

УДК 620.92

ПАНЧЕНКО В. В., кандидат технічних наук, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки,
ХАРІН Р. О., аспірант кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки
(Український державний університет залізничного транспорту)

Дослідження впливу деградації сонячних панелей на ефективність роботи сонячної електростанції

У статті розглядаються особливості, пов'язані зі старінням і деградацією сонячних фотоелектричних систем. Розглянуто і проаналізовано багато факторів старіння, включаючи температуру, вологість, пил, тріщини панелей. Проводилися моделювання та знімалися характеристики сонячної електростанції яка встановлена на даху тягової підстанції №18 м. Зміїв. Крім того, досліджено вплив факторів старіння на продуктивність сонячних фотоелектричних модулів, включаючи термін служби, ефективність, деградацію матеріалу, перегрів і невідповідність.

Деградація сонячних панелей відбувається постійно, як через неправильний режим експлуатації, так і під час впливу на них зовнішніх факторів. Але швидкість деградації панелі можна значно знизити шляхом вчасного проведення її діагностики та заміни несправних деталей. Деградація фотоелектричного модуля призводить до поступової втрати ефективності. Моделювання деградаційних процесів виконується протягом розрахункового року експлуатації фотоелектричної системи. На практиці деградація означає зменшення продуктивності фотоелектричної панелі.

Ключові слова: деградація, сонячні панелі, пікова потужність, фотоелектрична система.

Проблема постановки дослідження

Однією з найбільших причин забруднення навколишнього середовища у світі є традиційне виробництво електроенергії на основі викопного палива. Потреба в більш чистих і сталих джерелах енергії для виробництва електроенергії зростає через швидке виснаження запасів викопного палива та його негативний вплив на навколишнє середовище [2].

У цьому дослідженні розглядаються особливості, пов'язані зі старінням і деградацією сонячних фотоелектричних систем (ФЕС). Розглянуто і проаналізовано низку факторів старіння, включаючи температуру, вологість, пил та пошкодження панелей. Було проведено моделювання та знято характеристики сонячної електростанції, встановленої на даху тягової підстанції № 18 м. Зміїв. Крім того, досліджено вплив факторів старіння на продуктивність сонячних фотоелектричних модулів, термін їх служби, ефективність, деградацію матеріалу, перегрів і невідповідність.

Аналіз останніх публікацій

Аналіз літературних джерел показує різні підходи до вирішення цієї проблеми. У роботі [3] було розглянуто забруднення та процес періодичного очищення сонячних елементів у районі Маан, Йорданія.

Щорічна деградація і продуктивність досліджувались за умов зовнішнього впливу. У статті [5] розглянуто і проаналізовано низку факторів старіння, розглянуто основні недоліки, проблеми та виклики, пов'язані зі старінням сонячних фотоелектричних перетворювачів. У статті [6] подано техніко-економічне обґрунтування та дослідження надійності електростанції на основі ФЕС для довгострокового виробництва електроенергії. У статті [7] подано аналіз нещодавніх досліджень впливу факторів експлуатації та навколишнього середовища на продуктивність сонячних фотоелектричних елементів, розглянуто найсучасніші методи зменшення впливу цих елементів, а також їхні пропорційні переваги і труднощі. У статті також досліджуються параметри, що впливають на виробництво сонячної енергії, та виконаний аналіз їх ефективності. Вивчається ефективність і здатність перетворення енергії напівпровідникових матеріалів для виробництва електроенергії. У роботі [8] було проведено детальне вивчення впливу частинок повітряного пилу на продуктивність фотоелектричної (ФЕ) моделі.

© ПАНЧЕНКО В. В., ХАРІН Р. О. 2023

У цьому дослідженні вплив частинок пилу з навколишнього середовища на втрати потужності у фотоелектричному модулі оцінювався шляхом вимірювання електричних показників, таких як напруга, струм і потужність. У роботі [9] досліджуються втрати потужності, розвиток гарячих точок, дефекти на рівні міліметрів і коефіцієнт продуктивності (PR) 28 фотомодулів, що зазнали впливу.

Мета статті – проаналізувати фактори, що впливають на деградацію сонячних панелей, і оцінити їхній вплив на ефективність роботи сонячної електростанції.

Основна частина

Деградація сонячних панелей відбувається постійно як через неправильний режим експлуатації, так і під час впливу на них зовнішніх факторів. Але швидкість деградації панелі можна значно знизити шляхом вчасного проведення її діагностики та заміни несправних деталей. За останніми дослідженнями, основним хімічним елементом, що викликає підвищену деградацію сонячних модулів, є натрій та інші активні метали. Зовнішні фактори підсилюють паразитні точки та часто ведуть до незворотних наслідків. Вчасно виявити деградацію сонячних панелей допомагають регулярні вимірювання напруги холостого ходу кожного модуля.

Деградують усі існуючі конструкції сонячних панелей – полікристалічні, монокристалічні, плівкові. На рис. 1 показаний графік деградації сонячних панелей Jinko Solar впродовж п'яти років експлуатації [1]. Лінійна гарантія продуктивності для монокристалічних модулів подана на рис. 2, а полікристалічних модулів – рис. 3.

