОК, який функціонує аналогічно звичайній волоконно-оптичній лінії, за винятком того, що у пристрої передбачено повністю автономне дистанційне живлення приймального блока від оптичного енергетичного каналу при оптичній потужності P_{pow} = 90 мВт на довжині хвилі λ_{pow} = 785 нм при цьому для передавання даних використано довжину хвилі λ_{inf} = 658 нм та потужність P_{inf} = 5 мВт.

Якщо використати ємнісні сенсори[26] як первинні перетворювачі в системах технічної діагностики при контролі зміни фізичних параметрів вузлів ГГ, то за описаним принципом [9—11] можна реалізувати ГВОВ: повітряного зазору між статором та ротором, биття вала, зусилля в стяжних ребрах, величини взаємного зсуву секторів складеного статора та зусилля пресування осердя статора. У цьому випадку отримується поєднання високої завадостійкості ІЕ ВОК між сенсорами і вторинними перетворювачами та самих сенсорів з простотою реалізації останніх [26]. Розроблена схема ГВОВ для систем технічної діагностики приведена на Рис. 4., де: Адп — адаптер ; Ж — ВОК живлення; Д — ВОК даних; П — призма; КП — пластина для кріплення ВОК; СЖ — система живлення; Др — блок керування роботою ПНС; СТД — система технічної діагностики; БІ — блок відображення діагностичної інформації.

Робота запропонованого на Рис. 4 ГВОВ відрізняється від описаної раніше (Рис. 1) тим, що для живлення вузлів первинного перетворювача, передачі даних від первинного перетворювача й даних керування роботою первинного перетворювача використовується один ВОК. Основним елементом ГВОВ при цьому є оптична призма, в якій за рахунок дисперсії, тобто залежності показника заломлення від довжини хвилі оптичного випромінювання, відбувається просторове розділення (або об'єднання для зворотного напрямку) оптичних хвиль.

В ГВОВ три оптичні канали, які працюють на довжині оптичного випромінювання λ_1 (живлення), λ_2 (вимірювальна інформація) і λ_3 (дані керування). Торець волоконного світловода (ІЕ ВОК), по якому передається оптичне випромінювання трьох каналів, розташовується на пластині кріплення. З торця ІЕ ВОК пучок падає на призму і хвилі різної довжини відхиляються призмою на різні кути. З призми виходять паралельні пучки різного спрямування. За допомогою другої пластини кріплення світоводів з лінзами ці пучки надходять в волоконні світловоди для передачі живлення(Ж), передачі (Д) й приймання даних (Д).

Розроблені принципи побудови ГВОВ для систем технічної діагностики з ємнісними сенсорами обґрунтовують реальність їх застосування для вирішення завдань моніторингу стану електроенергетичного устаткування і створення засобів вимірювання контрольно-діагностичних параметрів обладнання електростанцій для підвищення ефективності його роботи з можливістю подовження терміну експлуатації

Висновок. Застосування ГВОВ контрольно-діагностичних параметрів систем технічної діагностики обладнання ГЕС є перспективним напрямком підвищення надійності і безпеки експлуатації енергетичного обладнання. За необхідності розміщення первинних перетворювачів на значній відстані від засобів обробки (ізольованої зони) їх живлення може здійснюватися за допомогою оптичної енергії, переданої через ВОК. Передача енергії може здійснюватися наступними способами: за допомогою енергії із джерел, розташованих безпосередньо біля сенсора (батарейного живлення); за допомогою енергії, переданої через енергетичний ВОК; за допомогою енергії, переданої через інформаційно-енергетичний ВОК, реалізований на основі технологій "Wavelength-Division Multiplexing".

ЛІТЕРАТУРА

1. *Програма* діяльності кабінету міністрів україни [Електронний ресурс] — Режим доступу: http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/doccatalog/document?id=244972953(дата звернення: 24.05.2017).

2. *Міністерство* енергетики та вугільної промисловості України. Виробництво електроенергії енергетичними компаніями та електростанціями України за 12 місяців 2016 року. [Електронний ресурс] — Режим доступу: http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/uk/publish/article?art_id=245183779&cat_id=245183225(дата звернення: 24.05.2017).

3. *Енергетична* галузь України: підсумки 2015 року [Електронний ресурс] /Видавництво "Заповіт", 2016 — Режим доступу: http://old.razumkov.org.ua/upload/2016_ENERGY.pdf (дата звернення: 24.05.2017).

4. *Єрмак С. О.* Дослідження зарубіжного досвіду та перспектив використання відновлювальних джерел енергії в Україні / С. О. Єрмак, О. В. Бугаєнко // Торгівля і ринок України. — 2016. — Вип. 39—40. — С. 28—36.

5. *Левицький А.С.* Гібридні волоконно-оптичні вимірювачі контрольно-діагностичних параметрів гідрогенераторів.

/ А.С. Левицький, Є.О. Зайцев/ Гідроенергетика України. — 2015. — № 3—4. — С. 32 — 33.

6. *Ключников А.А.* Волоконно-оптические информационно-измерительные системы — путь к повышению надежности эксплуатации генераторов АЭС, ТЭС и ГЭС / А.А.Ключников, А.С.Левицкий, Г.М.Федоренко / Проблеми безпеки атомних станцій і Чорнобиля. — 2012. — Вип. 18. — С. 57—65.

