
ВОЛОКОННО-ОПТИЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ В ІНФОРМАЦІЙНИХ (INTERNET, INTRANET ТОЩО) ТА ЕНЕРГЕТИЧНИХ МЕРЕЖАХ

УДК 681.3.021

В.П. КОЖЕМ'ЯКО, В.І. МАЛІНОВСЬКИЙ, Я.І. ЯРОСЛАВСЬКИЙ

ЗАСТОСУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЙ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ В МОДЕЛІ ІНФОРМАЦІЙНИХ МЕРЕЖ ІЗ РОЗПОДІЛЕНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ЕНЕРГІЇ

*Вінницький національний технічний університет,
21021, Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, Україна*

Анотація. В роботі проаналізовані сучасні типи фотоелектричних перетворювачів, які перетворюють сонячну енергію у електроенергію для живлення інформаційних мереж. Проаналізовано енергетичну ефективність фотоелектричних перетворювачів для вибору і застосування їх в якості розподілених енергетичних джерел в інформаційних мережах. Запропоновано модель розподіленої інформаційної мережі з фотоелектричними перетворювачами сонячного випромінювання у вузлах, яка має вищу енергетичну автономність та інформаційну стабільність.

Ключові слова: фотоелектричний перетворювач (ФЕП); інформаційна мережа (ІМ); розподілені джерела енергії на ФЕП, волоконно-оптичний канал.

Аннотация. В работе проанализированы современные типы фотоэлектрических преобразователей, которые превращают солнечную энергию в электроэнергию для питания информационных сетей. Проанализирована энергетическая эффективность фотоэлектрических преобразователей для выбора и применения их в качестве распределенных энергетических источников в информационных сетях. Предложена модель распределенной информационной сети с фотоэлектрическими преобразователями солнечного излучения в узлах, которая имеет большую энергетическую автономность и информационную стабильность.

Ключевые слова: фотоэлектрический преобразователь (ФЭП); информационная сеть (ИС); распределенные геоинформационно-энергетические сети, волоконно-оптический канал.

Abstract. The modern types of photovoltaic converters, which convert sunny energy into electric power for the feed of informative networks are in-process analyzed. In article was analyzed power efficiency of different types of photovoltaic cells for the purpose of them application as the distributed power sources in data networks. Is offered the model of the distributed data network with the solar photovoltaic converters in the network nodes, that has a high information stability and power uninteraption.

Key words: photovoltaic converter, data network, distributed geoinformation-power networks, fiber-optical channel.

ВСТУП

В сучасних інформаційних мережах, які стрімко розвиваються в наш час, постає важливе завдання забезпечення високого рівня стабільності функціонування наряду із збільшенням важливості інформації, яка зберігається, обробляється та передається. Сфера застосування комп'ютерних інформаційних мереж (ІМ) постійно розширюється від локальних корпоративних мереж до інформаційних мереж регіонального і глобального рівня, більшість з яких організовані в основному на базі архітектури «клієнт-сервер» [1].

Комп'ютерна інформаційна мережа являє собою сукупність апаратно-програмних засобів і обчислювальних станцій та допоміжного комутуючого, передаючого, ретрансляційного обладнання, яке зв'язано між собою каналами передавання інформації. Всі ІМ виконують дві основні важливі інформаційні

функції: 1) надійний колективний доступ та оброблення інформації за допомогою обчислювальних структур; 2) високостабільне передавання інформації між обчислювальними структурами ІМ, вузлами та іншими компонентами мережі. Більшість ІМ мають ієрархічний тип організації і використовують базові топології типу «кільце», «дерево», «шина», «зірка» або «куб».

На всіх рівнях ієрархії мереж постає надзвичайно важлива проблема підвищення стабільності функціонування апаратно-програмних комплексів ІМ. Традиційно вона вирішується використанням резервного копіювання даних та резервування апаратури і каналів зв'язку із використанням апаратної збитковості. Але не завжди вдається вирішити завдання підвищення стабільності функціонування ІМ традиційними шляхами. Крім того, при використанні резервування апаратно-програмних засобів, значно підвищуються затрати на інсталяцію та експлуатацію мереж.

Для вирішення цього завдання необхідний пошук нових та вдосконалення існуючих шляхів підвищення стабільності як на рівні представлення та кодування інформаційних даних, так і на основі вдосконалення архітектури мереж із врахуванням і надійного енергопостачання апаратних складових ІМ: серверів, комутаторів, шлюзів, абонентських станцій та віддаленого обладнання.

Аналіз характеру і причин збоїв в інформаційних мережах, проведений в [2, 3] показав, що більшість відказів ІМ викликані перебоями в мережі енергетичного живлення або недостатнім рівнем забезпечення резервного енергоживлення за допомогою традиційних джерел безперебійного живлення (ДБЖ). Тому, одним із перспективних можливих шляхів підвищення інформаційної стабільності є забезпеченням енергетичної автономності за допомогою розподілених альтернативних (відновлювальних) джерел енергії. Такими джерелами можуть бути сонячні фотоелектричні перетворювачі (ФЕП), з яких складаються промислові модулі сонячних батарей та їх поєднання із іншими перспективними технологіями генерації та передачі енергії.

Для забезпечення високої інформаційної стабільності та надійності функціонування мереж потрібно застосовувати нові технічні засоби, в якості яких можуть виступати розподілені фотоелектричні джерела енергії. Також для вирішення цього завдання на якісному рівні повинні бути розроблені нові методи та підходи інформаційного кодування при передаванні інформації в каналах зв'язку мережі.

Метою статті є аналітичний огляд та вибір оптимального типу технологій фотоелектричних перетворювачів сонячного випромінювання, для застосування в моделі інформаційних мережах в якості розподілених енергетичних джерел.

ОГЛЯД СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

Зараз напряму сонячної енергетики приділяється багато досліджень і розробок, оскільки фотовольтаїка є одним із найбільш швидкозростаючих секторів техніки і може бути використана як ефективний засіб підвищення стабільності функціонування ІМ по енергетичній складовій. Одним із перспективних способів підвищення стабільності функціонування обладнання, є використання автономних джерел енергії на базі фотоелектричних перетворювачів (ФЕП), які перетворюють сонячне випромінювання в електроенергію.

Основним розповсюдженим типом ФЕП є кремнієві фотогоальванічні комірки (рис. 1.). В якості матеріалу сучасні ФЕП використовуються здебільшого кристалічний кремній Si, але існують багато перспективних розробок ФЕП [4] на базі аморфного кремнію (Si) та галій арсеніду (GaAs) [5], наночарів вуглецю (C) [5] та інших матеріалів.