Об'єктом дослідження є сонячна електростанція потужністю 12,20 кВт, встановлена на даху тягової підстанції № 18 м. Зміїв і підключена до живильної мережі [4]. Моделювання роботи і знаття характеристик здійснюється за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення PVsyst.

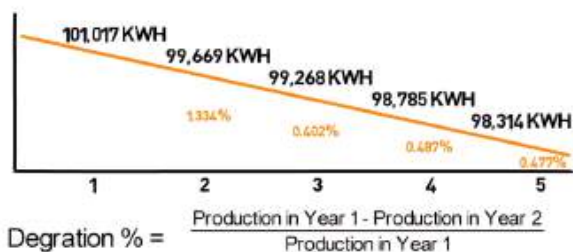


Рис. 1. Графік вимірювання деградації сонячних панелей Jinko Solar

За даними виробника сонячних панелей Jinko, деградація пікової потужності фотомодулів не перевищить такі критерії [9]:

- 1) для монокристалічних модулів:
 - 3 % номінальної потужності протягом одного року періоду, що починається з дати початку гарантії;
 - з другого по п'ятий роки лінійна зміна від 3 до 5 %, середня деградація становить 0,5 % на рік;
 - шостого по дванадцятий роки лінійна зміна від 5 до 10 %, середня деградація становить 0,714 % на рік;
 - 13-го по 25-й рік лінійна зміна від 10 до 20 %, середня деградація становить 0,769 % на рік;

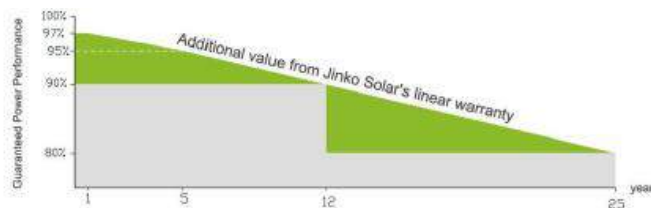


Рис. 2. Лінійна гарантія продуктивності для монокристалічних модулів

- 2) полікристалічних модулів:
 - 2,5 % номінальної потужності протягом одного року періоду, що починається з дати початку гарантії;
 - з другого по п'ятий роки лінійна зміна від 2,5 до 5 %, середня деградація в цей період становить 0,625 % на рік;
 - шостого по дванадцятий рік лінійна зміна від 5 до 10 %, середня деградація під час цього періоду – 0,714 % на рік;
 - 13-го по 25-й рік лінійна зміна від 10 до 20 %, середня деградація протягом цього періоду становить 0,769 % на рік.

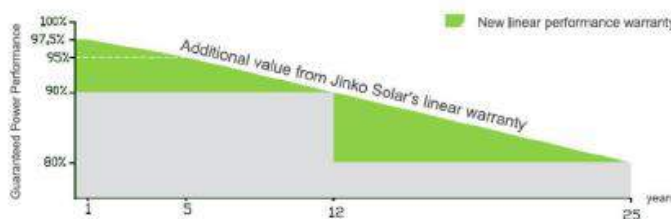


Рис. 3. Лінійна гарантія продуктивності для полікристалічних модулів

Основними функціональними вузлами фотоелектричної системи (ФЕС), що піддаються старінню, є:

- фотоелектричний модуль (тривала деградація, ступінь якої зростає при збільшенні невідповідності

між модулями, що не деградують з однаковою швидкістю);

- батареї в системах з накопичувачем (мають бути замінені, іноді кілька разів протягом життя системи);
 - інвертори, що з часом потребують ремонту або заміни;
 - елементи електропроводки, грозозахисту та ін.
- [2].

Виконаємо дослідження впливу різних факторів на ступінь деградації функціональних вузлів секції ФЕС, побудованої на 10 фотомодулях Jinko Solar.

1. Дослідження падіння напруги через зміну опору провідників. Характеристика неспівпадіння (Mismatched charact.) проходить у середині рис. 4.

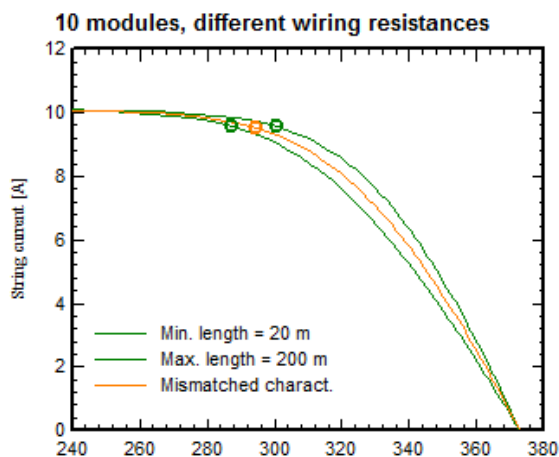


Рис. 4. Характеристики струму ФЕС при зміні опору провідників

Як бачимо, найбільші значення падіння струму спостерігаються після 300 В саме за рахунок зміни довжини провідників між двома секціями ФЕС.

Характеристики системи навколо точки максимальної потужності (P_{mpp}) є порівняно еквівалентними одна з одною. Видно, що невідповідність, тобто різниця між значеннями P_{mpp} двох секцій і середнім значенням P_{mpp} , є невеликою. Наприклад, для отриманих значень опору провідника довжиною 500 м і перерізом 2,5 мм² порівняно з провідником довжиною «нульової» довжини падіння напруги становить 5,2 %, але втрати на невідповідність становлять лише 0,38 %.

