

УДК 620.92

Чорна В.О.

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського

Мельник О.Є.

Криворізький національний університет

Омельченко О.В.

Донецький національний університет економіки та торгівлі імені Михайла Туган-Барановського

Некрасов А.В.

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського

Федь М.Г.

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПОГОДНИХ УМОВ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ РОБОТИ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ УСТАНОВКИ

У статті розглядається енергетична ефективність застосування фотоелектричних модулів як джерела електричної енергії для системи освітлення. Розглянуто основні параметри фотоелектричних модулів та їх математичний опис. На основі аналізу літературних джерел встановлені природні фактори, що впливають на продуктивність фотоелектричних модулів. За допомогою факторного аналізу розраховані значення температурного коефіцієнта, коефіцієнта зміни швидкості вітру та зміни сонячної радіації, а також встановлено ступінь їх впливу на зміну температури модуля. За результатами розрахунків встановлено максимальний обсяг генерованої модулем потужності, який зафіксовано у березні, а також той факт, що підвищення рівня сонячної радіації призводить до збільшення струму короткого замикання, а зростання температури повітря впливає на зменшення напруги холостого ходу фотоелектричного модуля. Доведена доцільність застосування фотоелектричної установки для живлення освітлювального навантаження навчального корпусу протягом року з урахуванням режиму її роботи та потенціалу установки.

Ключові слова: фотоелектричний модуль, ефективність, температура, потужність, генерація.

Постановка проблеми. Проблеми постійного зростання тарифів на електроенергію, погіршення її споживчих якостей, екологічні аспекти використання традиційних джерел енергії спонукають до використання відновлюваних та альтернативних джерел енергії.

Серед перспективних напрямів альтернативної енергетики важливе місце займає геліоенергетика, яка ґрунтується на безпосередньому перетворенні енергії сонячного випромінювання на інші види енергії [1, с. 26–27, 2, с. 7–15]. Сонячна енергетика є екологічно чистою галуззю, розвиток якої стимулюється як економічними факторами, так і діючими в багатьох країнах програмами державної підтримки. Екологічна чистота і доступність енергії сонця зумовили її широке застосування у багатьох країнах світу [3, 167–174]. Фотоелектричні станції не тільки генерують безкоштовну електроенергію, але й забезпечують безперебійне електропостачання, що в умовах постійних планових відключень є дуже актуальним.

Однак використання сонячних модулів у реальних умовах експлуатації має низку особливостей, які необхідно враховувати під час вибору обладнання сонячної електростанції. Так, на продуктивність сонячних модулів впливають такі фактори, як кліматичні умови регіону, в якому вони використовуються, термін експлуатації, спосіб їх очищення, погодні умови. Слід зауважити, що до теперішнього часу вплив перелічених факторів на функціонування фотоелектричних модулів (ФЕМ) вивчений не достатньо.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У [4, с. 52–57] представлені результати досліджень впливу погодних умов (температури повітря, наявності опадів) та ступеня забруднення модуля на обсяг генерованої електроенергії протягом доби.

У роботі [5, с. 142–148] виконаний аналіз довгострокових досліджень кремнієвих сонячних панелей та обґрунтований комплекс кліматичних та апаратних факторів, що впливають на їх роботу;

отримані рівняння, за допомогою яких можна оцінити обсяг генерованої ФЕМ потужності з похибкою менше 5%.

У [6, с. 87–92] розглянуто річний потенціал сонячної енергетики в Полтавській області та доведено економічну доцільність застосування сонячних модулів у приватному домогосподарстві як джерела живлення побутових приладів та на умовах використання «зеленого тарифу».

Метою статті є оцінка ефективності роботи ФЕМ на освітлювальне навантаження навчального корпусу в умовах м. Кременчука Полтавської області з урахуванням кліматичних та погодних факторів.

Основний матеріал. Генерація електроенергії за допомогою сонячних станцій є напрямом альтернативної енергетики, що динамічно розвивається. Трансформуючи енергію сонячного випромінювання в електричний струм, ці системи дають змогу забезпечувати споживачів електричною енергією відокремлено від центральної електромережі.

Одним із найважливіших параметрів ФЕМ є вольт-амперна характеристика, яка являє собою залежність струму, що протікає через електричний ланцюг, від напруги, прикладеної до цього ланцюга. ФЕМ може працювати за будь-якої комбінації напруги і струму, розташованими на його вольт-амперній характеристиці. Однак у реальності модуль працює в одній точці в певний період часу. Ця точка визначається не типом модуля, а електричними характеристиками ланцюга, до якого підключений сонячний модуль.

