

РОЗРАХУНОК АВТОНОМНОЇ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ СТАНЦІЇ І МІНІМІЗАЦІЯ ІНВЕСТИЦІЙНИХ ВИТРАТ

О.В. Ушкаленко, аспірант, О.Ю. Гаєвський, д.ф.-м.н., проф.

НТУУ «КПІ», кафедра відновлюваних джерел енергії

Вступ. Фотоелектричні системи (ФЕС) широко застосовуються для автономного енергозабезпечення об'єктів, підключення яких до електричних мереж неможливо або не планується. Автономна фотоелектрична система (АФЕС) повинна мати достатню кількість фотомодулів (ФМ) і акумуляторних батарей (АБ), щоб забезпечити надійну роботу системи в автономному режимі. Визначення кількості зазначених компонент АФЕС (sizing of PV systems) являє собою основну задачу при проектуванні станції [1]. Існує безліч підходів до рішення цієї задачі, які можна умовно розділити на енергетичні та статистичні [2]. Перші ґрунтовані на енергетичних співвідношеннях, що описують роботу ФЕС на різних тимчасових інтервалах, а другі – на стохастичних моделях фотогенерації, на критеріях надійності роботи, яка оцінюється, наприклад, у термінах LLP (Loss of Load Probability), на статистичній обробці супутникових даних, на моделях штучних нейронних мереж, або на інших статистичних моделях та критеріях.

Мета роботи. У даній роботі запропонований метод розрахунку АФЕС, в яких обмежена з економічної точки зору ємність АБ [3]. Розрахунок виконується на основі рівнянь балансу енергії розряду АБ у несприятливі дні (з найменшим рівнем радіації) та заряду у попередній період. При цьому враховуються добові суми радіації та навантаження, а також параметри обладнання (ФМ, інвертора, регулятора заряду-розряду, АБ).

Матеріали і результати досліджень. Функціональна схема АФЕС зображена на рисунку 1.

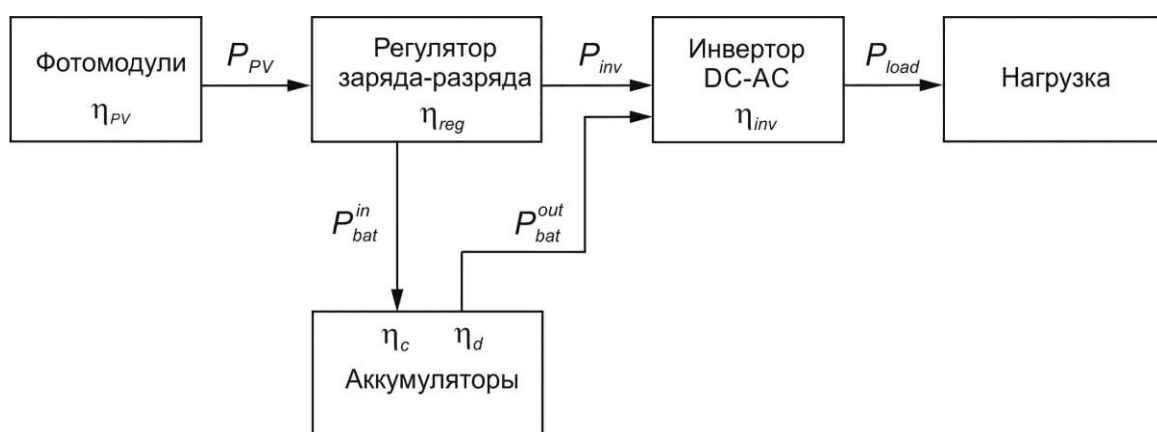


Рисунок 1 – Компоненти АФЕС і потоки потужності: P_{PV} - на вході регулятора; P_{inv} – на вході інвертору від регулятора; P_{load} – на навантаження; P_{bat}^{in} і P_{bat}^{out} – потоки обміну з АБ. У прямокутниках вказані ККД компонентів

Обмін енергією між пристроями АФЕС описується наступними величинами: $E_{PV}(n)$ – енергія, що надходить від фотомодулів в регулятор на протязі доби n , $\Delta E_{bat}(n)$ – енергія, яка витрачається акумуляторами за добу для живлення навантаження ($\Delta E_{bat} > 0$) або додається в АБ за добу ($\Delta E_{bat} < 0$), $E_{load}(n)$ – енергія, що споживається навантаженням. Зазначені компоненти енергії є випадковими величинами, які залежать від рівня радіації, що має нерегулярний характер, від температури ФМ, від потужності навантаження та ін. Тому оперуємо середніми значеннями, які залежать від номера дня n в році, наприклад, $E_{PV}(n)$ – середня генерація, яка відповідає середньої сумі радіації за день n у даній місцевості (з результатів метеоспостережень).