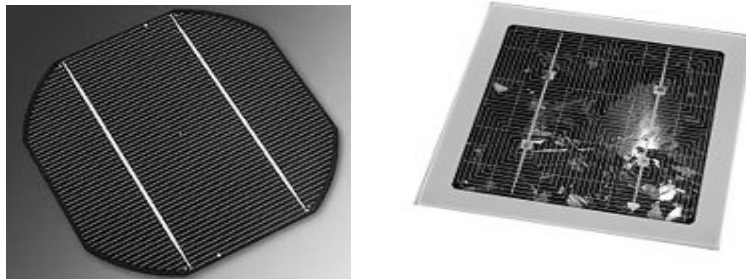


Рис.1. Фотоелектричні перетворювачі на основі кристалічного кремнію (Si)

Комірки ФЕП, з яких будуються фотоелектричні панелі перетворюють оптичну світлову енергію Сонця в електроенергію. Основною характеристикою ФЕП є ефективність фотоелектричного перетворення або коефіцієнт корисної дії (ККД), який для наявних на сьогоднішній день технологічних промислових ФЕП лежить в межах від 12 % до 22% для кристалічних кремнієвих ФЕП [5, 6] та досягає значень 39-45% для концентраторних ФЕП на основі GaAs та інших перспективних розробок [5]. Промисловий кремнієвий фотоелектричний модуль являє собою деяку кількість одиночних комірок

ФЕП, що механічно об'єднані в одній конструкції і електрично з'єднані для отримання визначеного рівня електричної енергії. Промислові сонячні панелі зазвичай виготовляються на номінали 180-300Вт із встановленими рівнями робочих струму та напруги (від 12В до 48В при струмі 3.5-15А). До переваг сонячних систем можна віднести:

- доступність і невичерпність сонячного випромінювання – як автономного джерела енергії;
- теоретично повна екологічна безпека для навколишнього середовища;
- економічність при використанні ФЕП;
- мінімальний рівень планового технічного обслуговування та висока надійність (близько 25-50 років експлуатації якісних фотоелементів, із втратою потужності до 20% від початкової);

Не зважаючи на переваги, сонячних фотоелектричних систем мають також і недоліки:

- не повне перетворення світлової енергії в електричну;
- залежність від погоди, часу доби та пори року, і як наслідок необхідність акумуляції енергії;
- порівняно висока вартість конструкції на сьогоднішній день (до 1.0-1.2\$/1Вт встановленої потужності всієї системи станом на 2013р.). Але вартість ФЕП постійно знижується та за останні 2 роки зменшилась майже вдвічі, за рахунок масового виробництва кремнієвих ФЕП у всьому світі;
- необхідність періодичного очищення поверхні від пилу та атмосферних опадів;

Хоча існує деякий ряд недоліків, переваги від процесу отримання сонячної електроенергії значно більше і вони носять більш якісний характер особливо для задач автономного енергозабезпечення в локальних місцях, таких як інформаційні комп'ютерні мережі.

В промислових проектах і розробках широкого поширення отримали 7 типів фотоелектричних перетворювачів та сонячних батарей на їх основі:

- ФЕП на монокристалічному кремнії з енергетичною ефективністю (ККД) до 22 %;
- ФЕП на основі полікристалічного кремнію (ККД до 21%);
- Тонкоплівкові ФЕП на основі аморфного кремнію Si (ККД до 12-14%);
- Концентраторні ФЕП на основі GaAs або інших матеріалів (ККД до 45-50%);
- ФЕП на основі нанотехнологічних матеріалів (кремній Si, арсенід галію GaAs, нанорозмірний вуглець C, складні сполуки полі органічних матеріалів) з ефективністю від 10 до 35%;
- CdTe/CIS/CIGS (кадмій-теллурові) фотоелектричні модулі (ефективність до 15-18%).
- Багатошарові ФЕП аморфного кремнію та CdTe – плівок .

У більшості економічно дешевих ФЕП використовується аморфний кремній, що дозволяє досягати енергетичної ефективності комірки до 7-11% [4]. У якісних ФЕП, з яких будують промислові сонячні електроенергетичні системи, використовується монокристалічний або полікристалічний кремній з технологічним ККД 18-22 % [4, 6]. Різниця між монокристалічними та полікристалічними ФЕП складає 1-3% по показнику енергетичної ефективності. Це забезпечується за рахунок того, що полікристалічні пластини фотоматеріалу більш толерантні до косих та неортогональних світлових промінів (краще сприймають розсіяне та кутове світло). Середній показник вироблення електричної енергії в цих типах ФЕП практично однаковий (відрізняється на 1-1.5%), як й їх вартість в останніх комерційних моделях. В концентраторних ФЕП на базі арсеніду галію GaAs досягнута ефективність (ККД) до 45% [5], що є найвищим значенням для промислових зразків. Але такий тип ФЕП має вагомий недолік – високу вартість технології, що в 5-10 разів вища за інші типи. Органічні матеріали та нанотехнологічні підходи для реалізації ФЕП не набули широкого поширення за межами лабораторних досліджень, за рахунок нестабільності в часі основних електричних та оптичних параметрів. Такі фотоелектричні модулі мають незначний час експлуатації та високий коефіцієнт фотодеградації [4].

За рахунок порівняно невеликого зниження потужності у порівнянні із поширеними фотоелементами, тонкоплівкові фотоелементи дозволяють значно раціональніше використовувати кремній Si. В якості альтернативних варіантів кремнієвим кристалічним ФЕП використовуються розробки тонкоплівкових ФЕП з аморфного кремнію, в яких на відміну від кристалічного матеріалу немає структурованого положення атомів. В аморфного кремнію гірше напівпровідникові властивості та в результаті менший ККД перетворення світла. В технологіях CSG (Crystalline Silicon on Glass), CdTe (кадмій-теллурові) та CIS в панелях ФЕП використовується спеціальний технологічний процес, що дозволяє наносити тонкий шар кристалічного кремнію (близько 2мкм) безпосередньо на скляні підкладки, тоді як товщина традиційних ФЕП складає 0.2-0.3мм (200-300мкм) [7]. Електричні контактні провідники в комірках ФЕП підключають із використанням технології лазерного зварювання або трафаретного друку. Перші фотоелектричні модулі, зроблені за технологіями CSG або CIS мали ККД близько 7%, за технологією CdTe – близько 9%. Основними матеріалами таких модулів ФЕП є мідь (Cu), індій (In) та селен (Se). В деяких розробках ФЕП (такі елементи позначалися як CIGS) використовувався також галій (Ga). CIS модулі мають найбільший ККД серед цієї групи ФЕП – до 11% [8]. Також розробляються технології та методи створення багатошарових ФЕП [10] з вищою ефективністю, в яких кожен шар поглинає відповідно свою ділянку спектру сонячного випромінювання. Існує багатошарова технологія

створена ФЕП, яка передбачає розміщення від 3-х до 10-ти шарів напівпровідника із різним ступенем легування і відповідно різною областю активного поглинання спектра випромінювання, які розміщують послідовно для кожного наступного шару. Завдяки N-кількості шарів, такий тип ФЕП може перетворювати видиме сонячне випромінювання з ефективністю у 1.5-2 рази вище. Загальний ККД багатшарових тонкоплівкових 17-18% [4, 5]. Це менше у порівнянні із традиційними кристалічними фотоелектричними панелями, що пояснюється поглинанням світла і тепловими втратами енергії в об'ємній структурі напівпровідникового матеріалу. Товщина одиначної плівки ФЕП такого типу складає близько 20 нм, при ефективному виході до 20 мА електричного струму з кожного квадратного сантиметра.

ФОТОЕЛЕКТРИЧНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ КОНЦЕНТРАТОРНОГО ТИПУ

Перспективною з точки зору ефективності і компактності для використання в ІМ є технологія концентраторних ФЕП на основі GaAs [5, 9-11], які базуються на використанні напівпровідникових структур GaAs або інших матеріалів типу $A^{III}B^V$. В концентраторних комірках CPV (Concentrating Photovoltaics) передбачено фокусування сонячного випромінювання за допомогою плоских лінз Френеля на фотоелементи GaAs з невеликою площею та відносно малими геометричними розмірами, які працюють при високих значеннях інтенсивності (рис.2).