На рисунку 1 приведена спрощена еквівалентна схема ФЕМ, що складається з паралельно з'єднаних діода та джерела струму. Поточне джерело генерує фотострум I_{ph} , прямо пропорційний сонячному випромінюванню G [7, с. 672–675].

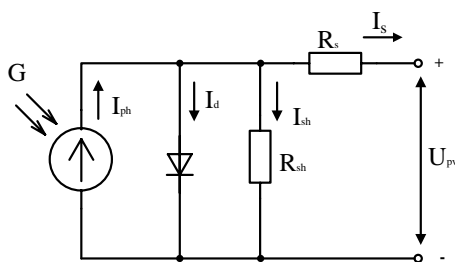


Рис. 1. Спрощена еквівалентна схема фотоелектричного модуля

До основних параметрів, які використовуються для характеристики модуля, належать струм короткого замикання та напруга холостого ходу. Рівняння струму має такий вигляд:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_0 \left[e^{\frac{q(U_{pv} + I_{pv}R_s)}{AKT}} - 1 \right], \quad (1)$$

де I_{pv} – струм, що залежить від сонячного випромінювання; I_0 – зворотний струм насичення діода; q – заряд одного електрона; K – постійна Больцмана; T – температура переходу; A – коефіцієнт, що залежить від матеріалу сонячної панелі; R_s – послідовний опір; R_{sh} – шунтуючий опір.

Краще поєднання значень струму і напруги називається точкою максимальної потужності (ТМП або МРР), якій відповідають номінальні потужність та ККД сонячного модуля (рис. 2). У роботі представлені результати досліджень ефективності ФЕМ типу Perlinght Solar PLM-250M.

Максимальна потужність фотомодуля дорівнює [8, с. 731–735]:

$$P_{max} = U_p I_p, \quad (2)$$

де U_p – робоча напруга; I_p – робочий струм.

Зазвичай у виробництві ФЕМ визначаються струм короткого замикання ($I_{кз}$) і напруга холостого ходу ($U_{хх}$). Залежність максимальної потужності, що генерується модулем, має вигляд:

$$P_{max} = F U_{хх} I_{кз}, \quad (3)$$

де F – коефіцієнт заповнення ВАХ.

Тоді можна записати:

$$U_p \oplus K_{хх} U_{хх}, \quad (4)$$

$$I_p \oplus K_{кз} I_{кз}, \quad (5)$$

де $K_{хх}$ та $K_{кз}$ – коефіцієнти, що враховують вплив кліматичних, апаратних та технологічних факторів.

Слід зазначити, що напруга холостого ходу і струм короткого замикання, отримані під час проведення випробувань на заводі виробника, можуть відрізнитися від реальних через вплив кліматичних та погодних факторів того чи іншого регіону. З урахуванням цього на етапі проектування фотоелектричної установки для конкретних умов експлуатації необхідно враховувати вплив вищезазначених факторів для оцінки потенціалу електрогенерування об'єкта.

Напруга холостого ходу ФЕМ у врахуванні його температури визначатиметься за виразом:

$$U_{хх} = U_{хх,ном} - k_n (T_{сб} - T_{сб,ном}) U_{хх,ном}, \quad (6)$$

де $U_{хх,ном}$ – номінальна напруга холостого ходу ФЕМ; k_n – температурний коефіцієнт напруги (вказується в паспортних даних пристрою); $T_{сб}$ – температура робочої поверхні ФЕМ [9, с. 37–41]:

$$T_{сб} = T_{сб,ном} + k_1 (T_{пов} - T_{пов,ном}) - k_2 HUM - k_3 Pr_{ess} - k_4 v + k_5 (E_{сб} - E_{ном}), \quad (7)$$

Графік роботи системи освітлення

Місяць	Кількість сонячних днів	Кількість хмарних днів	Кількість робочих днів	Середньодобова к-ть сонячних годин	Потік сонячної радіації, кВт*год/м ²	Середньодобова к-ть роботи освітлення, год	Загальна к-ть годин роботи
Січень	5	26	14	3	1,3	4	40
Лютий	8	20	20	4	2,1	5	120
Березень	12	19	23	5	3,2	4	92
Квітень	16	14	22	8	4,2	4	88
Травень	18	13	23	11	5,6	3	69
Червень	21	9	22	12	5,64	2	44
Липень	23	8	23	12	5,71	1	23
Серпень	22	9	13	11	5,07	2	26
Вересень	20	10	22	9	3,62	3	66
Жовтень	15	16	23	7	2,4	4	92
Листопад	9	21	22	4	1,5	5	110
Грудень	6	25	25	3	1,2	5	125