На рис. 4 та 5 показано зміни струму та потужності в одній секції залежно від напруги при різних значеннях довжини з'єднувальних провідників.

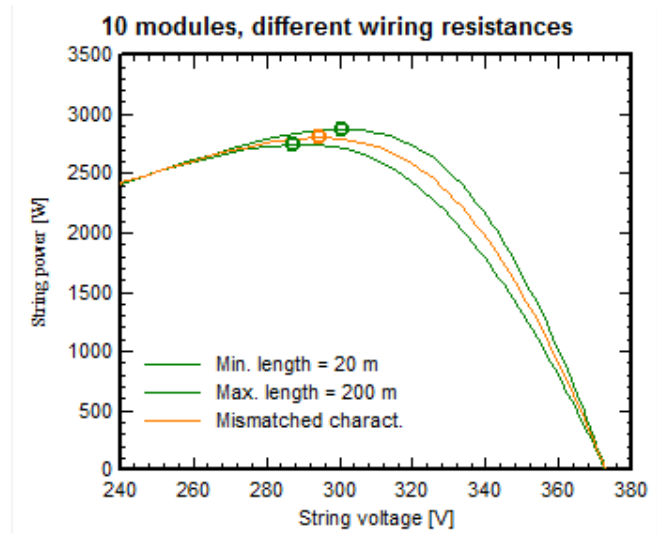


Рис. 5. Залежність напруги та потужності ФЕС

Результати моделювання, показані на рис. 6, доводять, що зі збільшенням довжини провідника зростають і втрати на неспівпадіння. Відтак знижується і ефективність ФЕС.

Отже, у цьому випадку для мінімізації втрат потрібно розташовувати об'єкти ФЕС неподалік один від одного.

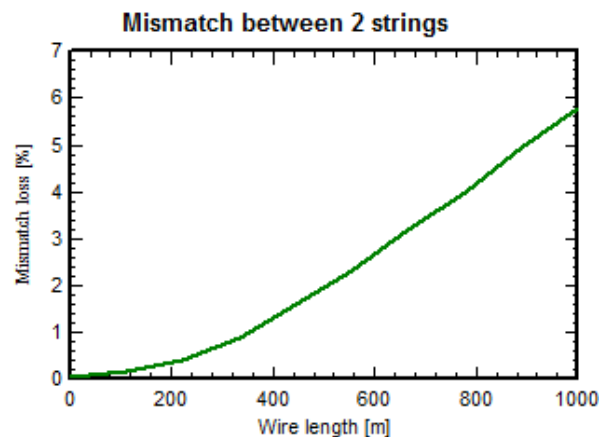


Рис. 6. Зміна втрат між двома секціями ФЕС залежно від довжини провідника

Результати моделювання зміни довжини провідника, проведеного у програмному середовищі PVsyst, зведено до табл. 1.

Таблиця 1

Результати моделювання			
	Напруга, В	Струм, А	Потужність, Вт
Масив 1	300.8	9.55	2873.9
Масив 2	287.6	9.56	2750.1
Невідповідність масивів	294.7	9.51	2803.3
Середня потужність 1 і 2			2812.0
Втрати потужності за рахунок невідповідності			8.7 Вт, 0.31 %

2. Падіння напруги через коливання температури масиву (рис. 7).

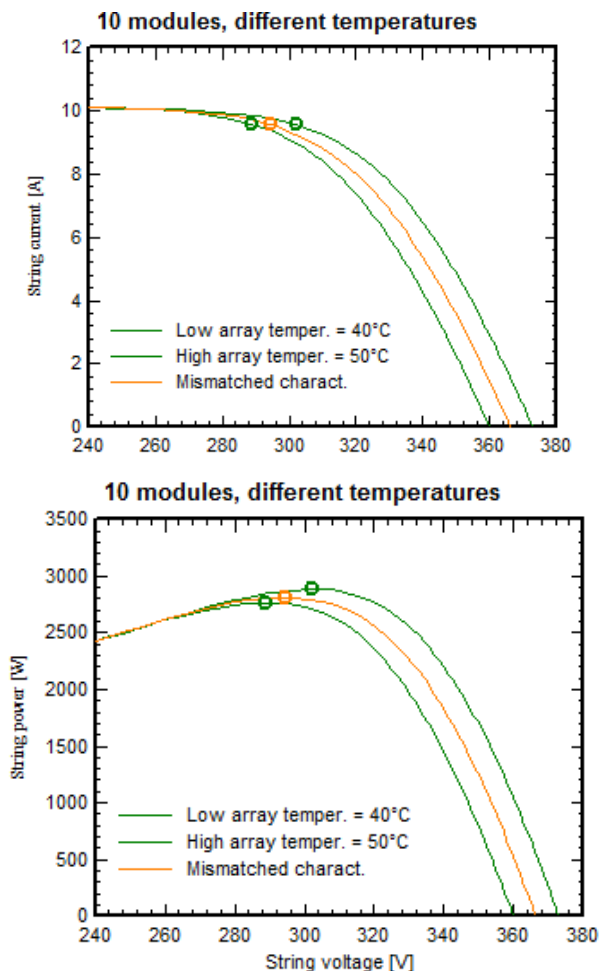


Рис. 7. Характеристики роботи ФЕС при зміні температури фотомодулів

Дослідження проводимо при зміні температури нагріву масиву від 40 до 50 °С. При цьому слід пам'ятати, що в реальних умовах експлуатації всі фотомодулі нагріваються по-різному.