Промисловістю виготовляються одноперехідні та гетероперехідні AlGaAs/GaAs концентраторні ФЕП. Одноперехідні (з одним гетеропереходом) фотоелектричні модулі з ККД близько 30% та багатперехідні багатшарові ФЕП на базі гетероструктур на твердих розчинах AlGaAs/GaAs - In/InGaAs - (або GaSb) із ККД до 45-52% [9, 11]. У результаті проведених досліджень і розробок компаніями-виробниками створюються фотоелектричні модулі на базі 16-ти, 24-х і 48-ми елементними лінзовими блоками і модулями на гетероструктурах AlGaAs/GaAs. Вони орієнтовані для застосування у високопродуктивних сонячних елементах для задач локального забезпечення енергетичного живлення. ФЕП концентраторного типу, які концентрують потік випромінювання на активний напівпровідник меншої площі показано на рис. 3 та рис. 4.

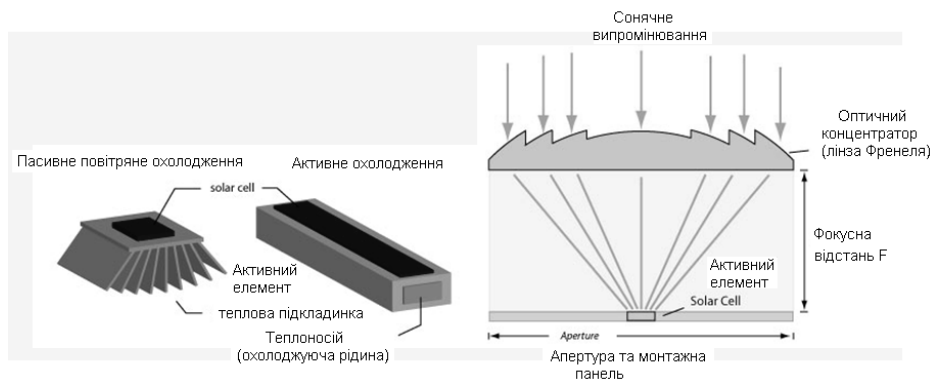


Рис.2. Фотоелектричні перетворювачі концентраторного типу CPV: а) конструкція та кріплення активного елемента на систему охолодження; б) використання оптичної схеми із лінзою Френеля для фокусування сонячного випромінювання на активну ділянку ФЕП

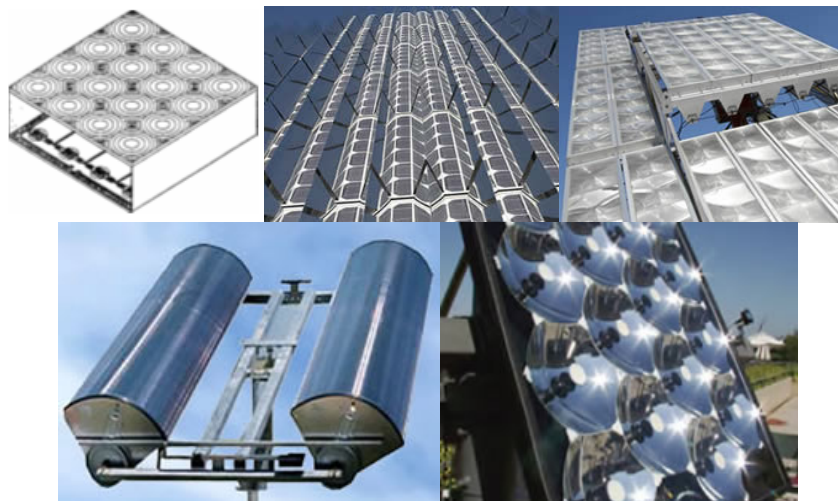


Рис.3. ФЕП із концентраторами на основі лінз Френеля, що встановлені на промислових об'єктах [10]

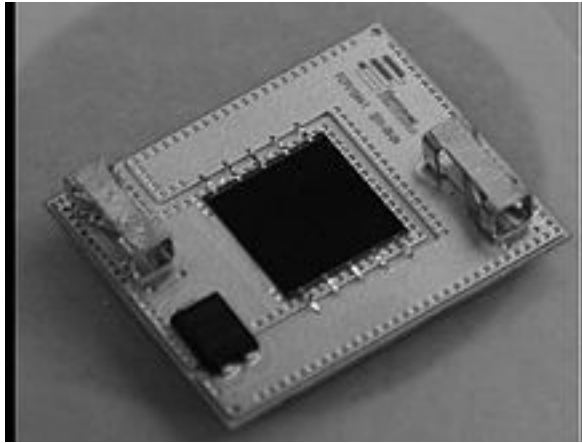


Рис.4. Фотографія CPV- комірки концентратора модуля ФЕП на основі GaAs [10]

Концентрування сонячного випромінювання дозволяє підвищити ККД гетероструктурних ФЕП до 35% і більше в одноперехідних елементах, та до 45% [10] – у каскадних багатоперехідних. Відповідно загальна площа і маса установок з концентраторами, витрата матеріалів і обсяг робіт також зменшуються. В космічній галузі такі ФЕП на основі GaAs і з'єднань A_3B_5 використовуються для забезпечення автономного живлення супутникового обладнання з високим ККД та в умовах вищого радіаційного впливу та інших агресивних факторів у порівнянні з кремнієвими ФЕП.

Конструкція концентраторних ФЕП передбачає використання систем концентрування сонячного випромінювання на основі оптичної системи з плоских або сферичних дзеркал (рис. 5).

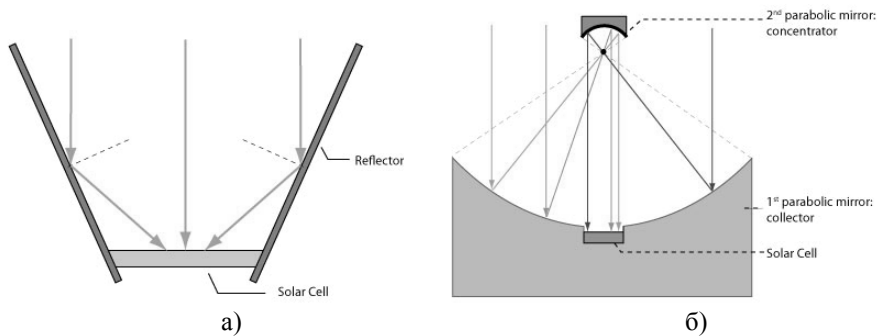


Рис.5. Конструкції концентраторів сонячного випромінювання: а) лінійного дзеркального типу; б) на основі сферичних дзеркал

В деяких роботах [10, 11] повідомляється, що в окремих лабораторних розробках отримані концентраторні сонячні елементи із ефективністю більше 47%. Крайні результати по показнику ефективності фотоелектричного перетворення з ККД =47.5% показують концентраторні ФЕП на основі гетероструктур GaAs (галій арсенід) з оптичними концентраторами на лінзах Френеля, виготовлені у ФТІ ім. Йоффе [12] та функціонують у спектральному діапазоні 0,55-3.7 мкм (рис. 6). Основним недоліком концентраторних ФЕП є їх висока собівартість та технологічна складність у порівнянні із традиційними ФЕП.