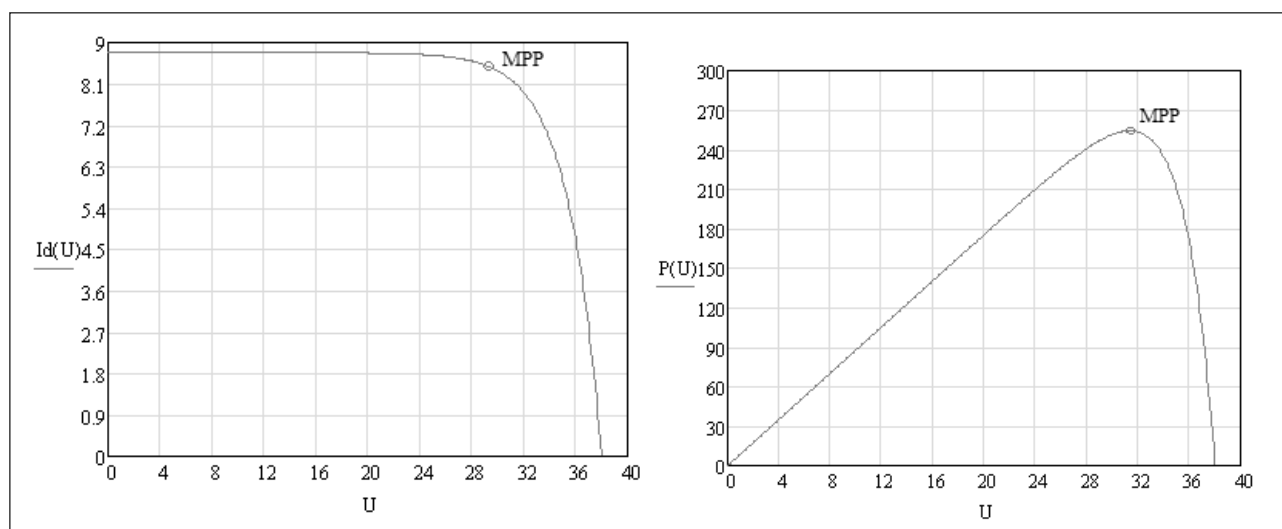


Рис. 2. Вольт-амперна характеристика (а) та характеристика потужності (б) фотоелектричного модуля за паспортними даними