Результати дослідження показують, що при різниці температур 10 °С падіння напруги становить 4,6 %, а втрати на неузгодженість – 0,47 %.

Результати моделювання, показані на рис. 8, доводять, що зі збільшенням довжини провідника зростають і втрати на неспівпадіння, викликані зміною температури окремих секцій ФЕС що негативно впливає на ефективність її роботи.

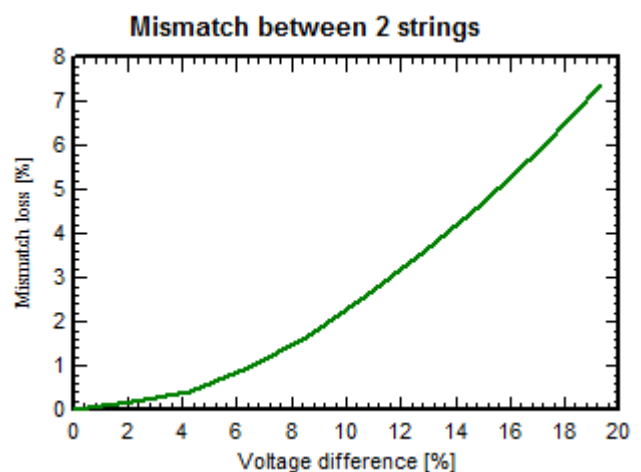


Рис. 8. Зміна втрат між двома секціями ФЕС залежно від різниці напруг

Результати моделювання впливу зміни температури, проведеного у програмному середовищі PVsyst, зведено до табл. 2.

Результати моделювання

	Напруга, В	Струм, А	Потужність, Вт
Масив 1	302.1	9.56	2887.6
Масив 2	289	9.57	2766.1
Невідповідність масивів	294.7	9.55	2814.3
Середня потужність 1 і 2			2826.8
Втрати потужності невідповідності			12.6 Вт, 0.45 %

3. Невідповідність за струмами двох модулів у секції (рис. 9, 10).

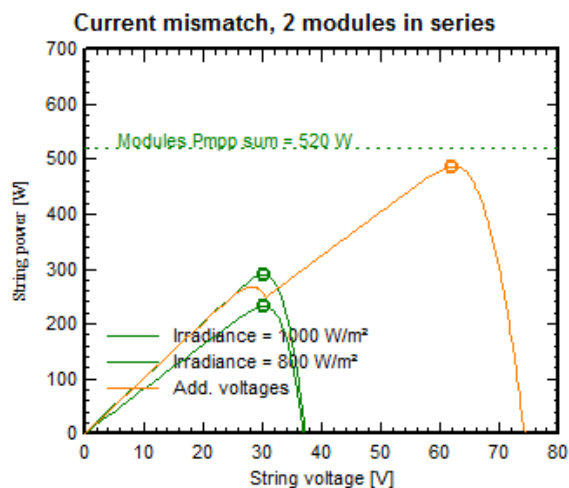
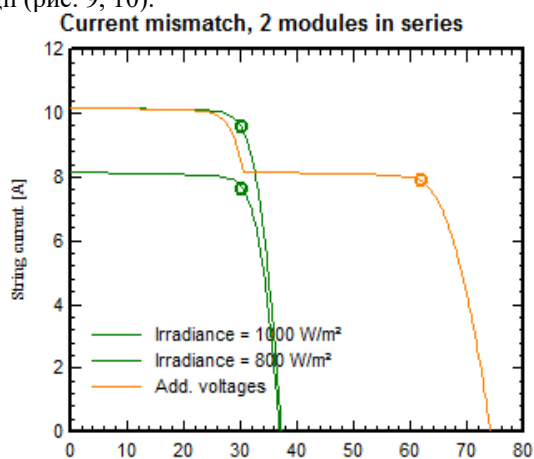


Рис. 9. Характеристики роботи ФЕС при зміні ступеня опромінення фотомодулів

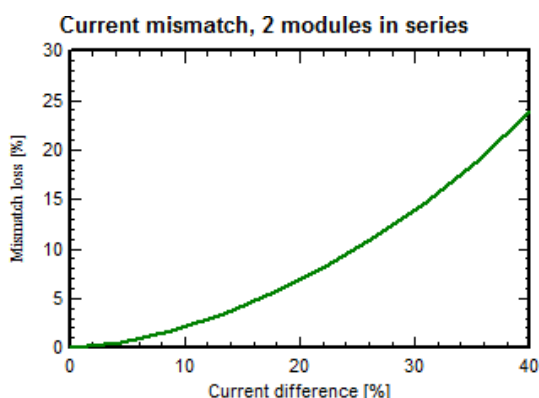


Рис. 10. Зміна втрат між двома модулями в секції ФЕС залежно від різниці струмів між ними

Результати моделювання, наведені на рис. 10, показують, що зі збільшенням різниці струмів між модулями швидко зростають і втрати на неспівпадіння, викликані зміною опромінення окремих модулів ФЕС. Це у свою чергу також знижує ефективність роботи станції.