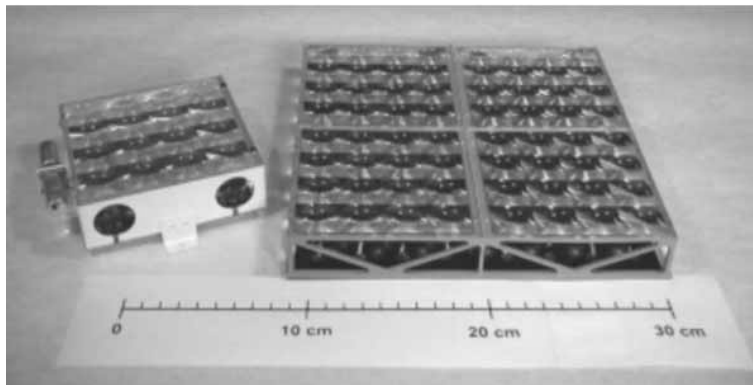


Рис.6. Конструктивне виконання концентраторних ФЕП виробництва ФТІ ім. Йоффе [12]

Енергетичні можливості таких ФЕП складають до 0.46 кВт/м^2 при інтенсивності світлового випромінювання 1 кВт/м^2 . Слід відзначити, що в більшості серійних ФЕП і сонячних панелей на їх основі цей показник становить $130\text{-}140 \text{ Вт/м}^2$ в стандартних умовах STC (Standart Test Conditions).

На даний момент світові дослідницькі організації, такі як EPIA, Munich Photovoltaic Research Institute, MIT займаються проблемами підвищення ефективності та робочих характеристик сонячних комірок то віддають перевагу нанотехнологічним методам інтеграції домішок кремнію (Si) та арсеніду галію (GaAs) у вигляді наноточок у тверді підкладки. Це дозволяє досягти поки що в промислових серіях високих значень ефективності з ККД $>43.5\%$ [13] та високої надійності роботи фотоелектричних перетворювачів.

ЕНЕРГЕТИЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ФЕП

Енергетичні можливості промислових кристалічних ФЕП, які виготовляються серійно, складають до $170\text{-}280 \text{ Вт/м}^2$, при щільності оптичної потужності 1 кВт/м^2 . На рис. 7 наведено порівняння умовних активних площ фотоелектричних перетворювачів різних типів, що необхідні для вироблення 1000 Вт електроенергії.

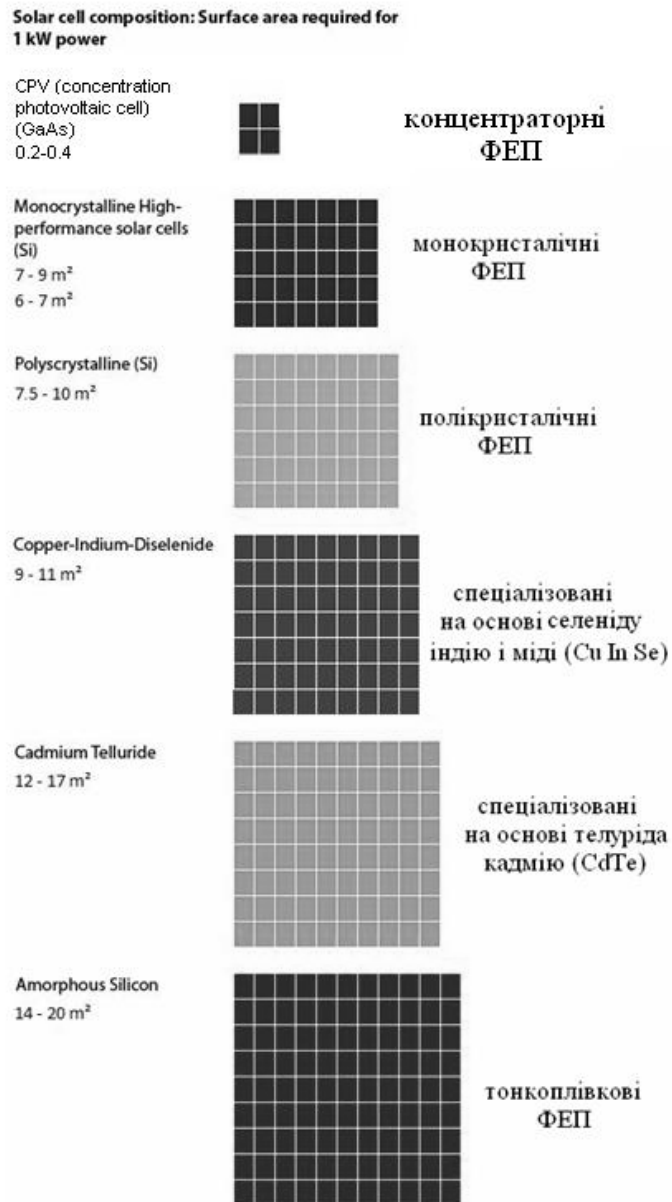


Рис.7. Порівняння площ різних типів ФЕП для отримання 1кВт електричної енергії: для монокристалічного $6\text{-}9 \text{ м}^2$; полікристалічного $7.5\text{-}10 \text{ м}^2$; тонкоплівкового $14\text{-}20 \text{ м}^2$; концентраторні ячейки $0.2\text{-}0.4 \text{ м}^2$

Із рис. 7 видно, що для більшості кристалічних та тонкоплівкових (в т.ч. аморфних) ФЕП, потрібна значна площа поверхні для отримання однакового значення енергії, через невисокий ККД. Це

обмежує їх використання по геометричним розмірам в деяких задачах, в тому числі і у вузлах інформаційних мереж. Для промислового і локального використання найчастіше застосовуються модулі з полікристалічного чи монокристалічного кремнію. Тонкоплівкові батареї, в процесі роботи краще сприймають розсіяне випромінювання та мають менші втрати потужності при затемненні окремих областей. Також вони краще функціонують при вищих робочих температурах, однак через низький ККД значно поступають кристалічним та концентраторним ФЕП.

Сонячні ФЕП з аморфного кремнію використовуються рідше, за рахунок низьких значень ККД та стабільності параметрів в часі. Спеціалізовані тонкоплівкові технології, такі як Corper Indium Diselenide і Cadmium-Telluride (CdTe) сьогодні також застосовуються рідше, за рахунок тих же факторів та високої токсичності хімічних елементів. Проте тонкоплівкові ФЕП мають перевагу перед кристалічними – меншу у 10-100 разів товщину та використання матеріалів, а також більшу здатність до перетворення дифузного світла у порівнянні із кристалічними ФЕП.

Сонячні фотоелектричні перетворювачі концентраторного типу (CPV) мають найбільшу ефективність по показнику площі. Тому їх використання є пріоритетним варіантом для створення компактних систем автономного енергетичного живлення апаратних блоків інформаційних мереж.

У концентраторних ФЕП енергія оптичного випромінювання сонячного спектру перетворюється у електричну формоу шляхом внутрішнього фотоелектру у напівпровідникових фотоелементах на основі гетероструктур A_3B_5 , матеріалів кремнію Si, германію Ge, індію In, арсеніду As та галію Ga та їх твердих розчинів SiP, GeIn, GaAsP, InGaAs, InGaAsP та AlGaAs-GaAs. Такі фотоелементи і модулі на їх основі мають малу ефективну робочу площу S_{ef} до $1m^2$ і менше, яка пропорційна відсотку отриманої енергії. Вихідна потужність модуля ФЕП буде пропорційна прийнятій інтенсивності оптичної потужності сонця I_{opt} ($I_{opt}=P_{opt}/S$, Вт/м²), величині коефіцієнта корисної дії перетворення η , коефіцієнта поглинання k , ефективній площі S_{ef} , а також косинусу кута падіння α :

$$P_{FEP} = I_{FEP} \cdot U_{FEP} = \eta \cdot k \cdot I_{opt} \cdot S_{ef} \cdot \cos \alpha. \quad (1)$$

Отже аналізуючи ефективність ФЕП, можна зробити висновок, що при нехтуванні показниками вартості фотоелементів, оптимальним типом ФЕП для використання у ІМ є концентраторні модулі фотоелектричних перетворювачів на основі GaAs, оскільки мають найвищий ККД при найменших геометричних розмірах.