7. *Rosolem J.B.* Optical system for hydrogenerator monitoring / J.B. Rosolem, C. Floridia, J. Sanz / Proc. International Council for Power Electroenergetical Systems CIGRE 2010. — Paris (France) — 2010. — P. 1—8.

8. *Задворнов С.А.* Исследование методов построения гибридных волоконно-оптических измерительных систем: автореф. дис. канд. техн. наук: спец. 01.04.01. — М., 2009. — 23 с.

9. *Wang M.R.* Wavelength-division multiplexing and demultiplexing on locally sensitized single-mode polymer microstructure waveguides / M.R. Wang, R.T. Chen, G. J. Sonek, T. Jannson // Optics letters. — 1990 — vol. 15, No. 7 — P. 363—365.

10. *Маліновський В. І.* Інформаційна мережа з об'єднаними оптичними інтерфейс-каналами: автореф. дис. канд. техн. наук: спец. 05.13.05 — Вінниця, 2010. — 20 с.

11. *Turan J.* Optically powered fiber optic sensors/J.Turфn, L.Ovsenik, J. Turan / Acta Electrotechnica et Informatica No. 3, Vol. 5, 2005 — P. 1—7.

12. *Качемцев А.Н.* Гибридная оптическая система питания электронных устройств / А.Н.Качемцев, В.К.Киселев, Г.Н.Семьин, А.Н.Труфанов //Труды 2-го совещания по проекту НАТО SfP-973799 Semiconductors, Нижний Новгород, 2002 — С.165—170.

13. *Журавська І.* Розроблення бездротових енергонезалежних інформаційно-вимірювальних мереж критичного застосування військово-цивільного призначення [Електронний ресурс] / І.Журавська, О.Корецька, М.Мусієнко / Комп'ютерна інженерія, ВНТУ, 2016 — С. 79—81. — Режим доступу: http://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream /handle/-123456789/13348/79-81.pdf?sequence=1 (дата звернення: 24.05.2017).

14. *Столлингс. В.* Операционные системы. Внутреннее устройство и принципы проектирования. 4-е издание.: Пер. с англ. — М.: Изд.дом "Вільямс", 2004 г. — 848 с.

15. *Иванов Ю. А.* Управление циклом реального времени встроенных систем при моделировании /Ю.А. Иванов, В.А. Святный // Наукові праці Донецького національного технічного університету, серія "Проблеми моделювання та автоматизації проектування". — 2010. — № 8(168). — С. 5—14.

16. *PV*-Cells for Optical Power Transmission. — Режим доступу: https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/-documents/infomaterial/brochures/photovoltaik/14e_ISE_Flyer_III-V_OpticalPowerTransmission.pdf (дата звернення: 24.05.2017).

17. *Федоров Р. А.* Анализ системы передачи электропитания по одномодовому оптическому волокну[Електронний ресурс]/ Р.А. Федоров, А.Л. Чиж, С.А. Малышев/ БГУ, Институт физики НАН Беларуси, Минск, Беларусь. — Режим доступу: http:// elib.bsu.by/bitstream/123456789/28650/1/-122-126%234.pdf (дата звернення: 24.05.2017).

18. *Чопра К.* Тонкопленочные солнечные элементы: Пер. с. англ./ К. Чопра, С. Дас — М.: Мир, 1986. — 435 с.

19. *Riesen S.* GaAs photovoltaic cells for laser power beaming at high power densities / S.Riesen, U.Schubert, A.W. Bett / 17th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Munich, Germany, 22—26 October 2001 — P. 182—185.

20. *Dakin J.* Handbook of Optoelectronics: vol. I / J. Dakin, R. Brown /Boca Raton: CRC Press, 2006. — 1563 p.

21. *Herb J.* Commercialization of New Lattice-Matched Multi-Junction Solar Cells Based on Dilute Nitrides. Subcontract Report NREL/SR-5200-54721 — San Jose, California: NREL —2012— 28 p.

22. *Pena R.* GaAs Multiple Photovoltaic Converters with an Efficiency of 45% for Monochromatic Illumination/ R. Pena, C. Algora, I. Anton/ 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Osaka, Japan 11-18 May 2003.— Arisumi Printing Inc., Japan, 2003 — S. 228—231.

23. *Солнечные* элементы [Електронний ресурс] — Режим доступу: http://www.solarhome.ru /basics/pv /tech-cells.htm (дата звернення: 24.05.2017).

24. *Nelson B.E.* Wavelength Division Multiplexed Optical Interconnect Using Short Pulses/ B. E. Nelson, G.A. Keeler, D. Agarwal, N.C. Helman, D.A.B. Miller//IEEE Journal of selected topics in quantum electronics, vol. 9, no. 2, March/April 2003 — с. 486—491

25. *Yasui T.* A stable 2 W supply optical-powering system / T. Yasui, J. Ohwaki, M. Mino, T. Sakai/ Conference Record of the Twenty-Eighth IEEE: Photovoltaic Specialists Conference, 15-22 SEPTEMBER 2000. —Danvers, MA, 2000. — P. 1614—1617.

26. *Левицький, А.С.* Контроль стану потужних гідро- та турбогенераторів за допомогою ємнісних вимірювачів параметрів механічних дефектів / Левицький А.С., Федоренко Г.М., Грубой О.П. — Київ: Ін-т електродинаміки НАН України, 2011 — 242 с.

© Зайцев Є.О., Левицький А.С., 2017