Результати моделювання впливу зміни ступеня опромінення, проведеного у програмному середовищі PVsyst, зведено до табл. 3.

Результати моделювання

	Напруга, В	Струм, А	Потужність, Вт
PV модуль 1	30.2	9.56	288.8
PV модуль 2	30.3	7.64	231.6
PV модулі в секції	61.9	7.87	486.7
Підсумок потужність PV 1 і PV 2			520.4
Втрати потужності невідповідності			33.6 Вт, 6.91 %

4. Невідповідність за струмами, один модуль у секції.

Моделювання неузгодженості за струмами є більш складним процесом, оскільки одночасно може виникати кілька різних ситуацій.

У цьому випадку за допомогою PVsyst змодельована ситуація, коли секція складається з одного дефектного модуля. Вольт-амперні (ВАХ) і вольт-ватні характеристики (ВВХ) показані на рис. 11.

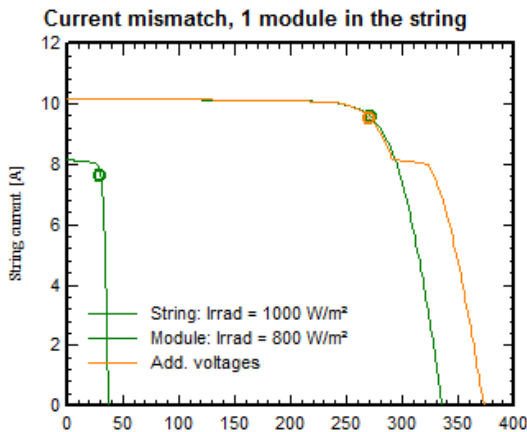


Рис. 11. Характеристики роботи ФЕС при зміні ступеня опромінення фотомодуля та секції

Результати моделювання показують, що коли струм у колі нижчий за I_{sc} несправного модуля, напруги зазвичай додаються. Коли струм перевищує I_{sc} несправного модуля, він стає обернено зміщеним, і в роботу вступають зворотні діоди. Дефектний модуль більше не активний, а зворотна напруга на діоді створює додаткові втрати.

Для ситуації одного дефектного модуля ефективні втрати як функція різниці струмів мають вигляд, показаний на рис. 12.

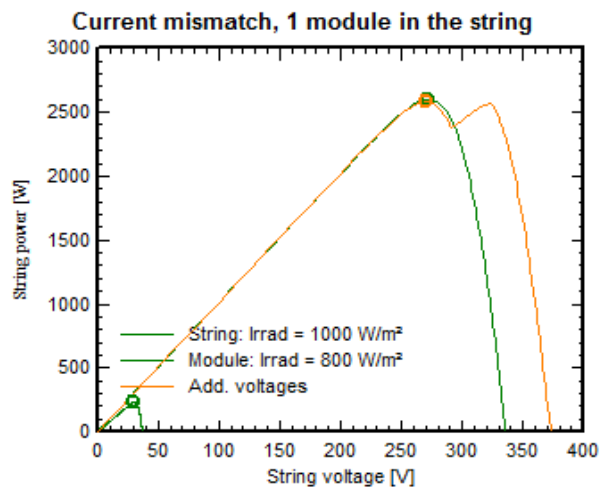
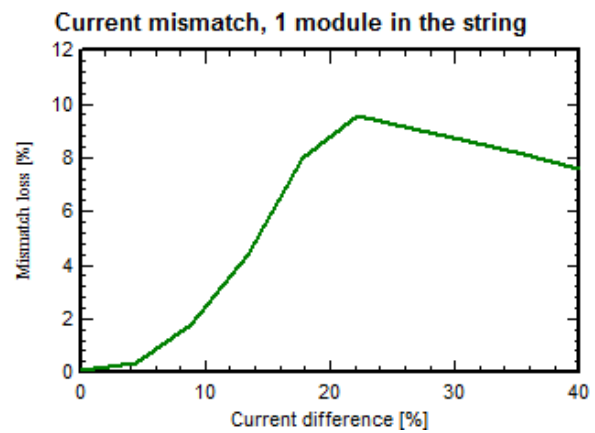


Рис. 12. Зміна втрат у випадку наявності одного дефектного модуля в секції як функція різниці струмів

У цьому випадку приблизно до 18 % отриманої P_{mp} на помаранчевій кривій є домінуючими. Криві, позначені зеленим на графіку вище відповідають решті модулів. Абсолютна втрата це повний «потенційний» внесок несправного модуля та потужність, втрачена

діодом під час активації (зменшується у відносному значенні). Результати моделювання зведено до табл. 4.

Таблиця 4

Результати моделювання

	Напруга, В	Струм, А	Потужність, Вт
Інша частина рядка	271.9	9.56	2598.8
Не відповідає PV модуля	30.3	7.64	231.6
PV модуль у серіях	270.1	9.54	2577.1
Повна індивідуальна потужність модуля			2830.5
Втрати потужності невідповідності			253.4 Вт, 9.83 %

Деградація фотоелектричного модуля призводить до поступової втрати його ефективності. Моделювання деградаційних процесів виконується протягом розрахункового року експлуатації фотоелектричної системи. На практиці деградація означає зменшення продуктивності фотоелектричної панелі. В деяких випадках це може мати певний «позитивний» вплив на повну поведінку системи, а саме на втрати потужності, коли інвертор недовантажений.

Отже, щорічна гарантована швидкість зменшення нижньої межі відповідає нахилу цієї

кривої. У нашому випадку для панелей Jinko Solar Eagle PERC JKM305M-60 цей показник складає 0,6 % на рік. За допомогою моделі визначимо середню швидкість деградації (для масиву модулів). Це значення втрат може бути набагато нижчим за цей гарантований ліміт часу (рис. 13). Довгострокові вимірювання швидкості деградації є відносно рідкісними. Крім того, усі модулі не будуть руйнуватися з однаковою швидкістю. Це призведе до додаткових збитків через невідповідність, які будуть збільшуватись з часом.

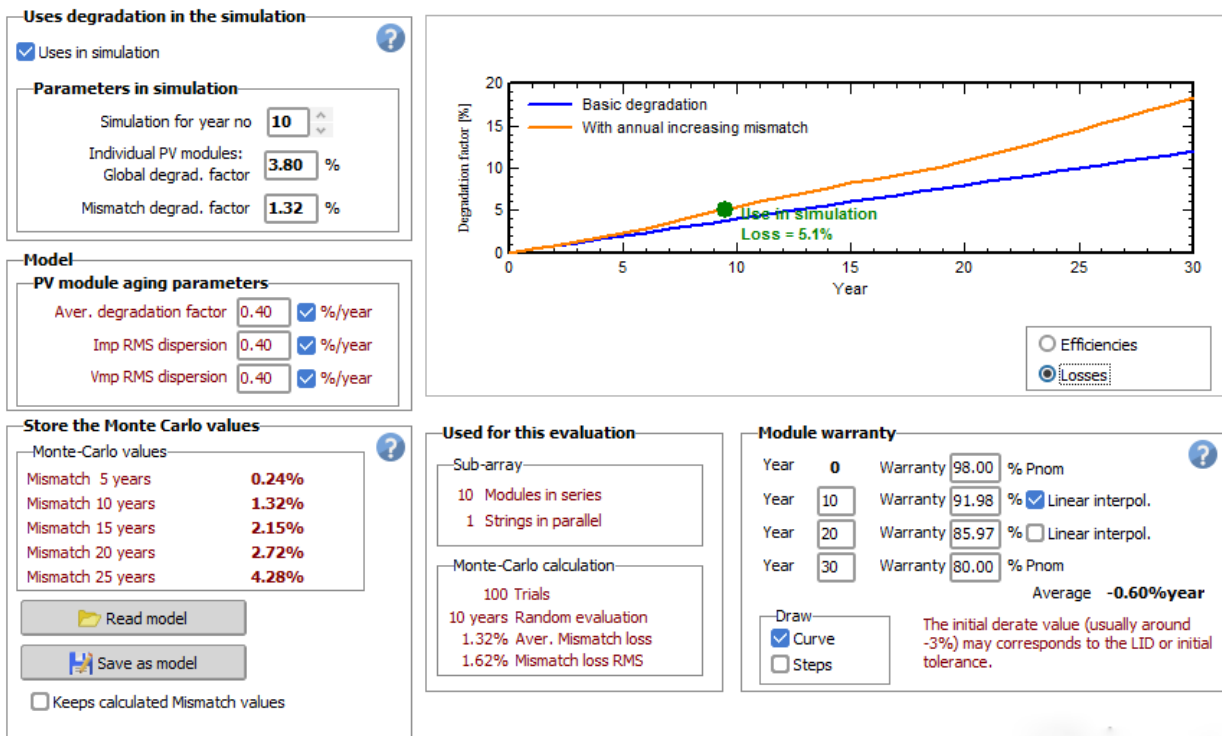


Рис. 13. Втрати за рахунок деградації фотоелектричного модуля

У лабораторних умовах при використанні 10 таких панелей в одній секції втрати в них за рахунок деградації складатимуть за 30 років 17,5 %, приблизно 0,6 % за рік використання. За 10 років використання сонячних панелей фактор деградації складатиме 3,8 %, а результат втрат за рахунок невідповідності панелей за роками становить 1,32 %. Фактор деградації сонячних панелей за 20 років використання становить 7,8 %, а втрати за рахунок невідповідності панелей складають 2,72 %. На 30 рік використання панелей деградація 11,8 % при невідповідності панелей 6,1 %.

За допомогою програмного середовища PVsyst було визначено середньоквадратичну величину цього розподілу та оцінено ступінь невідповідності як функцію віку системи. Розрахунок був виконаний за допомогою методу Монте-Карло з такими припущеннями:

- швидкість деградації кожного модуля є постійною протягом багатьох років;

- вибір розподілу обмежений двома сигмами, оскільки великі розбіжності призводять до дуже великих втрат невідповідності. За допомогою методу Монте-Карло було оцінено невідповідність модулів за кожні 5 років використання: 5 років – 0,24 %; 10 років – 1,32 %; 15 років – 2,15 %; 20 років – 2,72 %; 25 років – 4,28 %.

Заводом-виробником передбачається гарантія на модулі, що враховує нижню межу для окремого фотоелектричного модуля. У кривих, показаних на рис. 14, початкові втрати на рівні 3 % слід розглядати як заводські дефекти або можливий дефіцит початкової потужності (допуск, заводська похибка вимірювання). Заводом-виробником надається гарантія, що за 25 років експлуатації ефективність сонячної панелі буде становити не менше 80 %. З урахуванням деградаційних процесів, що відбуваються в сонячній панелі щорічно, за допомогою моделювання були отримані такі характеристики.

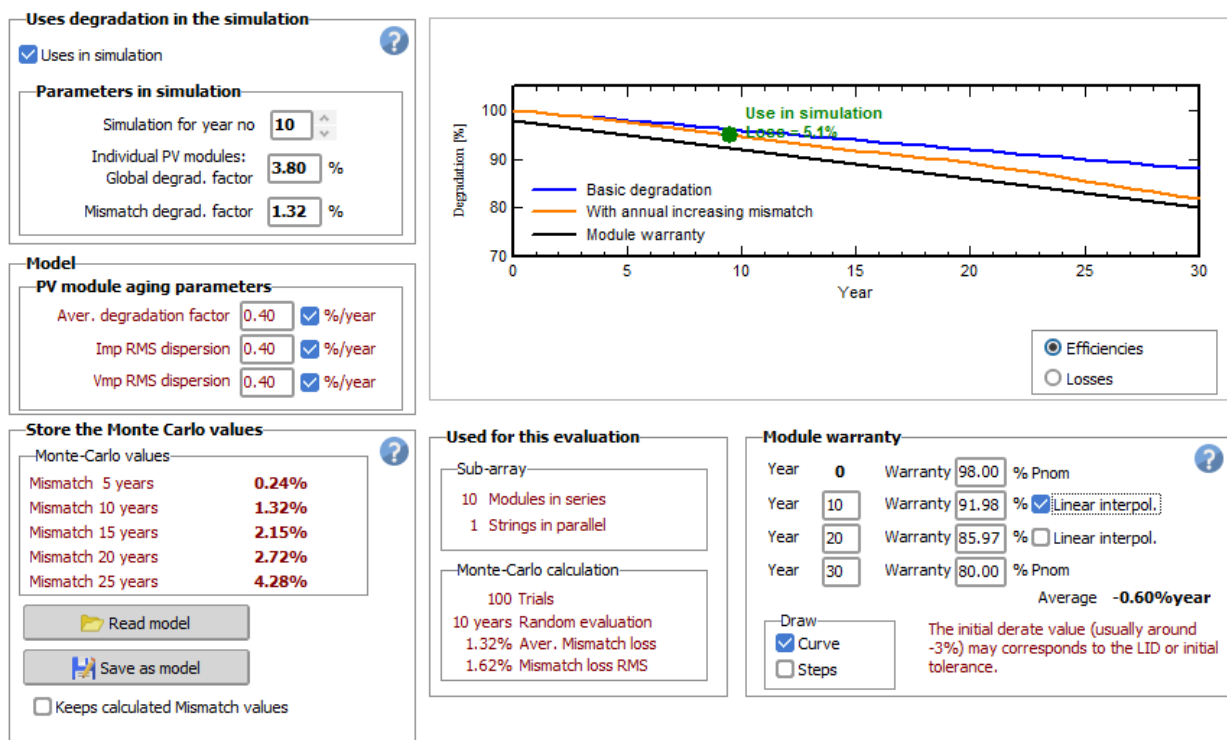


Рис. 14. Ефективність фотоелектричного модуля, передбачена заводом-виробником

Виробник сонячних панелей Jinko Solar Eagle PERC JKM305M-60 дає гарантію, що сонячна панель за перші 10 років експлуатації буде виробляти 98 % номінальної потужності, за 10 років – 91,98 %, 20 років – 85,97 %, 30 років – 80 %.

Висновки

Для дослідження в роботі використано реальний об'єкт, для якого була розрахована потужність обладнання, необхідна для забезпечення власних потреб тягової підстанції. Було визначено, що станція генерує 14745 кВт·год енергії постійного струму за допомогою фотомодулів. Обсяг річної енергії змінного струму, що вводиться до мережі, становить 13916 кВт·год. З метою підвищення ефективності

експлуатації до цієї станції необхідно приєднати акумуляторні батареї.

Результати моделювання доводять, що зі збільшенням довжини провідника зростають і втрати на неспівпадіння. Відтак знижується і ефективність ФЕС. Отже, у цьому випадку для мінімізації втрат потрібно розташовувати об'єкти ФЕС неподалік один від одного.

Результати дослідження показують, що при різниці температур 10 °С падіння напруги становить 4,6 %, а втрати на неузгодженість – 0,47 %.

Результати моделювання показують, що зі збільшенням різниці струмів між модулями швидко зростають і втрати на неспівпадіння, викликані зміною опромінення окремих модулів ФЕС. Це у свою чергу також знижує ефективність роботи станції.

Фактор деградації сонячних панелей за 20 років використання становить 7,8 %, а втрати за рахунок невідповідності панелей складають 2,72 %. На 30 рік використання панелей деградація 11,8 % при невідповідності панелей 6,1 %.

За допомогою методу Монте-Карло було оцінено невідповідність модулів за кожні п'ять років використання: 5 років – 0,24 %; 10 років – 1,32 %; 15 років – 2,15 %; 20 років – 2,72 %; 25 років – 4,28 %.

Для ефективної роботи сонячної електростанції потрібно дотримуватися таких умов експлуатації:

- електростанція потребує ефективного охолодження (вентиляції);
- для запобігання перегріву панелей їх необхідно розміщувати з технологічними зазорами, панелі та елементи електростанції необхідно розташовувати на відстані один від одного;
- місце встановлення панелей має передбачати наявність технологічних проходів;
- для недопущення взаємного затінення панелей між ними має бути передбачена достатня відстань.

Список використаних джерел

1. Деградація сонячних батарей. URL: <https://solarpanel.today/degradaciya-solnechnih-paneley/>.
2. Сталій розвиток: захит навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування. *Збірник матеріалів VII Міжнародного молодіжного конгресу* (10-11 лютого 2022, Україна, Львів). Київ, 2022. 271 с.
3. The Effect of Soiling and Periodic Cleaning on the Performance of Solar Power Plants in Ma'an, Jordan, Mohammad Zayed Ahmed, Habes Al-Khawaldeh, Laith Al-Khawaldeh. *Innovative Systems Design and Engineering*, ISSN 2222-1727 (Paper). ISSN 2222-2871 (Online). Vol. 9, No. 1, 2018.
4. Панченко В. В., Харін Р. О. Моделювання та техніко-економічний розрахунок роботи сонячної електростанції на тяговій підстанції. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2023. № 2. С. 3-13.
5. Investigation of Degradation of Solar Photovoltaics: A Review of Aging Factors, Impacts, and Future Directions toward Sustainable Energy Management. Tuhibur Rahman, Ahmed Al Mansur, Molla Shahadat Hossain Lipu *Energies* 2023, 16(9), 3706. URL: <https://doi.org/10.3390/en16093706>.
6. Degradation analysis and the impacts on feasibility study of floating solar photovoltaic systems, Anik_Goswami, Pradip Kumar_Sadhu, *Sustainable Energy, Grids and Networks*. Vol. 26, June 2021, 100425. URL: <https://doi.org/10.1016/j.segan.2020.100425>.
7. Effect of various parameters on the performance of solar PV power plant: a review and the experimental study, *Sustainable Energy Research*, Vol. 10, Article number: 6 (2023), [Feroz Shaik](#), [Syam Sundar Lingala](#), [Punnaiah Veeraboina](#).
8. An experimental study on effect of dust on power loss in solar photovoltaic module, *Renewables: Wind, Water, and Solar*. Vol. 4, Article number: 9 (2017) [Athar Hussain](#), [Ankit Batra](#), [Rupendra Pachauri](#).
9. Jinko Solar URL: <https://www.jinkosolar.com/en/>.
10. Power loss and hotspot analysis for photovoltaic modules affected by potential induced degradation, *npj Materials Degradation*. Vol. 6, Article number: 11 (2022) [Mahmoud Dhimish](#), [Andy M. Tyrrell](#). URL: <https://doi.org/10.1038/s41529-022-00221-9>.

Study of the impact of solar panel degradation on the efficiency of a solar power plant

Abstract. The article discusses the consequences and difficulties associated with the aging and degradation of solar photovoltaic systems. Many aging factors are considered and analyzed, including temperature, humidity, dust, and panel cracks. Modeling was carried out and the characteristics of the solar power plant installed on the roof of the traction substation №18 in Zmiyiv were recorded. Zmiyiv. In addition, the influence of aging factors on the performance of solar PV modules, including service life, efficiency, material degradation, overheating, and mismatch, was investigated. The degradation of solar panels occurs constantly, both due to improper operation and when exposed to external factors. However, the rate of panel degradation can be significantly reduced by timely

diagnostics and replacement of faulty parts. The degradation of a photovoltaic module leads to a gradual loss of efficiency. Modeling of degradation processes is performed during the estimated year of operation of the photovoltaic system. In practice, degradation means a decrease in the performance of a photovoltaic panel.

Keywords: degradation, solar panels, peak power, photovoltaic system.

Надійшла 15.09.2023 р

Панченко Владислав Вадимович, кандидат технічних наук, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки Українського державного університету залізничного транспорту. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-4822-7151>. E-mail: panchenko_vv@kart.edu.ua.

Харін Руслан Олександрович, аспірант кафедри електроенергетики, електротехніка та електромеханіка Українського державного університету залізничного транспорту. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-0747-209X>. E-mail: kharinruslan07@gmail.com.

Panchenko Vladyslav, PhD (Tech), Associate Professor, department of Electrical Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-4822-7151>. E-mail: panchenko_vv@kart.edu.ua.

Kharin Ruslan, postgraduate student, department of department of electric power engineering, electrical engineering and electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-0747-209X>. E-mail: kharinruslan07@gmail.com.

0.73