Для більш ефективного перетворення, кут падіння випромінювання на активну поверхню α повинен максимально наблизитися до 90° , що відповідає умові максимального перетворення при $\cos 90^\circ = 1$ у (1), тобто:

$$P_{FEP} = \eta \cdot k \cdot I_{opt} \cdot S_{ef}. \quad (2)$$

Вироблення електроенергії у стаціонарних (не слідкуючих за Сонцем) ФЕП помітно змінюється протягом доби та може зменшуватись на 30-40% від максимального значення. Це можна показати, оскільки при відмінному від 90° куті падіння косинус кута в (1) змінюється від 0.2 до 1. та викликає відповідне зменшення ефективної вихідної потужності.

Коефіцієнт корисної дії ФЕП світлової енергії в електричну визначається за формулою:

$$\eta = \frac{P_{elect}}{P_{optic}} \cdot \gamma \cdot 100\% \approx \frac{I_r U_r}{\Phi \cdot S \cdot \sin \varphi} \cdot \gamma \cdot 100\% \quad (3)$$

де I_r , U_r – робочі електричні струм та напруга; Φ – світловий потік; S – площа активної поверхні; φ – кут падіння променів; γ – коефіцієнт квантової ефективності; P_{elect} , P_{optic} – електрична та оптична потужності.

Коефіцієнт корисної дії фотоелемента збільшується з ростом світлового потоку Φ і фотоелектрорушійної сили U_r . Однак при великих значеннях світлового потоку Φ з ростом концентрації вільних носіїв зростає кількість їх рекомбінацій екситонів (злиття пар електрон-дірка) в напівпровідниковій структурі. В результаті збільшення температури модуля при великих Φ збільшується струм I , що також є причиною зниження ККД.

ФАКТОРИ ВПЛИВУ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ ПЕРЕТВОРЕННЯ ЕНЕРГІЇ У ФЕП ТА ШЛЯХИ ЇЇ ПІДВИЩЕННЯ

Ефективність перетворення сонячної енергії в значній мірі зменшується через відбивання від поверхні ФЕП. Також через особливості побудови фотоелектричних перетворювачів виникають зниження ефективності сонячних панелей із ростом температури. Часткове затемнення панелі викликає падіння вихідної напруги за рахунок втрат у неосвітленій області, яка виступає в ролі паразитного

навантаження. Даний фактор виключається в промислових варіантах ФЕП шляхом установки схеми комутації та шунтування затемнених комірок фотоелемента.

Для досягнення найбільшої ефективності по робочій вольт-амперній характеристиці фотоелектричної панелі, необхідний правильний підбір опору навантаження, що здійснюється за допомогою контролера керування ФЕП.

Ефективність перетворення також залежить від електрофізичних характеристик неоднорідної напівпровідникової структури, а також оптичних властивостей ФЕП, серед яких найважливішу роль грає фотопровідність, яка визначена явищами внутрішнього фотоэффекта в напівпровідниках.

Основні втрати енергії у ФЕП пов'язані з:

- відбиванням оптичного випромінювання від поверхні перетворювача;
- проходженням частини випромінювання через ФЕП без поглинання;
- розсіюванням на теплових коливаннях напівпровідникової ґратки надлишкової енергії фотонів

(ріст температури ФЕП);

– неповною освітленістю активної площі ФЕП;

– конструктивними та фізико-хімічними особливостями матеріалу ФЕП.

Для зменшення усіх видів втрат енергії у сонячних ФЕП успішно застосовуються наступні заходи:

1) використання напівпровідників з оптимальною для сонячного випромінювання шириною забороненої зони, орієнтованих на ширший спектр;

2) технологічне покращення і адаптація властивостей напівпровідникової структури шляхом її оптимального легування і створення вбудованих електричних полів;

3) перехід від гомогенних до гетерогенних напівпровідникових структур;

4) оптимізація конструктивних параметрів ФЕП (глибини залягання p - n переходу, товщини базового шару, частоти контактної сітки тощо);

5) застосування оптичних просвітлюючих покриттів [5];

6) створення каскадних ФЕП із змішаною схемою включення.

Фотоелектричні перетворювачі, які застосовуються у автономних енергетичних системах ІМ повинні відповідати ряду вимог, в першу чергу високому ККД перетворення оптичного випромінювання та компактності геометричних розмірів.

ФЕП з параметрами, що відповідають всьому комплексу вимог до перспективних технологій автономного енергетичного живлення, можуть бути отримані лише при створенні багатоперехідних каскадних на основі концентраторних гетероструктурних ФЕП на базі напівпровідників групи A^3B^5 , в тому числі на монокристалах арсеніду галію (GaAs) з домішками кремнію (Si). Збільшення кількості p - n переходів у каскадних ФЕП дозволяє розширити область фотоактивного поглинання випромінювання та зменшити втрати енергії. Каскадний гетероструктурний ФЕП з 4–5-ма p - n переходами має ККД на 20–30% більший, на відміну від одноперехідного.

При характерній для концентраторних ФЕП робочій температурі порядку $T=400-450$ К (130–180°C), їх граничний теоретично можливий ККД складає до 65 % [5]. У лабораторних умовах ККД ФЕП вже досягнуть 45–53 %, і судячи по стрімкій тенденції, його підвищення цілком реально понад 50–55 %.

Основні вимоги до ФЕП. Фотоелементи для промислового використання в автономних колах живлення інформаційних вузлів повинні задовольняти таким вимогам:

- високий ККД;
- високі значення напрацювання на відмову (надійність) (до 10^6 год);
- мінімальні габаритні вага та оптимальна геометрія комірок;
- зручність та мінімальність технічного обслуговування;
- відносно невисока собівартість.

Відповідність цим вимогам може бути досягнута лише при організації цілком автоматизованого технологічного виробництва ФЕП на основі концентраторної технології.

На основі аналізу технологій побудови ФЕП було встановлено, що оптимальним для забезпечення енергоавтономності вузлів ІМ є ФЕП концентраторного типу CPV на основі гетероструктур (GaAs) з домішками кремнію (Si).

МОДЕЛЬ ІМ З ПІДВИЩЕНОЮ СТАБІЛЬНОСТЮ ФУНКЦІОНУВАННЯ

Підхід використання резервування апаратно-програмних засобів дозволяє вирішити завдання ефективного підвищення стабільності роботи мережі (стабільність процесу оброблення і передавання інформації) тільки частково, оскільки не враховує фактори надійного енергетичного живлення – першооснови функціонування будь-яких електронних інформаційних систем.

Для проміжних вузлів інформаційних мереж (регенератори, шлюзи, концентратори, мости, маршрутизатори, оптичні підсилювачі, активні комутатори) необхідно передбачити можливість безперебійного живлення від альтернативних джерел енергії або від резервних енергетичних каналів.

Перспективним шляхом в цьому є використання ФЕП для перетворення сонячного випромінювання безпосередньо в електроенергію для живлення компонентів мережі, що відповідає сучасним світовим перспективним тенденціям застосування енергоефективних інформаційних технологій на фотоелектричних системах. Для побудови високоефективної моделі ІМ необхідне створення окремих виділених середовищ передавання інформації із власною структурою енергетичного живлення на базі альтернативних джерел.

Приклад використання ФЕП для живлення автономного вузла камер відеоспостереження та блоку охолодження комп'ютерної системи наведено на рис. 8 та рис. 9.