Рівняння балансу енергії на клеммах АБ виглядає наступним чином:

$$\Delta E_{bat}(n) = \eta_{reg} E_{PV}(n) - \frac{1}{\eta_{inv}} E_{load}(n)$$

де η_{reg} – ККД регулятора, η_{inv} – ККД інвертора. На рисунку 2 показаний приклад зміни протягом року середніх значень, компонент, які входять до цієї формули. Прирощення $\Delta E_{bat}(n)$ можна виразити через прирощення енергії заряду в АБ за добу $\Delta E_{ch}(n)$: $\Delta E_{bat} = \eta_d \Delta E_{ch}$, коли відбувається розряд АБ ($\Delta E_{bat} < 0$), і $\Delta E_{bat} = \Delta E_{ch} / \eta_c$, коли відбувається заряд АБ ($\Delta E_{bat} > 0$); η_c, η_d – ККД акумулятору для процесів заряду і розряду. Періоди з $\Delta E_{bat} > 0$ показані на рисунку 2 вертикальним штрихуванням, а періоди з $\Delta E_{bat} < 0$ – похилим штрихуванням.

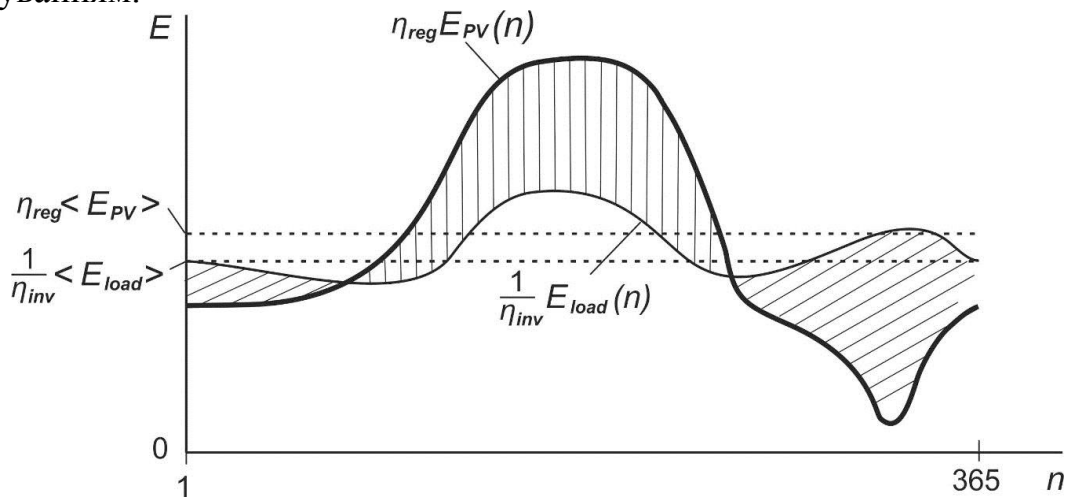


Рисунок 2 – Приклад зміни протягом року середніх значень енергії $\eta_{reg} E_{PV}(n)$ і $E_{load}(n) / \eta_{inv}$, що мають надходити в інвертор

При заданих енергіях навантаження E_{load} і генерації E_{PV} , а також фіксованих ККД компонентів ФЕС ємність АБ залежить від визначення періоду з $\Delta E_{ch} < 0$. Чим менше тривалість цього періоду, тим більше повинен бути середній рівень генерації і навпаки, мінімальний рівень генерації означає максимальне використання можливостей акумулявання енергії. Можна

показати, що при існуючому рівні цін на АБ та ФМ доцільно зменшувати загальну ємність акумуляторів та збільшувати потужність системи ФМ. В даній роботі для мінімізації початкових та експлуатаційних витрат, які залежать від компонентного складу АФЕС, вирішена оптимізаційна задача з обмежуючим фактором – сумарної ємністю $Q_{bat,max}$ акумуляторів.

Розроблено ітераційний алгоритм розрахунку ФЕС, умовою збігання якого є умова рівності енергії заряду АБ, витраченого на навантаження в найгірший період, та повної доступної енергії, яка накопичується за попередні дні, коли рівень генерації переважає рівень навантаження. Точки переходу від періоду зарядки АБ до періоду найбільш глибокого розряду (день n_1) і навпаки (день n_2) визначаються із рівнянь:

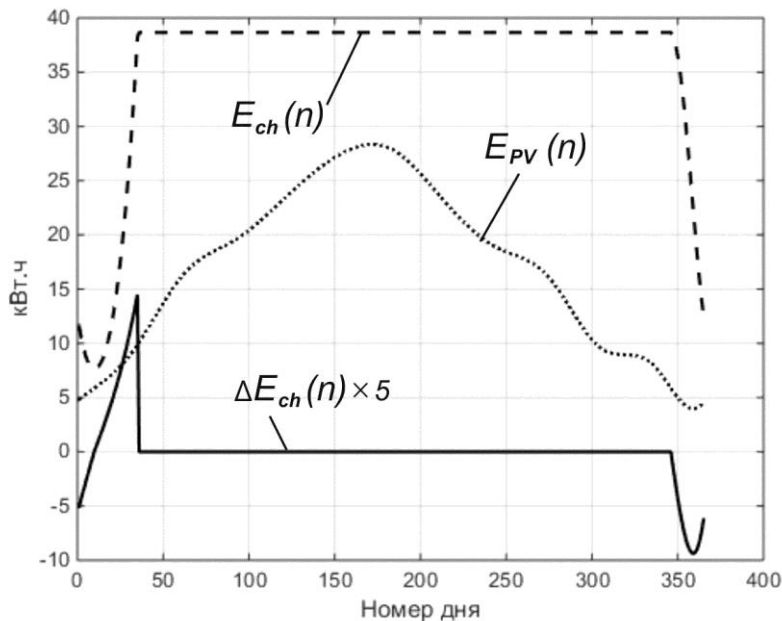
$$\Delta E_{ch}(n_1) = \Delta E_{ch}(n_2) = 0$$

Сумарна витрата енергії заряду в період n_1-n_2 не повинна перевищувати максимальну енергію заряду $E_{ch,max}$, яка пов'язана з $Q_{bat,max}$:

$$\left| \sum_{i=n_1}^{n_2} \Delta E_{ch}(i) \right| \leq E_{ch,max}$$

Ця умова може задовольнятися тільки після досягнення певного рівня генерації, тобто необхідної установчої потужності ФЕС P_{inst} .

На рисунку 3 наведений приклад розрахунку за вказаним алгоритмом залежності прирощення/убутку енергії заряду АБ $\Delta E_{ch}(n)$ за кожен день (напівжирна суцільна лінія). На цьому ж рисунку показані крива поточної енергії заряду $E_{ch}(n)$ (штрихова лінія), а також графік генерації $E_{PV}(n)$ (точкова лінія).



Риунок 3 – Приклад кривих зміни енергії заряду АБ $\Delta E_{ch}(n)$ за кожен день, поточної енергії заряду в АБ $E_{ch}(n)$ і PV-генерації $E_{PV}(n)$

У даній постановці задачі заданий рівень споживання можна забезпечити як підвищеною генерацією і низькою ємністю АБ, так і зниженою генерацією і високою ємністю АБ. Крива залежності між максимальною енергією заряду $E_{ch,max}$, накопиченого в АБ, і встановленою потужністю P_{inst} показана на рис.4. Ця крива отримана в результаті ітераційних розрахунків для різних значень $E_{ch,max}$ і при фіксованому навантаженні. Будь-яка точка на кривій рисунку 4 відповідає певному співвідношенню між ємністю АБ і розміром поля фотомодулів. Якщо це співвідношення вибирається з умови мінімальної вартості амортизації устаткування за певний термін, то цільова функція виглядає наступним чином:

$$f(E_{ch,max}) = C_{bat} E_{ch,max} + C_{PV-i} P_{inst}(E_{ch,max}) = C_{PV-i} [E_{ch,max} + K P_{inst}(E_{ch,max})]$$

де C_{bat} – вартість амортизації 1 кВт·год АБ за 3 роки, C_{PV-i} – вартість амортизації 1 кВт системи фотомодулів та інверторів за той же термін, $K = C_{bat} / C_{PV-i}$.

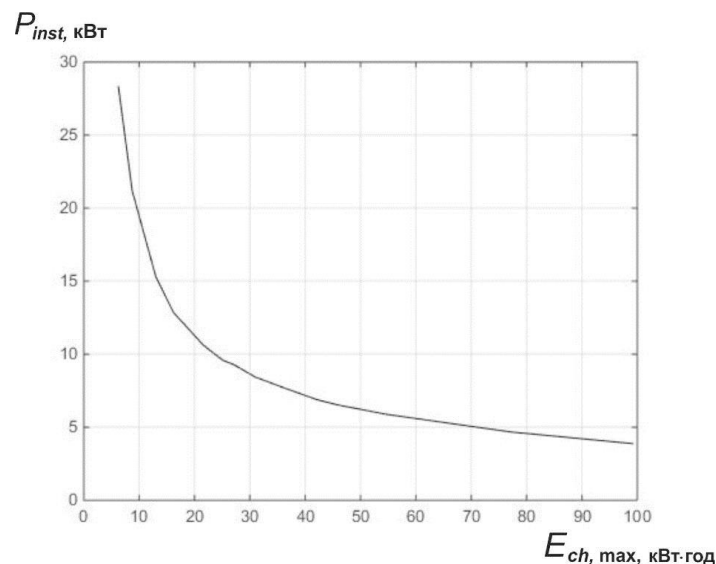


Рисунок 4 – Залежність між встановленою потужністю ФЕС P_{inst} та максимальною енергією заряду $E_{bat,max}$, що накопичений у АБ

На рисунку 5 наведені розрахункові графіки $f(E_{ch,max})$ при різних значеннях K і C_{PV-i} для станції, що забезпечує споживання енергії 3 кВт·год в добу. Наприклад, при $C_{PV-i} = \$300$ і $K = 0.25$ мінімум вартості, рівний $\sim \$4700$, припадає на 25 кВт·год або при номінальній напрузі 12 В ємність АБ має бути 2000 А·год. При цьому встановлену потужність згідно з графіком на рисунку 4 необхідно мати на рівні ~ 9 кВт.

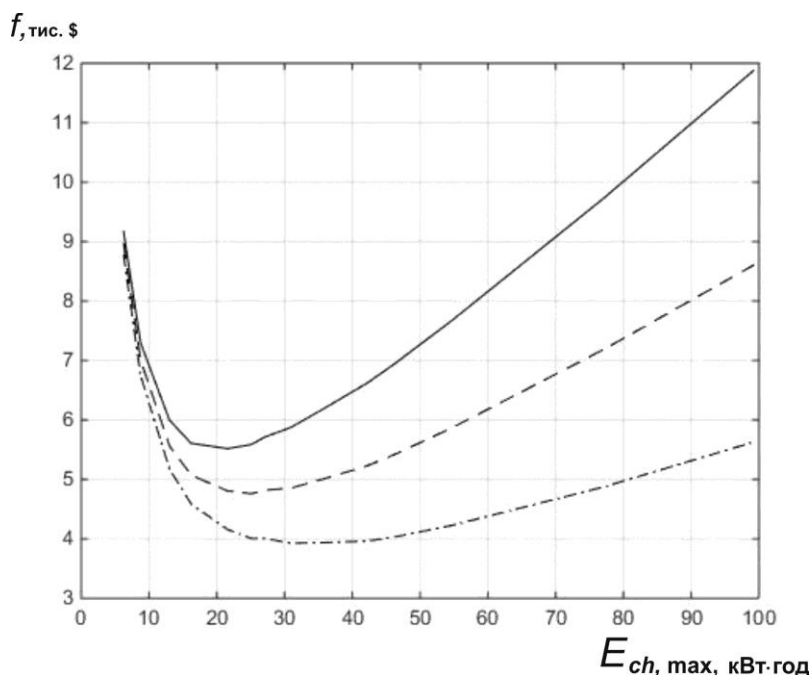


Рисунок 5 – Залежності вартості амортизації на 3-й рік експлуатації АФЕС, що працює на навантаження 3 кВт·год при $C_{pv-i} = \$300$ і $K = 0.36$ (суцільна крива), $K = 0.25$ (штрихова крива), $K = 0.15$ (штрих-пунктир)

Висновки. У цій роботі запропонована оптимізаційна схема, в якій загальна ємність АБ обчислюється за умови мінімальної вартості амортизації найбільш дорогого обладнання: фотомодулів, інверторів і акумуляторів. Початковими даними є профілі навантаження і радіації, технічні і вартісні параметри устаткування. Метод реалізований у вигляді ітераційного розрахунку, в ході якого обчислюються оптимальна ємність АБ і необхідна пікова потужність фотомодулів. Оскільки в процесі розрахунку виконується умова балансу енергії заряду АБ за певні критичні проміжки часу з малою радіацією, отримувані в результаті розрахунків дані з високою вірогідністю гарантують надійну роботу станції впродовж всього робочого періоду при заданих щодобових енергії навантаженні та середньої суми радіації.

Обчислення на прикладі АФЕС невеликої потужності показують, що запропонована оптимізаційна схема розрахунку дозволяє істотно зменшити вартість устаткування при обмеженні ємності АБ оптимальною величиною.

Перелік посилань

1. McEvoy A., Markvart T., Castaner L. Practical Handbook of Photovoltaics: Fundamentals and Applications. Second Ed. – Oxford: Elsevier, 2012. – 1224 p.
2. Egidio M., Lorenzo E. The Sizing of a Stand-Alone PV Systems: A Review and A Proposed New Method // Solar Energy Materials and Solar Cells. – 1992. – Vol. 26 . – No. 1-2. – p.51 – 69.
3. Гаевский А.Ю., Ушкаленко О.В. Оптимизационный расчет автономной фотоэлектрической станции // Альтернативная энергетика и экология (Россия). – 2015. – № 15-16. – с.15 – 23.