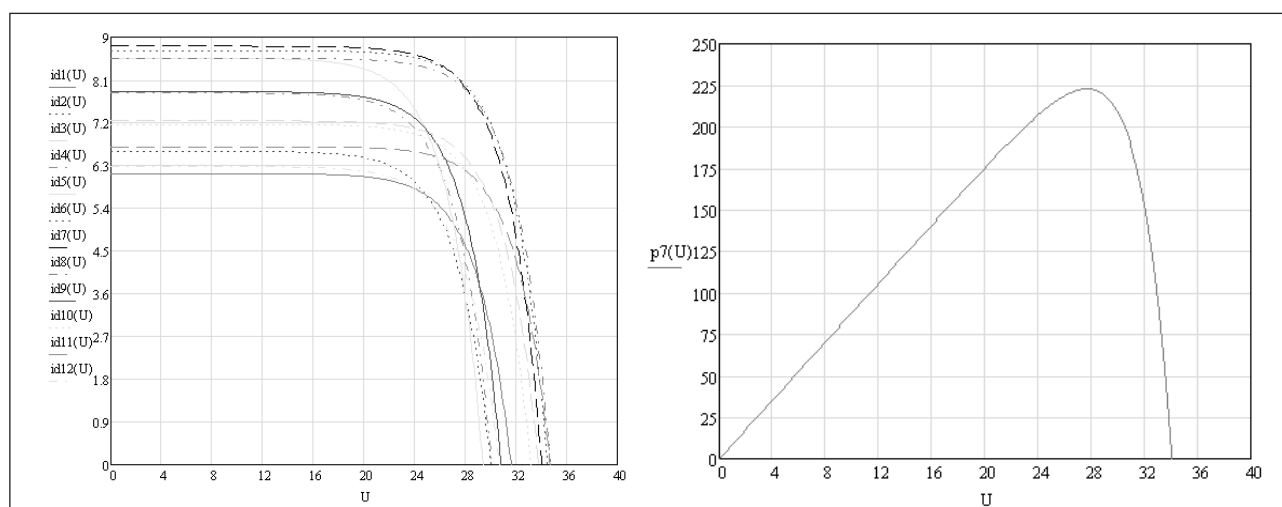


Рис. 3. Вольт-амперні характеристики ФЕМ для кожного місяця (а) та характеристика потужності у березні

Місяць	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
К-сть СБ SR, кВт год/м ²	1,3	2,1	3,2	4,2	5,6	5,64	5,71	5,07	3,62	2,4	1,5	1,2
10	3,26 дефіцит	4,42 дефіцит	6,7 повний	8,94 повний	9,92 повний	10,82 повний	10,7 повний	10,74 повний	9,75 повний	6,52 аварійний	4,3 дефіцит	3,24 дефіцит
11	3,58 дефіцит	4,9 дефіцит	7,4 повний	9,83 повний	10,9 повний	11,9 повний	11,77 повний	11,8 повний	10,7 повний	7,17 повний	4,73 дефіцит	3,56 дефіцит
12	3,9 дефіцит	5,3 дефіцит	8,1 повний	10,73 повний	11,9 повний	12,98 повний	12,84 повний	12,88 повний	11,69 повний	7,82 повний	5,15 дефіцит	3,88 дефіцит
13	4,23 дефіцит	5,74 дефіцит	8,73 повний	11,62 повний	12,89 повний	14,1 повний	13,92 повний	13,95 повний	12,67 повний	8,48 повний	5,58 дефіцит	4,21 дефіцит
14	4,56 дефіцит	6,19 дефіцит	9,4 повний	12,5 повний	13,89 повний	15,15 повний	14,9 повний	15,03 повний	13,65 повний	9,13 повний	6,02 дефіцит	4,53 дефіцит
15	4,88 дефіцит	6,63 дефіцит	10,1 повний	13,4 повний	14,88 повний	16,23 повний	16,1 повний	16,14 повний	14,62 повний	9,78 повний	6,45 дефіцит	4,85 дефіцит
16	5,21 дефіцит	7,1 аварійний	10,74 повний	14,3 повний	15,87 повний	17,3 повний	17,13 повний	17,17 повний	15,59 повний	10,44 повний	6,87 дефіцит	5,18 дефіцит
17	5,54 дефіцит	7,5 повний	11,4 повний	15,2 повний	16,86 повний	18,39 повний	18,2 повний	18,25 повний	16,57 повний	11,1 повний	7,3 аварійний	5,5 дефіцит
18	5,86 дефіцит	7,95 повний	12,1 повний	16,1 повний	17,86 повний	19,47 повний	19,27 повний	19,32 повний	17,54 повний	11,74 повний	7,73 повний	5,82 дефіцит
19	6,19 дефіцит	8,4 повний	12,75 повний	16,98 повний	18,85 повний	20,55 повний	20,34 повний	20,39 повний	18,52 повний	12,39 повний	8,16 повний	6,15 дефіцит
20	6,52 дефіцит	8,84 повний	13,43 повний	17,87 повний	19,84 повний	21,63 повний	21,41 повний	21,47 повний	19,49 повний	13,05 повний	8,59 повний	6,47 аварійний

Рис. 4. Обсяг вироблення енергії фотоелектричною установкою протягом доби та його відповідність навантаженню

де $T_{СБном}$ – температура ФЕМ, що відповідає нормальним умовам експлуатації; $T_{пов}$ – поточне значення температури повітря; $T_{повном}$ – температура повітря, що відповідає нормальним умовам експлуатації; HUM – вологість повітря; P_{ress} – тиск повітря; v – швидкість вітру; $E_{ном}$ – сонячна радіація, що приймається за норму для вимірювань (800 Вт/м²); $E_{СБ}$ – сонячна радіація, яку поглинає ФЕМ; k_1 – тепловий коефіцієнт; k_2 – коефіцієнт зміни вологості; k_3 – коефіцієнт зміни тиску; k_4 – коефіцієнт зміни швидкості вітру; k_5 – коефіцієнт зміни сонячної радіації.