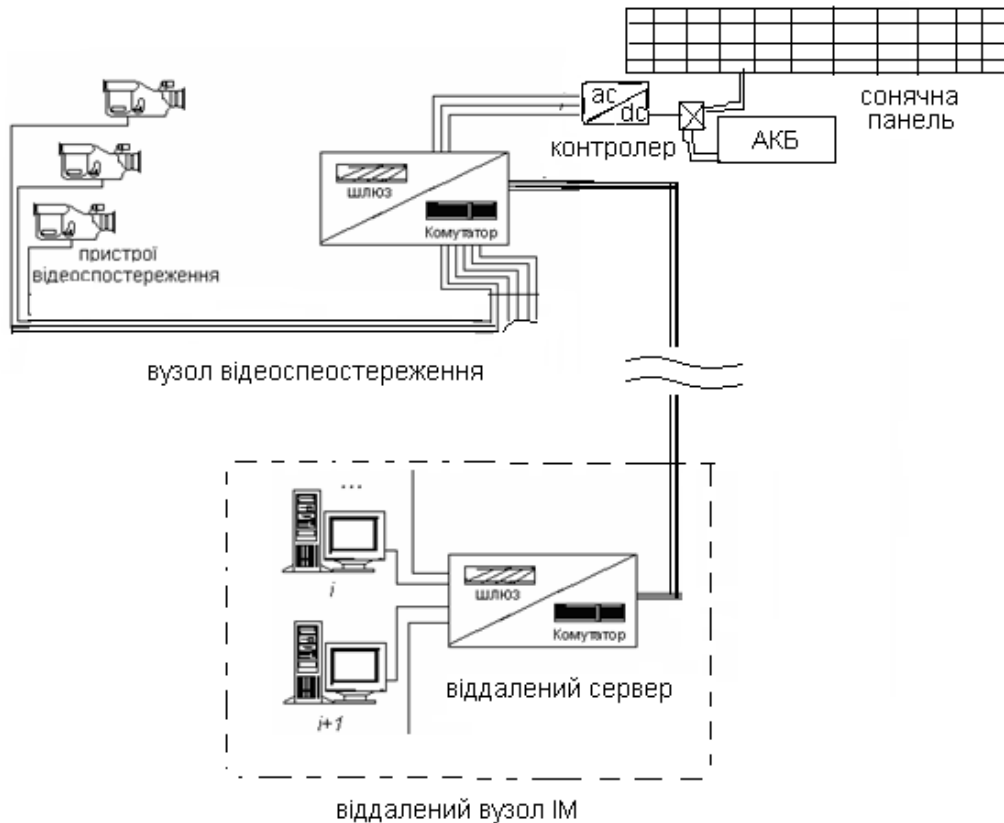


Рис.8. Схема організації вузла відеоспостереження інформаційної мережі автономного живлення за допомогою комплексу ФЕП

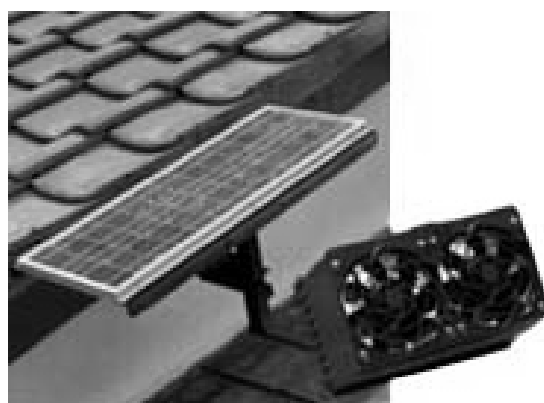


Рис.9. Приклад застосування портативного модуля ФЕП для автономного живлення окремих складових комп'ютерної техніки

Оптимальним є використання розподілених альтернативних фотогальванічних джерел на базі фотоелектричних концентраторних перетворювачів (CPV ФЕП) [13], які мають ККД~43-44% або її нового різновиду – висококонцентраторної фотовольтаїки (HCPV) [10] у поєднанні із технологією спектротрансформатора [14, 15]. Це дозволить перетворення більшої частини сонячного випромінювання в електроенергію, оскільки спектральні діапазони виходи спектротрансформатора є максимально

узгодженими із спектрами поглинання концентраторних ФЕП.

Модель ІМ із енергетично-автономними вузлами. Окремий сегмент ІМ на базі запропонованого підходу з автономним фотоелектричним джерелом живлення показано на рис 10.

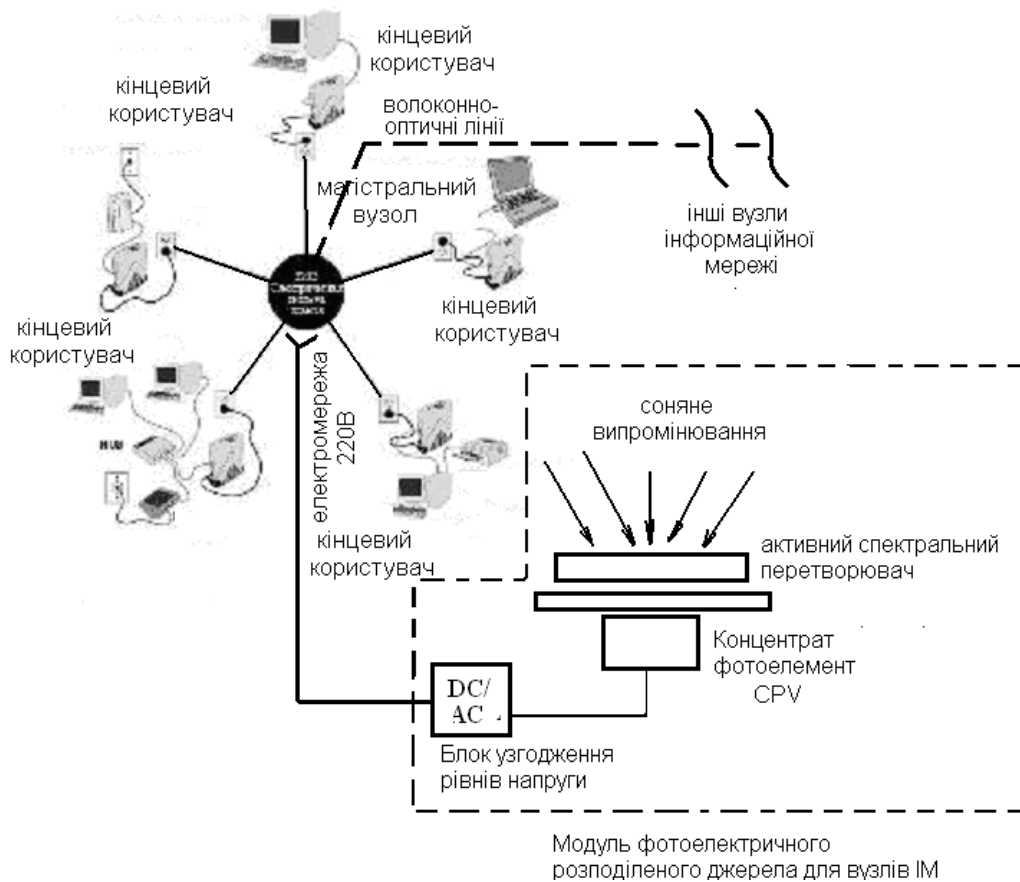


Рис.10. Сегмент ІМ із живленням на базі модуля розподіленого джерела енергії від сонячного випромінювання

Об'єднання технологій концентраторного фотоелектричного перетворення сонячної енергії та технології спектральної трансформації довжин хвиль [14] дозволить зменшити оптичні втрати при перетворенні окремих спектральних областей та підвищити ефективність перетворення енергії для задач підвищення автономності вузлів ІМ. Але необхідні поглиблені дослідження аспектів симбіозу цих технологій та вивчення особливостей спектрального перетворення сонячного випромінювання для конкретних ділянок сонячного спектру.

Кінцеві пристрої перетворення та постачання енергії від сонячного випромінювання на базі технології спектротрансформатора і концентраторної фотовольтаїки (рис. 10) дозволять вирішити ці задачі, та у поєднанні із технологією волоконно-оптичних каналів побудувати модель інформаційної мережі з розподіленими джерелами енергії на базі ФЕП (рис. 11, рис. 12). До кожного з компонентів мережі може бути організовано автономне електропостачання живлення на базі модулів автономного живлення на ФЕП (рис. 11). Основними компонентами ІМ, що необхідно під'єднувати до модулів розподілених джерел енергії є: центральні сервера, шлюзи та комутатори, які визначають функціональність мережі (рис.12). Крім того, з метою забезпечення вищої енергетичної автономності ланок ІМ, до розподілених енергетичних джерел можуть бути підключені і кінцеві пристрої мережі (наприклад, камери відеоспостереження та абонентські термінали).

Перевага такого підходу полягає у рознесенні електричних джерел і забезпеченні повного або часткового автономного постачання електроенергії у основних вузлах мережі в критичних місцях, що визначають її функціональність. Модель ІМ (рис. 12) може бути використана на різних рівнях ієрархії інформаційних мереж, в залежності від потреб автономності окремих їх складових.

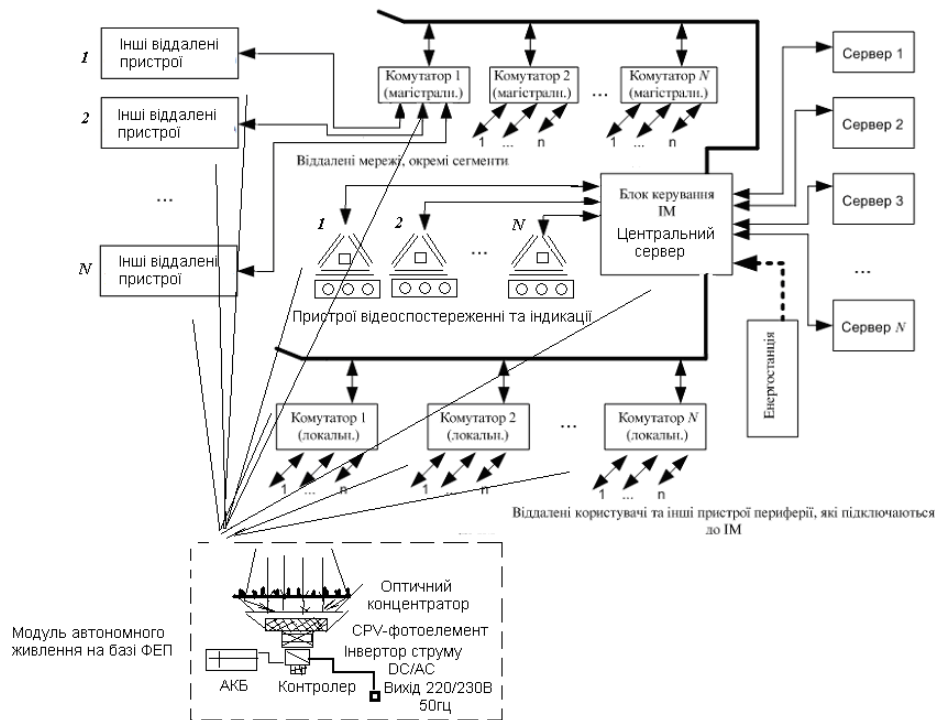


Рис. 11. Можливі місця розміщення розподілених автономних джерел енергії на базі ФЕП у загальній структурі ІМ

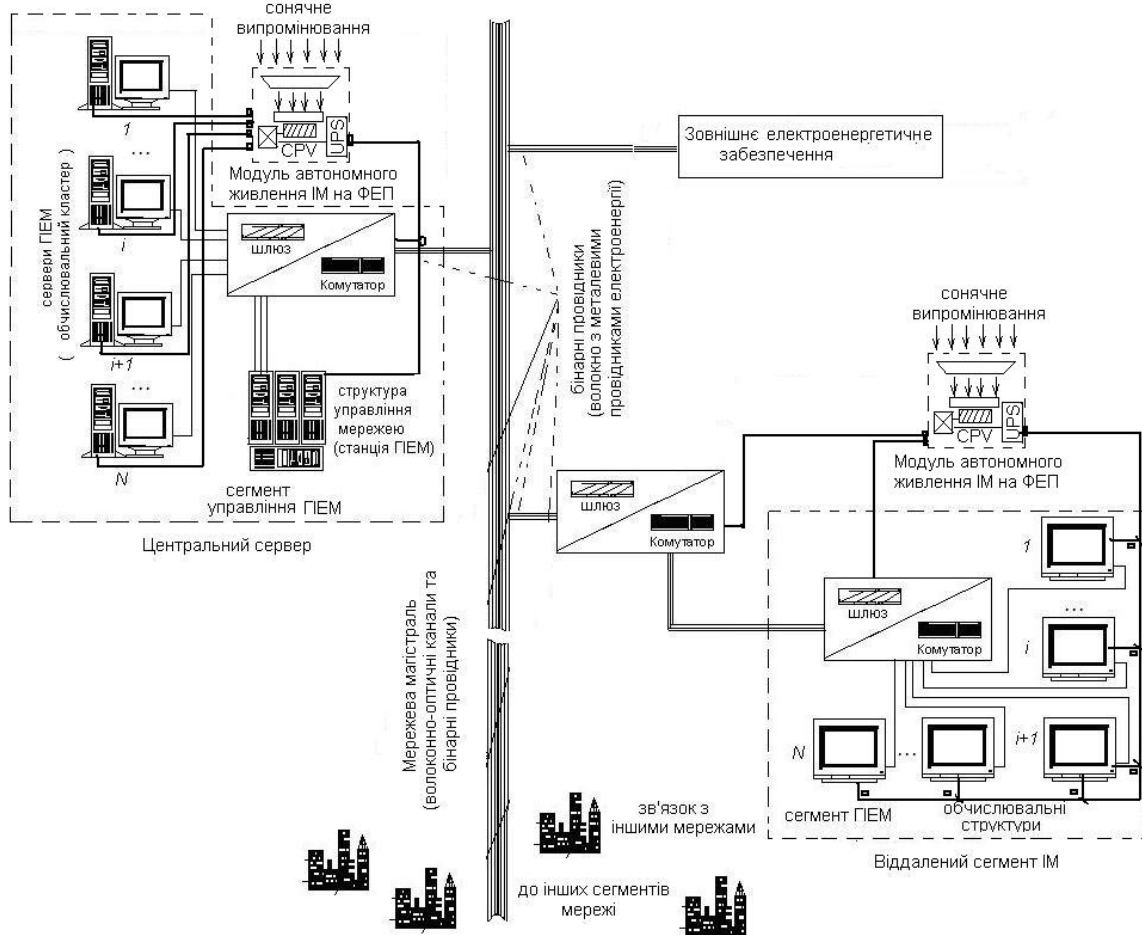


Рис. 12. Структурна модель ІМ із автономними джерелами енергії на базі ФЕП

При цьому, розподілені джерела енергії на базі ФЕП можуть бути реалізовані у вигляді модульних конструкцій, що складаються із: оптичних концентраторів; модуля ФЕП; контролера заряду; акумуляторного блоку та інвертора. Ці компоненти модуля (рис. 10) повинні забезпечувати автономний режим роботи і перетворення енергії сонячного випромінювання в електроенергію мережі ~220-230В 50Гц в цілодобовому режимі. В нічний час доби та в умовах недостатньої сонячної інсоляції накопичена електроенергія в модулях АКБ, що входять до складу модуля джерела енергії на ФЕП, перетворюється інвертором у електроенергію необхідного рівня і роду струму для забезпечення автономної роботи.