Струм короткого замикання ФЕМ з урахуванням впливу температури визначається за виразом:

$$I_{кз} = I_{кз,ном} + k_c(T_{СБ} - T_{СБном})I_{кз,ном} \quad (8)$$

де $I_{кз,ном}$ – струм короткого замикання ФЕМ; k_c – температурний коефіцієнт струму (вказується в паспортних даних).

Коефіцієнти $k_1 - k_5$ розраховуються з використанням багатофакторного аналізу, що застосовується в різних сферах дослідження взаємозв'язку між значеннями змінних, і вказують наскільки зміниться температура ФЕМ залежно від певного фактора [10, с. 35–38; 11]. У розрахунках коефіцієнтів використані середньомісячні показники швидкості вітру, температури повітря та сонячної радіації у 2015–2016 рр. у м. Кременчуці. Атмосферний тиск та вологість повітря не були

враховані під час розрахунків через обмежену кількість вихідних даних. Результати розрахунків такі: $k_1 = 0,71$, $k_4 = 0,24$, $k_5 = 0,16$. Це свідчить про істотний вплив температури повітря на зміну температури ФЕМ та менш суттєвий вплив швидкості вітру та інтенсивності сонячної радіації.

З урахуванням зовнішніх та внутрішніх факторів вирази (4) та (5) матимуть такий вигляд:

$$U_p = 0,698U_{xx} \quad (9)$$

$$I_p = 0,736I_{кз} \quad (10)$$

На основі результатів проведених розрахунків отримано сімейство ВАХ ФЕМ для кожного місяця року з урахуванням факторів впливу на ефективність її роботи (рис. 3).

З отриманих графіків видно, що максимальний обсяг генерованої модулем потужності спостерігається у березні і досягається за рахунок оптимального співвідношення факторів навколишнього середовища. Підвищення ж рівня сонячної радіації призводить до збільшення струму короткого замикання, а зростання температури повітря впливає на зменшення напруги холостого ходу ФЕМ [12, с. 371–372].

З урахуванням реальної потужності, яку виробляє один ФЕМ, та враховуючи режими роботи споживача протягом року, визначено ступінь забезпеченості останнього електричною енергією з відновлюваного джерела (рис. 4). При цьому як

споживача було обрано систему освітлення будівлі навчального закладу, добовий обсяг споживання електроенергії якого коливається від 1,6 до 7,7 кВт·год протягом року. Враховуючи кількість робочих днів та потребу в освітленні для кожного з місяців року, у таблиці 1 наведено графік роботи системи освітлення з урахуванням метеорологічних даних протягом року, на основі якого і розраховувалась фотоелектрична установка.

Як видно з таблиці, найбільша кількість енергії споживається системою освітлення у зимовий період, при цьому сонячна активність у цей період найнижча. У літній же період для забезпечення системи освітлення електричною енергією досить роботи лише десяти одиниць ФЕМ. Тобто можна стверджувати про доцільність використання електроенергії від фотоелектричної установки інших споживачів будівлі.

Результати розрахунку вказують, що у кількості ФЕМ 20 одиниць споживач повністю забезпечений електричною енергією у зимовий період, а в літній період спостерігається навіть надлишок

виробленої електричної енергії, яку можна використовувати для живлення інших споживачів.

Отже, врахування умов навколишнього середовища дає змогу отримувати дані про енергетичні характеристики сонячних панелей у будь-яку пору року та час доби. Отримані за допомогою факторного аналізу поправочні коефіцієнти на погодні умови дають можливість прогнозування рівня вироблення електричної енергії з достатнім ступенем точності.

Висновки.

1. Проведений факторний аналіз впливу кліматичних умов на ефективність роботи сонячних панелей, у результаті якого визначені коефіцієнти впливу факторів навколишнього середовища на генерацію електричної енергії ФЕМ.

2. Використовуючи реальні показники ефективності функціонування, розраховано обсяг генерації електричної енергії та проведено його аналіз на відповідність потребам споживання електричної енергії системою освітлення будівлі навчального закладу.

Список літератури:

1. Global (2016) Statistical Review of World Energy 2016 Workbook. URL: https://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2016/10/World-Energy-Resources_Report_2016.pdf (дата звернення 15.09.2018).
2. “Snapshot of Global PV 1992–2014” (PDF). International Energy Agency – Photovoltaic Power Systems Programme. 30 March 2015. Archived from the original on 30 March 2015.
3. Lo Piano, Samuele; Mayumi, Kozo (2017). “Toward an integrated assessment of the performance of photovoltaic power stations for electricity generation”. *Applied Energy*. 186 (2). 167–174.
4. Юмаев Н.Р., Юсуфбеков Н.Ш. Исследование влияния погодных условий на параметры работы солнечных батарей в естественных условиях эксплуатации. *Технические науки: традиции и инновации: материалы III Международной научной конференции*. Казань. Молодой ученый, 2018. С. 52–57.
5. Юрченко А.В., Волгин А.В., Козлов А.В. Статистическая модель кремниевых солнечных батарей, работающая под воздействием природных и аппаратных факторов. *Известия Томского политехнического университета*. 2009. Т. 314. № 4. С. 142–148.
6. Shokarov D., Chorna V., Bogodist K. Economic feasibility study of expediency of establishment of solar modules in the private household. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ» Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність*. 2017. № 31 (1253). С. 87–92.
7. Elami, K., Sinan, K., Furkan, D., Sabir, R., Muharrem, K., Emin, U. & Utku, E., (2014). The analysis of PV power potential and system installation in Manavgat, Turkey. A case study in winterseason, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Volume 31. PP. 671–680.
8. Белан Б.Д., Юрченко А.В., Козлов А.В., Пестунов Д.А. Влияние параметров атмосферы на энергетические характеристики кремниевой солнечной батареи. *Оптика атмосферы и океана*. 2005. Т. 18. № 8 С. 731–734.
9. Козлов А.В., Ковалевский В.К., Юрченко А.В. Результаты климатических испытаний солнечной батареи в натуральных условиях г. Томска. *Светотехника*. № 1. 2005. № 4. С. 37–41.
10. Еременко В.С., Мокийчук В.М., Самойличенко О.В. Исследование мощности критерия Кохрена при ограниченном числе наблюдений. *Системи обробки інформації*. 2007. № 6 (64). С. 35–38.
11. Planning for the unexpected, *Scientific Computing World*: February/ March 2006. URL: <http://www.scientific-computing.com> (дата звернення 20.09.2018).
12. Rodrigues E.M.G. et al. Simulation of a solar cell considering single-diode equivalent circuit model. *International conference on renewable energies and power quality, Spain*. 2011. С. 369–373.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОГОДНЫХ УСЛОВИЙ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАБОТЫ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ

В статье рассматривается энергетическая эффективность применения фотоэлектрических модулей в качестве источника электрической энергии для системы освещения. Рассмотрены основные параметры фотоэлектрических модулей и их математическое описание. На основе анализа литературных источников установлены природные факторы, влияющие на производительность фотоэлектрических модулей. С помощью факторного анализа рассчитаны значения температурного коэффициента, коэффициента изменения скорости ветра и изменения солнечной радиации, а также установлена степень их влияния на изменение температуры модуля. По результатам расчетов установлен максимальный объем генерируемой модулем мощности, который зафиксирован в марте, а также тот факт, что повышение уровня солнечной радиации приводит к увеличению тока короткого замыкания, а рост температуры воздуха влияет на уменьшение напряжения холостого хода фотоэлектрического модуля. Доказана целесообразность применения фотоэлектрической установки для питания осветительной нагрузки учебного корпуса в течение года с учетом режима ее работы и потенциала установки.

Ключевые слова: фотоэлектрический модуль, эффективность, температура, мощность, генерация.

RESEARCHES OF WEATHER CONDITIONS INFLUENCE ON PHOTOVOLTAIC SYSTEM EFFICIENCY

The energy efficiency of the use of photovoltaic modules as a source of electric energy for the lighting system is considered. The main parameters of photovoltaic modules and their mathematical description are considered. Based on the analysis of literary sources, natural factors that influence the performance of photovoltaic modules are established. Using factor analysis, the values of the temperature coefficient, the coefficient of change in wind velocity and changes in solar radiation are calculated, and the degree of their influence on the temperature change of the module is calculated. According to the calculation results, the maximum volume generated by the power module, recorded in March, and the fact that the increase in the level of solar radiation leads to an increase in the short-circuit current, and the increase in the temperature of the air affects the reduction of the idle voltage of the photovoltaic module. The expediency of using a photovoltaic installation for feeding the illumination load of an educational building during the year, taking into account its mode of operation and installation potential, is proved.

Key words: photovoltaic system, efficiency, temperature, power, generation.