По бінарним провідниками мережі, які складаються із інформаційної частини на базі ВОЛЗ, що оточена електропровідними провідниками, електрична енергія від вузлів ІМ із розподіленими джерелами енергії на базі ФЕП може передаватись до інших компонент та сегментів мережі, в залежності від типу апаратної організації та топології мережі.

Наведена на рис. 12 загальна модель ІМ із розподіленими джерелами енергії на базі ФЕП, може бути змінена в залежності від потреб та типу організованої топології мережі. Дана модель ілюструє принцип організації мережі на базі розподілених джерел з метою підвищення енергетичної автономності її компонент.

У зв'язку із підвищенням обсягів інформації в ІМ, перспективність такого підходу полягає як у зменшенні залежності від зовнішніх енергетичних джерел та привабливості екологічної складової альтернативних джерел енергії, так і у підвищенні економічної рентабельності проєктів, що використовують такі мережі. При цьому забезпечується часткова або повна незалежність від місцевих постачальників електричної енергії, яка має стрімку тенденцію до підвищення її вартості з часом.

Тому, одним із шляхів вирішення проблеми побудови ІМ із високою стабільність функціонування (особливо для державного і корпоративного секторів) є розробка і впровадження окремих високошвидкісних розподілених волоконно-оптичних мереж із повним або частковим автономним енергетичним живленням вузлів на базі технологій сонячних концентраторних ФЕП у поєднанні із спектротрансформатором. Оскільки, енергетичні ресурси сонячного випромінювання є загальнодоступними і достатньо значними (зокрема для України і її території вони є одними з найбільших в Європі), то використання такої мережі дозволить не тільки вирішити завдання підвищення стабільності функціонування мережі, але й реалізувати функції енергозбереження і економії ресурсів і державних коштів.

ВИСНОВКИ

В роботі проаналізовано сучасні технології фотоелектричних перетворювачів, систематизовані основні їх параметри та показники енергетичної ефективності. Визначено оптимальний – концентраторний тип ФЕП для застосування їх у інформаційних мережах для підвищення енергетичної автономності та відповідно стабільності функціонування. Проаналізовані основні чинники впливу на ефективність фотоелектричного перетворення, а також шляхи її підвищення для оптимального використання ФЕП в ІМ. Запропоновано підхід і модель інформаційної мережі із автономними розподіленими джерелами енергії на базі ФЕП. Це дозволить забезпечити повну або часткову енергетичну автономність основних компонентів ІМ у критичних місцях. Для підвищення ефективності перетворення сонячного випромінювання запропоновано використання сонячних концентраторних ФЕП у поєднанні із технологією спектральної трансформації довжин хвиль.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Олифер В. Г. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы / В. Г. Олифер, Н. А. Олифер. – СПб: Издательство “Питер”, 1999. – 672с.
2. Антонов В.М. Сучасні комп'ютерні мережі / В. М. Антонов. – Київ, «МК-Прес», 2005. – 478с.
3. Скуратов А.К. Администрирование телекоммуникационной сети на основе статистического анализа трафика / А.К.Скуратов, Д.С.Безрукавный // Вестник Таганрогского Государственного Университета . – 2004. – Том 10. – С. 919-923.
4. Фаренбрух А. Солнечные элементы: теория и эксперимент : [Пер. с англ. И.П. Гавриловой и А.С. Даревского; под ред. М.М. Колтуна] / А. Фаренбрух, Р.Бьюб . –М.: Энергоатомиздат, 1987. –280с.
5. Бекиров Э.А. Компьютерное моделирование сложных энергосистем с концентраторами солнечной энергии / Э.А.Бекиров, А.П.Химич // Відновлювана енергетика . – №1(24). –2011. – с.74-81.
6. Солнечная энергетика: обзор отрасли : [Электронный ресурс] / по материалам компании Nitols Solar Limited. – Режим доступа World Wide Web: <http://nitolsolar.com/rusolarenergy/>
7. Photovoltaic energy, electricity from the sun : [Электронный ресурс] / Daniel Fraile, Marie Latour, Adel El Gammal, Michael Annett. // EPIA Publications. –vol.50.– april 2010. – Режим доступа World Wide Web: <http://www.epia.org/publications/photovoltaic-publications-global-market-outlook.html> .

8. Michael Forst. Germany's module industry poised for growth // SUN & Wind Energy. –Vol.5. –2011. – pp.256-263.
9. Высокоэффективные концентраторные (2500-солнц) AlGaAs/GaAs солнечные элементы / В.М. Андреев, В.П. Хвостиков, В.Р. Ларионов, В.Д. Румянцев, Е.В. Палеева, М.З.Шварц //Физика и техника полупроводников. – 1999 . – т.33. – вып.9. – С.1070-1073.
10. Kurtz S. Opportunities and Challenges for Development of a Mature Concentrating Photovoltaic Power Industry: [Електронний ресурс] // Матеріали Національно дослідницької лабораторії фотовольтаїки NREL. – Режим доступу: World Wide Web: <http://www.nrel.gov/docs/fy13osti/43208.pdf>
11. Chunfeng Hou, Zhongxiang Zhou, Xiudong Sun, Baohong Yuan. Incoherently coupled grey-grey screening-photovoltaic soliton pairs in biased photovoltaic-photorefractive crystals // Optik - International Journal for Light and Electron Optics. –Vol. 112. – Issue 1 . – 2001 . – PP. 17-20.
12. Конструкция многоплощадочного фотоприемника с термоэлектрическим охладителем / Г. А. Аракелов, В. Р. Магнушевский, В. Н. Сивенкова, И. М. Троицкий, Г. А.Казанцев // Прикладная физика. – 2002. – № 4. – С.69-75. – ISSN 1998-0943.
13. Zachary Shahan. Sharp Hits Concentrator Solar Cell Efficiency Record, 43.5% / : [Електронний ресурс] // Матеріали компанії Sharp на поратлі «Cleantechica» . – Режим доступу: World Wide Web: <http://cleantechica.com/2012/05/31/sharp-hits-concentrator-solar-cell-efficiency-record-43-5/>
14. В.П. Кожем'яко. Спосіб побудови та методика створення уніфікованої системи трансформації довжин хвиль / В.П. Кожем'яко, О.В. Шевченко, Я.І. Ярославський // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – №2(12). –2007р. – С.78-86.
15. Локальні геоінформаційно-енергетичні мережі на новітніх волоконно-оптичних лініях із спектротрансформаторним живленням / В. П. Кожем'яко, В. І. Маліновський, Я. І. Ярославський, В. В. Мороз // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – №2(24). – 2012р. – С.137-146.

Надійшла до редакції 14.12.2013р.

КОЖЕМ'ЯКО В.П. – д.т.н., професор, академік АНУ, завідувач кафедри лазерної та оптоелектронної техніки, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна.

МАЛІНОВСЬКИЙ В.І. – к.т.н., науковий співробітник, ст. викладач кафедри лазерної та оптоелектронної техніки, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна.

ЯРОСЛАВСЬКИЙ Я.І. – здобувач кафедри лазерної та оптоелектронної техніки, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна.