

*О.А. ПЛАХТІЙ, І.В. ХОМЕНКО, Д.А. ШЕЛЕСТ, А.В. СИНЯВСЬКИЙ*

### ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕДАЧІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ СОНЯЧНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ В ТРИФАЗНУ ЕЛЕКТРИЧНУ МЕРЕЖУ

Представлено розробку та дослідження енергетичних показників сонячної електростанції на базі блоку сонячних панелей типу Era-370W-24V-Mono потужністю 110 кВт та сонячного гібридного інвертора на базі силових транзисторів CM1200DC-34S, який передає потужність до трифазної електричної мережі. Розроблено систему керування гібридного інвертора, який передає електричну енергію від сонячних панелей з коефіцієнтом потужності близьким до одиниці та вмістом вищих гармонік струму менше 4 %. Для сонячних панелей Era-370W-24V-Mono проведено поліноміальну апроксимацію енергетичних характеристик, а саме залежності відібраної потужності від спожитого струму, яка дозволяє забезпечити покращення режиму відбору максимальної потужності від сонячних панелей. Проведено дослідження втрат потужності в гібридному інверторі сонячної електростанції, отримано залежність сумарних втрат потужності від частоти комутації силових транзисторів в режимі відбору максимальної потужності. Визначено, що ККД гібридного інвертора сонячної електростанції складає від 98,4 % при частоті ШІМ 1 кГц до 92,7 % при частоті ШІМ 6 кГц.

**Ключові слова:** сонячна електростанція, автономний інвертор напруги, характеристики сонячних панелей.

*О.А. ПЛАХТІЙ, І.В. ХОМЕНКО, Д.А. ШЕЛЕСТ, А.В. СИНЯВСЬКИЙ*

### STUDY OF ELECTRICITY TRANSMISSION OF A SOLAR POWER PLANT INTO A THREE-PHASE ELECTRICAL NETWORK

The development and research of the energy indicators of a solar power plant based on a block of solar panels of the Era-370W-24V-Mono type with a capacity of 110 kW and a solar hybrid inverter based on power transistors CM1200DC-34S, which transmits power to a three-phase electrical network, is presented. The control system of a hybrid inverter that transmits electric energy from solar panels with a power factor close to unity and a content of higher current harmonics less than 4 % has been developed. For Era-370W-24V-Mono solar panels, a polynomial approximation of the energy characteristics was carried out, namely the dependence of the selected power on the consumed current, which allows to improve the mode of maximum power selection from solar panels. A study of power losses in a hybrid inverter of a solar power plant was conducted, the dependence of total power losses on the switching frequency of power transistors in the mode of maximum power selection was obtained. It was determined that the efficiency of the hybrid inverter of the solar power plant ranges from 98.4 % at a PWM frequency of 1 kHz to 92.7 % at a PWM frequency of 6 kHz.

**Keywords:** solar power plant, autonomous voltage inverter, characteristics of solar panels.

**Вступ.** Виробництво та споживання електроенергії у світі постійно зростає. Водночас стрімко зростає виробництво електроенергії з альтернативних джерел енергії, зокрема сонячних фотоелектричних панелей (PV) [1, 2]. У 2020 році загальна електроенергія, вироблена всіма сонячними панелями, становила близько 760 ГВт·год, що становить приблизно 3% від загальної світової електроенергії. При цьому загальна кількість сонячної енергії, яку Земля отримує від Сонця за рік, становить 174·10<sup>14</sup> ПВт·год, що свідчить про значні резерви можливості сонячної генерації [3, 4]. Сонячне світло перетворюється в електричний струм за допомогою фотоелектричного ефекту, який виникає в сонячних фотоелементах. Перший сонячний фотоелектричний елемент винайшов американський вчений Чарльз Фрітц ще в 1880 році. Перший промислово виготовлений сонячний елемент був розроблений в 1931 році німецьким інженером Бруто Ланге. Однак ККД такого сонячного елемента становив приблизно 1 %. З тих пір параметри сонячних батарей постійно вдосконалювалися. Сьогодні широко використовуються монокристалічні сонячні панелі, полікристалічні сонячні панелі та тонкоплівкові сонячні батареї. Найважливішими параметрами сонячних панелей є їх ефективність і вартість. Полікристалічні сонячні батареї мають ККД 15,5...18 %, а монокристалічні – 18,5–23,5 %. Однак монокристалічні сонячні панелі мають більш високу вартість, що пов'язано з тим, що в монокристалічних панелях використовується монокристалічний кремній з дуже високим ступенем очищення понад 99,99 % [5, 6]

Сьогодні деякі експериментальні зразки сонячних батарей мають ефективність вище 47 %. У 2013 році компанія Sharp створила тришаровий фотоелемент 4×4 мм з індій-галій-арсенідом з ККД 44,4 %. Ще один спосіб підвищення ККД сонячних панелей – використання додаткових лінз. Так, група фахівців з Інституту сонячних енергетичних систем Товариства Фраунгофера, компанії Soitec, SEA-Leti і Берлінського центру Гельмгольца створили сонячні панелі з використанням лінзи Френеля, фотоелемента з ККД 44,7 %.

У 2014 році Інститут систем сонячної енергії Фраунгофера створив сонячні батареї, в яких завдяки лінзі, що фокусує світло на дуже маленькому фотоелементі, ефективність становить 45 %. Тому ціни на такі сонячні батареї на порядок вищі. Перспективним напрямком є створення фотоелементів на основі наноантен, які працюють на пряме випромінювання струмів, індукованих в антені малих розмірів (близько 200...300 нм) частин світла (тобто електромагнітним випромінюванням частотою близько 500 ТГц). Наноантени не вимагають дорогої сировини для виробництва та мають потенційну ефективність до 85%. Але ця технологія ще не готова до серійного виробництва [7, 8].

**Метою статті** є розробка системи «сонячні панелі - гібридний сонячний інвертор - трифазна електрична мережа» та дослідження енергетичних процесів, що в ній протікають. Для досягнення мети були поставлені наступні завдання:

- розробити імітаційну модель системи вироблення електроенергії від сонячних панелей до

загальнопромислової мережі з використанням сонячного інвертора;

- досліджувати перехідні процеси в електричній мережі та сонячній панелі під час запуску перетворювача.

**Поліноміальна апроксимація енергетичних характеристик сонячних панелей.** Однією з найважливіших характеристик сонячних панелей є їх вольт-амперна характеристика, форма якої залежить від рівня сонячного випромінювання та температури. Для прикладу розглянемо вольт-амперну характеристику сонячної панелі Era-370W-24V-Mono (рис. 1).

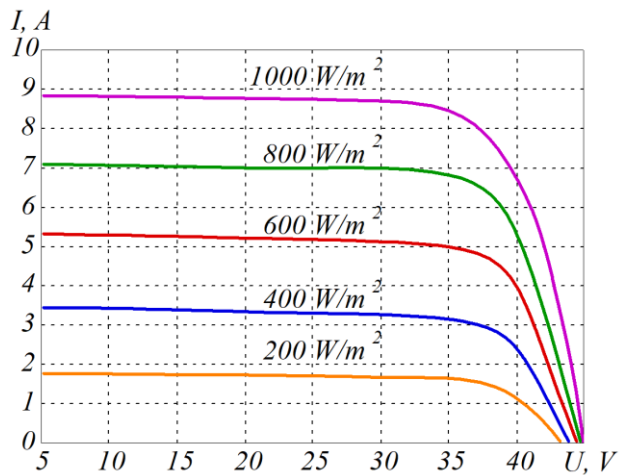


Рис. 1. Вольт-амперні характеристики сонячної панелі Era-370W-24V-Mono при різних рівнях сонячного випромінювання (при температурі навколишнього середовища 25 °C)

При цьому вольт-амперні характеристики сонячної батареї значною мірою залежать від температури панелі, а підвищення температури зменшує генеровану потужність (рис. 2).

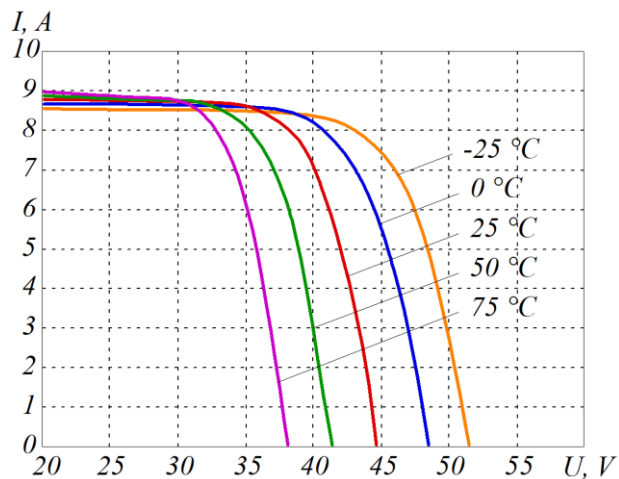


Рис. 2. Вольт-амперні характеристики сонячної панелі Era-370W-24V при різних температурах (при інтенсивності сонячного випромінювання 1000 Вт/м²)

На рис. 2 можна побачити, що коли сонячні батареї нагріваються, напруга та струм, а отже, і потужність, вироблена сонячною енергією, зменшуються. Отже, є сенс охолоджувати сонячні панелі. Таким чином,

зниження температури нагрітої сонячної панелі з 75 °C до -25 °C збільшить максимальну генеровану потужність приблизно на 35 %.

Коли струм, споживаний сонячною панеллю, змінюється, напруга сонячної панелі змінюється, і, отже, змінюється потужність, вироблена сонячною панеллю. При цьому залежність потужності сонячної батареї від споживаного струму представлена на рис. 3. Видно, що сонячна панель має точку генерації максимальної потужності, яка визначається певною величиною струму, який споживає сонячна панель. Таким чином, регулюючи величину струму, який споживає сонячна батарея, можна увійти в режим максимального вироблення електроенергії. Цей алгоритм отримав назву MPPT – відстеження точки максимальної потужності [9, 10]. Більшість традиційних алгоритмів MPPT засновані на концепції відстеження нахилу. Одним із типових методів відстеження нахилу є алгоритм Perturb and Observe (P&O). Недоліком цього методу є втрата генерованої потужності під час пошуку точки максимальної генерації електроенергії, яка може тривати значний час.

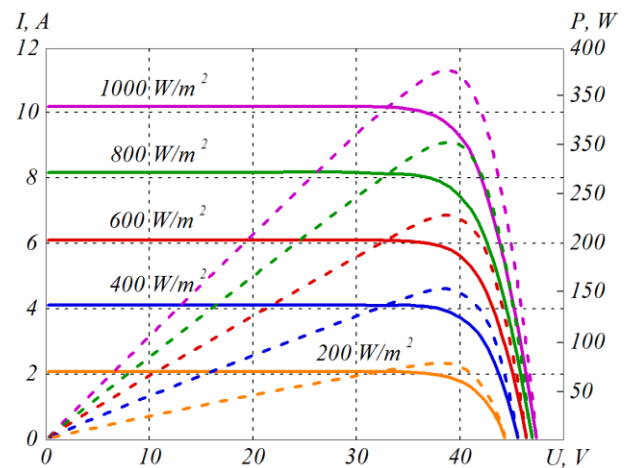


Рис. 3. Залежність максимальної потужності сонячної батареї як функція споживаного струму та рівня сонячної радіації

Визначити точку максимальної генерації електроенергії можна також шляхом точного розрахунку шляхом поліноміальної апроксимації вольт-амперних характеристик сонячної панелі та з використанням датчиків сонячної радіації та температури [11, 12].

Результати поліноміальної апроксимації сімейства вольт-амперних характеристик сонячної панелі Era-370W-24V-Mono при різних рівнях випромінювання сонця:

– при інтенсивності сонячного випромінювання 1000 Вт/м²:

$$i_{pv_{1000}}(u) = -44500 \cdot u^5 + 31375 \cdot u^4 - 7716 \cdot u^3 + 764.46 \cdot u^2 - 24.9 \cdot u + 18.2; \quad (1)$$

– при інтенсивності сонячного випромінювання 800 Вт/м²:

$$i_{pv_{800}}(u) = -46402 \cdot u^5 + 33583 \cdot u^4 - 8494 \cdot u^3 + 866.8 \cdot u^2 - 29.1 \cdot u + 14.7; \quad (2)$$

– при інтенсивності сонячного випромінювання 600 Вт/м<sup>2</sup>:

$$i_{pv\_600}(u) = -1980888 \cdot u^6 + 176912 \cdot u^5 - 60166 \cdot u^4 + 9587 \cdot u^3 - 698.9 \cdot u^2 + 18 \cdot u + 11; \quad (3)$$

– при інтенсивності сонячного випромінювання 400 Вт/м<sup>2</sup>:

$$i_{pv\_400}(u) = -209032 \cdot u^6 + 189327 \cdot u^5 - 64729 \cdot u^4 + 10272 \cdot u^3 - 739.4 \cdot u^2 + 18.68 \cdot u + 7.097. \quad (4)$$

Отримані поліноми дають змогу аналітично визначити точку генерації максимальної потужності сонячної панелі як функцію струму, споживаного гібридним інвертором. Таким чином, регулюючи струм сонячної панелі, можна отримати максимальну потужність, яка функціонально реалізується напівпровідниковим перетворювачем, який отримує живлення від сонячної панелі.

### Гібридний інвертор сонячної електростанції.

Перетворювачі, які називаються сонячними інверторами або гібридними інверторами, виконують функції відбору електричної енергії від сонячних панелей, що працюють в режимі максимального вироблення електроенергії, і забезпечують передачу електричної енергії в загальнопромислову електричну мережу (рис. 4) [13, 14].

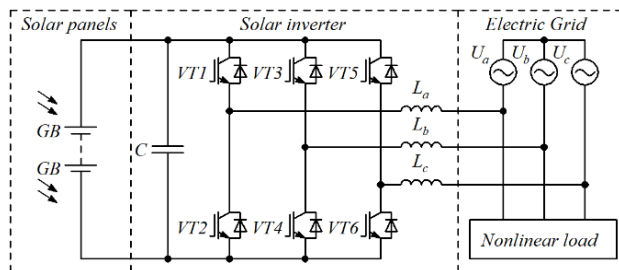


Рис. 4. Система виробництва електроенергії «сонячні панелі – сонячний інвертор – електрична мережа»

Генеруючі установки повинні бути підключені паралельно до розподільних мереж відповідно до вимог EN 50549-1, EN 50549-2 [15, 16].

Сонячний інвертор при виробленні електроенергії в електричну мережу може працювати як в режимі джерела напруги, так і в режимі джерела струму. При роботі в режимі джерела струму сонячний інвертор повинен працювати в режимі, аналогічному роботі силового активного фільтра з примусовим формуванням заданої форми і фази струму. При цьому режим генерації в режимі джерела струму має значні переваги, а саме:

- можливість роботи в режимі коефіцієнта потужності, близькому до одиниці;
- робота в режимі компенсації реактивної потужності;
- робота в режимі компенсації вищих гармонік струму, спричинених нелінійним та імпульсним навантаженням електричної мережі.

Водночас низький рівень вищих гармонік струмів в електричній мережі зумовлює зменшення додаткових втрат потужності в ній.

При цьому для роботи в режимі силового активного фільтра необхідною умовою стабільної роботи є

необхідність підтримки напруги на сонячних батареях вище амплітудного значення лінійної напруги електричної мережі [17, 18].

Для підтримки цієї умови необхідно підключити досить значну кількість сонячних панелей до сонячного інвертора. Коли напруга, що генерується сонячними батареями, нижча за амплітудне значення лінійної напруги мережі, то необхідно використовувати додаткові підвищувальні DC–DC перетворювачі між сонячними панелями та сонячним інвертором [19, 20]. Також можна використовувати DC-DC перетворювачі, що забезпечують гальванічну розв'язку між входом і виходом перетворювача. Це такі перетворювачі:

- зворотноходовий перетворювач;
- прямий конвертер;
- напівмостовий двотактний перетворювач;
- повний мостовий DC-DC перетворювач.

В доповнення до функції підвищення напруги від сонячних панелей, DC-DC перетворювачі також забезпечують функцію вилучення електроенергії від сонячної батареї до хімічних накопичувачів енергії, таких як кислотні, лужні або літій-іонні батареї, реалізовані напівпровідниковими перетворювачами.

Для реалізації функції відбору максимальної потужності від сонячної панелі в DC–DC перетворювачі необхідно забезпечити реалізацію коригування значення вхідного струму для відбору максимальної потужності від сонячної панелі [21, 22].

Для визначення параметрів інтенсивності потужності електричної енергії, яка генерується в сонячній панелі, а також реалізації режиму відбору максимальної напруги розроблено комп'ютерну імітаційну модель, що показано на рис. 5.

У моделі блок сонячних панелей складається з 500 сонячних панелей типу Soltech 1STH-215-P (модуль має 10 паралельних гілок сонячних панелей і 50 послідовних сонячних панелей у кожній гілці). Максимальний струм, який генерує блок сонячних панелей, становить 73,5 А. Максимальна потужність, яку генерує блок сонячних панелей, становить 1450 В. Максимальна потужність блоку з 500 сонячних панелей становить 106,57 кВт (при рівні сонячного випромінювання 1000 Вт /м<sup>2</sup>). і при температурі 25 °С).

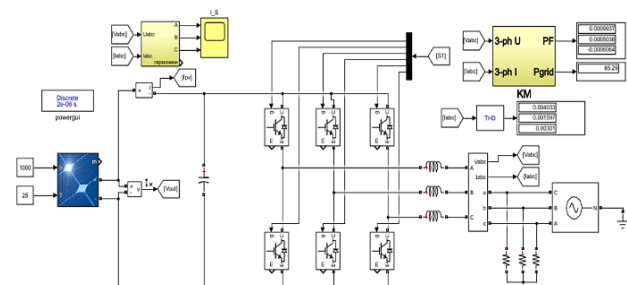


Рис. 5. Модель Matlab системи «сонячні панелі – сонячний інвертор – електрична мережа»

Основні параметри моделі силового активного фільтра Matlab наведені в таблиці 1.

Таблиця 1 - Основні параметри моделі Matlab

Параметр	Значення
Напруга мережі, В	220/380
Активний опір мережевого навантаження, Ом	5
Індуктивність мережі, мГн	0,1
Індуктивність індуктора гібридного фільтра, мГн	0,6
Ємність конденсатора гібридного інвертора, мФ	2
Частота ШІМ, кГц	1...10

Вольт-амперна характеристика набору з 500 сонячних панелей, змодельованих у моделі Matlab, показана на рис. 6.

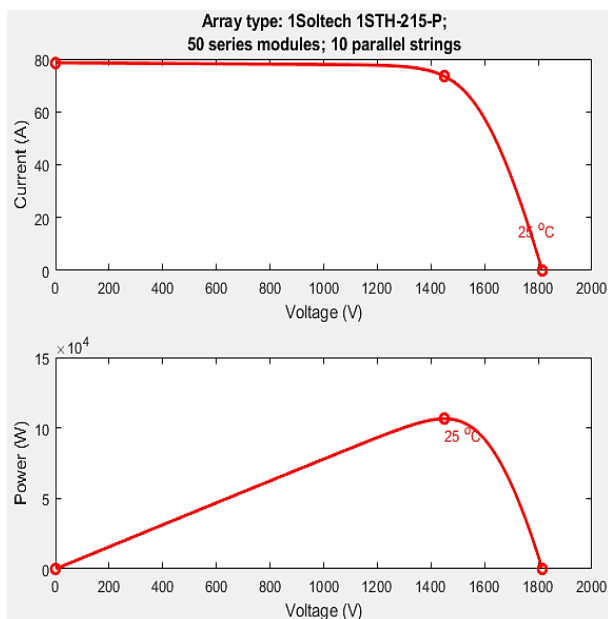


Рис. 6. Вольт-амперна характеристика та вольт-амперна характеристика набору з 500 сонячних панелей

Система керування гібридним інвертором реалізована на базі системи керування силовим активним фільтром з ШІМ керуванням з регульованою частотою модуляції від 1 кГц до 10 кГц. Структура реалізованої в моделі системи керування наведена на рис. 7.

Реалізація відбору максимальної потужності в гібридному інверторі реалізується шляхом керування фазним струмом сонячного інвертора шляхом встановлення коефіцієнта модуляції.

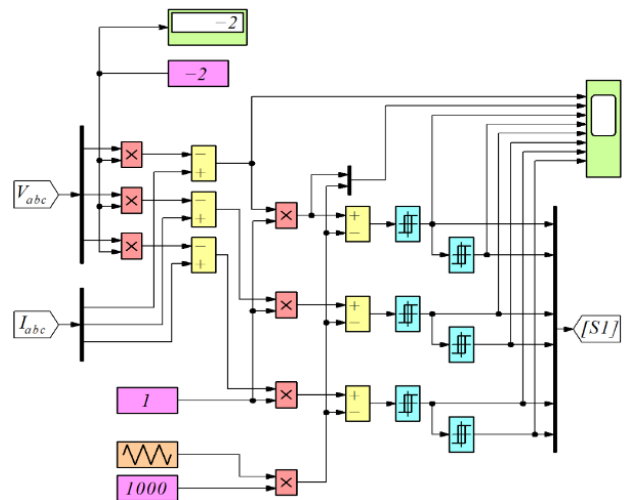


Рис. 7. Структура системи керування гібридним інвертором

Перехідні процеси струму, напруги та потужності сонячних панелей при запуску сонячного інвертора показано на рис. 8.

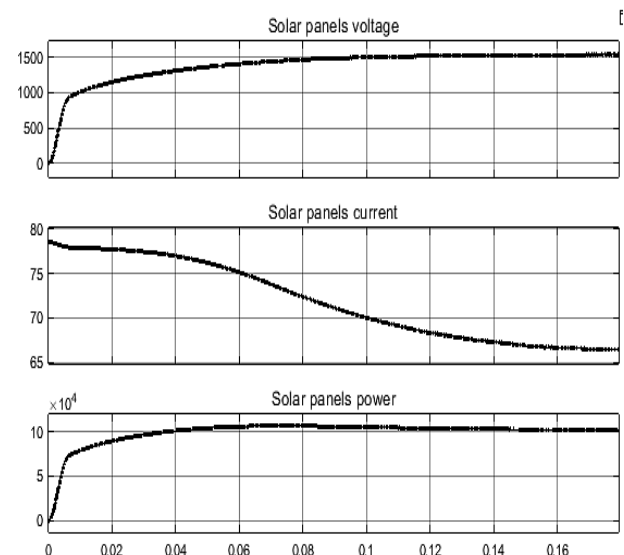


Рис. 8. Напруга, струм і потужність сонячної панелі, що постачається гібридним інвертором

Як видно з рис. 8, під час запуску напруга блоку сонячних панелей зростає від нуля.

Як відомо, умовою реалізації режиму корекції коефіцієнта потужності та формування синусоїдальної форми генерованого струму є напруга в ланці постійного струму сонячного інвертора вище амплітудного значення лінійної напруги мережа, в яку буде передаватися енергія від сонячних батарей. Тому для покращення режиму пуску сонячного інвертора доцільно виконувати пуск із попередньо зарядженим конденсатором інвертора до рівня більшого амплітудного значення лінійної напруги мережі (рис. 9).

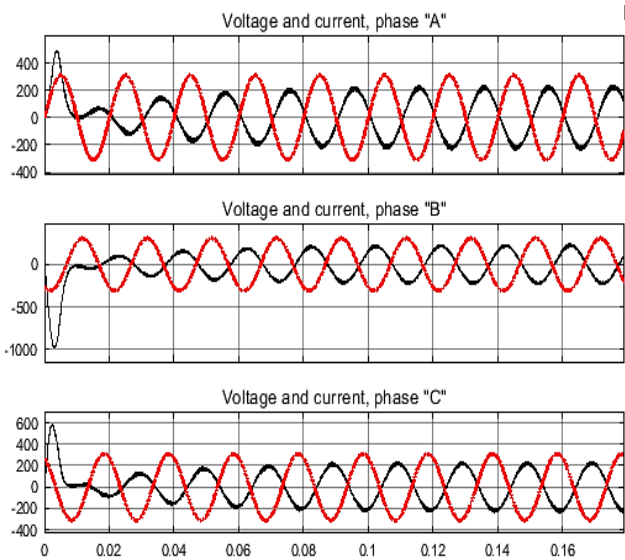


Рис. 9. Перехідний процес передачі електричної енергії від гібридного інвертора

Коефіцієнт потужності в режимі вироблення електроенергії в електричну мережу становить 0,991. Результати гармонійного аналізу форми струму від сонячного інвертора до електричної мережі наведено на рис. 10.

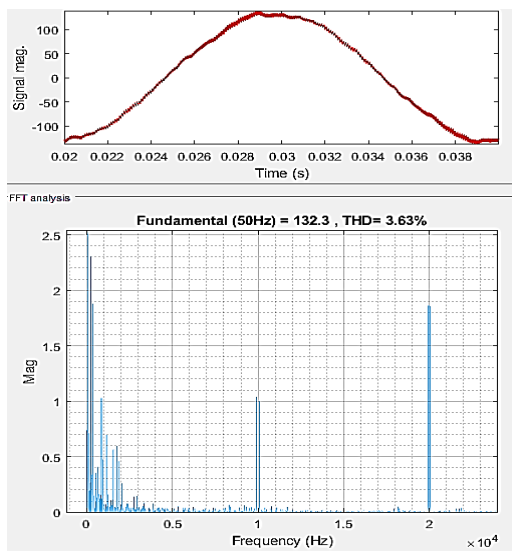


Рис. 10. Гармонічний аналіз форми струму, який генерує сонячний інвертор

Як видно з рис. 10, струм, що виділяється сонячним інвертором в електричну мережу, має коефіцієнт гармонійних спотворень 3,63 %, а амплітудне значення всіх гармонік у спектрі не перевищує 2,4 %, що відповідає вимогам міжнародних стандартів.

**Визначення втрат потужності гібридного сонячного інвертора.**

Для розрахунку ККД гібридного інвертора були взяті характеристики модуля IGBT CM1200DC-34S, Mitsubishi з номінальним струмом 1200 А та номінальною напругою 1700 В. Характеристики, для яких наведено розрахунок і які визначають втрати потужності, наведені на рис. 11.

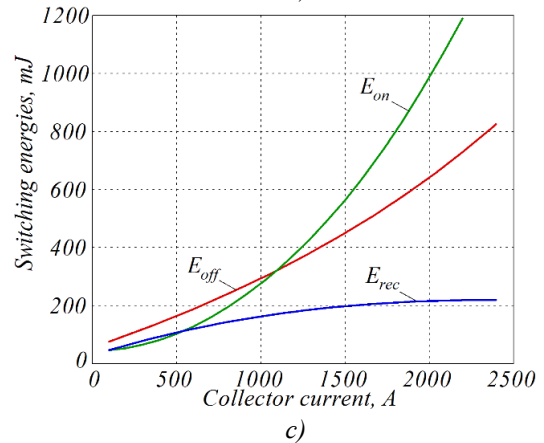
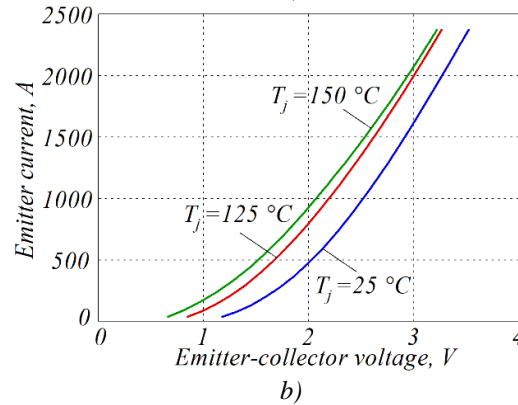
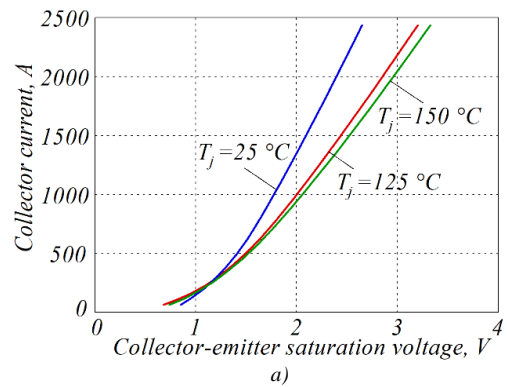


Рис. 11. Енергетичні характеристики модуля CM1200DC-34S: а – вольт-амперна характеристика транзистора; б – вольт-амперна характеристика зворотного діода; с – залежності енергії вмикання  $E_{on}$ , енергії вимикання  $E_{off}$  та енергії відновлення зворотного діода від комутованого струму  $E_{rec}$

Результати поліноміальної апроксимації енергетичних характеристик силових транзисторів при температурі 25 °C наведені в наступних виразах.

$$U_{ce}(I_c) = -0.162 \cdot I^4 + 0.942 \cdot I^3 - 2.009 \cdot I^2 + 2.746 \cdot I + 0.57; \tag{5}$$

$$U_{fw}(I_f) = -0.185 \cdot I^4 + 1.054 \cdot I^3 - 2.171 \cdot I^2 + 2.735 \cdot I + 0.68; \tag{6}$$

$$E_{on}(I_c) = 0.2406 \cdot I^2 - 0.006 \cdot I + 0.0496; \tag{7}$$

$$E_{off}(I_c) = 0.0587 \cdot I^2 + 0.1842 \cdot I + 0.0547; \tag{8}$$



$$E_{rec}(I_f) = 0.0054 \cdot I^5 - 0.0368 \cdot I^4 + 0.1002 \cdot I^3 - 0.1601 \cdot I^2 + 0.2309 \cdot I + 0.0227. \quad (9)$$

При використанні розробленого алгоритму визначено втрати потужності, а також якість реалізованого струму при встановленні різних частот модуляції.

Розрахунок, проведений під час моделювання, визначив залежність величини втрат потужності в одному ключі живлення інвертора як функцію частоти ШІМ на рис. 12.

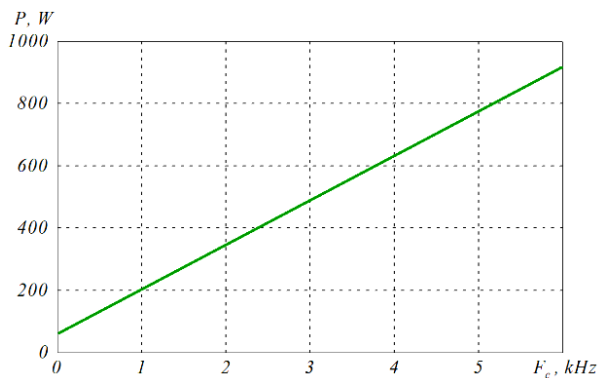


Рис. 12. Залежність сумарних втрат потужності в силовому транзисторі CM1200DC-34S від частоти комутації

Залежність втрат потужності в силовому транзисторі CM1200DC-34S від частоти ШІМ при напрузі ланки постійного струму 1500 В і амплітуді струму 223 А (максимальна точка потужності сонячних батарей).

Таким чином, ККД гібридного інвертора при передачі електроенергії від сонячних панелей до електричної мережі становив від 98,4 % при частоті ШІМ 1 кГц до 92,7 % при частоті ШІМ 6 кГц.

**Висновки.** У статті показано, що потужність, яка генерується сонячними панелями, має точку максимуму, яка залежить від величини струму, споживаного сонячною панеллю. Визначено схемні рішення напівпровідникових перетворювачів, що забезпечують максимальні режими відбору електроенергії від сонячних панелей та передачу електроенергії в загальнопромислові електричні мережі з високими параметрами якості.

Розроблена комп'ютерна імітаційна модель системи генерації електроенергії від сонячних панелей типу Soltech 1STH-215-P до загальнопромислової мережі з використанням сонячного інвертора з ШІМ-системою керування, що дозволяє передавати електричну енергію з коефіцієнтом потужності, близьким до одиниці (0,98) з низьким рівнем вищих гармонік (сумарні гармонійні спотворення 3,36 %).

Модель також досліджує перехідні процеси в електричній мережі та сонячній панелі під час запуску перетворювача. Дано рекомендації щодо запуску сонячного інвертора з попередньо зарядженим конденсатором, що дозволить підвищити якість струму в режимі пуску.

**Підтримка виконання роботи.** Стаття підготовлена в рамках підтримки гранту молодих учених України «Розробка наукових основ підвищення

енергоефективності та якості електроенергії в електричних мережах» (номер державної реєстрації 0121U109440).

## References

- Sylvester A and Olusanya O 2020 Electricity Generation from Renewable Resources *Affordable and Clean Energy* pp 1–13 URL [https://doi.org/10.1007/978-3-319-71057-0\\_137-1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-71057-0_137-1)
- Ghandriz Y, Ziaiean Noorbakhsh S, Gavagsaz-Ghoachani R and Phattanasak M 2021 Effect of wide observation of nature in renewable energy engineering education 2021 *Research, Invention, and Innovation Congress: Innovation Electricals and Electronics (RI2C)* pp 193–198 URL <https://doi.org/10.1109/RI2C51727.2021.9559741>
- Geisz J F, France R M, Schulte K L, Steiner M A, Norman A G, Guthrey H L, Young M R, Song T and Moriarty T 2020 Six-junction III–V solar cells with 47.1 % conversion efficiency under 143 Suns concentration *Nature Energy* 5 (4) pp 326–335 URL <https://doi.org/10.1038/s41560-020-0598-5>
- Shubham G, Hrishikesh M, Asiya P, Aditya M, Sangram D, Aditya B, Mandar J and Aves H 2021 A Review on Space Based Solar Power *Journal of Thermal Energy Systems* 6 pp 16–24 URL <https://doi.org/10.46610/JoTES.2021.v06i01.003>
- Sugianto S 2020 Comparative Analysis of Solar Cell Efficiency between Monocrystalline and Polycrystalline *INTEK: Jurnal Penelitian* 7 92 URL <https://doi.org/10.31963/intek.v7i2.2625>
- Tan N, Wei J, Jian Nan W and Guiping C 2017 Experimental study of efficiency of solar panel by phase change material cooling *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 217 012011, 2017. URL <https://doi.org/10.1088/1757-899X/217/1/012011>
- Pinheiro Caetano IM, Torres JP and Marques Lameirinhas R A 2021 Simulation of Solar Cells with Integration of Optical Nanoantennas *Nanomaterials* 11 2911 URL <https://doi.org/10.3390/nano11112911>
- Rabienjihad M, Davoudi-Darareh M and Mazaheri A 2021 Design and optimization of a nano-antenna hybrid structure for solar energy harvesting application *Chinese Physics B* 30 098503 URL <https://doi.org/10.1088/1674-1056/abea8e>
- Chitransh A and Kumar S 2021 The Different Type of MPPT Techniques for Photovoltaic System *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences* 1 (2) pp 1–4 URL <https://doi.org/10.35940/ijec.A1809.111221>
- Ryu D, Kim Y and Kim H 2018 Optimum MPPT Control Period for Actual Insolation Condition 2018 *IEEE International Telecommunications Energy Conference (INTELEC)* pp 1–4 URL <https://doi.org/10.1109/intelec.2018.8612419>
- Louzazni M and Al-Dahidi S Approximation of Photovoltaic Characteristics Curves Using Bezier Curve *Renewable Energy* 174 pp 715–732 URL <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.04.103>
- Nerubatskiy V, Plakhtii O and Hordiienko D 2022 Efficiency analysis of DC–DC converter with pulse-width and pulse-frequency modulation 2022 *IEEE 41st International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)* pp 571–575 URL <https://doi.org/10.1109/ELNANO54667.2022.9926762>
- Choi W, Jung K and Sarlioglu B 2020 Power Control of Hybrid Grid-Connected Inverter to Improve Power Quality 2020 *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)* pp 3741–3745 URL <https://doi.org/10.1109/ECCE44975.2020.9235627>
- Imdadullah, Alamri B, Hossain M A and Asghar M S 2021 Electric Power Network Interconnection: A Review on Current Status Future Prospects and Research Direction. *Electronics* 10 2179 URL <https://doi.org/10.3390/electronics10172179>
- Requirements for Generating Plants to be Connected in Parallel With distribution Networks. Part 1: Connection to a LV Distribution Network. Generating Plants up to and Including Type B, Standard SFS-EN 50549-1:2019, Eur. Committee for Electrotechnical Standardization, Brussels, Belgium, Feb. 2019, pp. 1–71.
- Requirements for Generating Plants to be Connected in Parallel With distribution Networks. Part 2: Connection to a MV Distribution Network. Generating Plants up to and Including Type B, Standard SFS-EN 50549-2:2019, Eur. Committee Electrotechnical Standardization, Brussels, Belgium, Feb. 2019, pp. 1–80
- Nerubatskiy V, Plakhtii O and Hordiienko D 2021 Control and accounting of parameters of electricity consumption in distribution networks 2021 *XXXI International Scientific Symposium Metrology and Metrology Assurance (MMA)* pp 114–117 URL

- <https://doi.org/10.1109/MMA52675.2021.9610907>
18. O. Plakhtii, V. Nerubatskyi, A. Mashura, D. Hordiienko, H. Kho-ruzhevskiy, Improving energy indicators of the charging station for electric vehicles based on a three-level active rectifier. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Vol. 3/8 (105) 2020. P.46 – 55.
  19. Soedibyo, Syahputra R, Ashari M, Budi A L, Anam S and Soeprijanto A 2020 Photovoltaic Voltage and Power Cell Characteristics Based on Air Quality Index and Pollution Percentage Level 2020 1st International Conference on Information Technology, *Advanced Mechanical and Electrical Engineering (ICITAMEE)* pp 117–121 URL <https://doi.org/10.1109/ICITAMEE50454.2020.9398467>
  20. Devie S R, Alagammal S and Prabha N R 2017 Efficient single switch isolated high step up DC-DC converter with constant output voltage for solar energy sources 2017 IEEE International Conference on Intelligent Techniques in Control, Optimization and Signal Processing (INCOS) pp 1–6 URL <https://doi.org/10.1109/ITCOSP.2017.8303150>
  21. Kaci L, Arab D A, Zirmi R, Semaoui S and Boulahchiche S 2021 Solar inverter performance prediction 2020 6th International Symposium on New and Renewable Energy (SIENR) pp 1–5 URL <https://doi.org/10.1109/SIENR50924.2021.9631900>
  22. Plakhtii O., Ananieva O., Zinchenko O. Analysis of the Smart Grid concept for DC power supply systems. International scientific journal «INDUSTRY 4.0». 2019. Vol. 4, Issue 4. P. 179–182.
  23. Lahooti Eshkevari A, Mosallanejad A and Sepasian M 2021 Design, analysis, and implementation of a new high-gain P-type step-up dc/dc converter with continuous input current and common ground IET Power Electronics 14 (1) pp 225–238 URL <https://doi.org/10.1049/pel2.12027>
  24. Sakib S and Siddique M A 2019 Modeling and Simulation of Solar Photovoltaic Cell for the Generation of Electricity in UAE 2019 5th International Conference on Advances in Electrical Engineering (ICAEE) pp 66–71 URL <https://doi.org/10.1109/ICAEE48663.2019.8975490>
  25. O. Plakhtii, V. Nerubatskyi, N. Karpenko, O. Ananieva, H. Kho-ruzhevskiy, V. Kavun, Studying a voltage stabilization algorithm in the cells of a modular six-level inverter. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2019. Vol. 6, No. 8 (102). P. 19–27. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.185404>
  26. Chaudhary, S. K., Deepak, S., Kumar, P., Tripathi, R., Dixit, N. K., & Srivastava, A. (2021). Maximizing the Conversion Efficiency of Smart Solar Inverter. 2021 International Conference on Advance Computing and Innovative Technologies in Engineering (ICACITE). doi:10.1109/icacite51222.2021.9404597

Надійшла (received) 10.09.2023

*Відомості про авторів / About the authors*

**Плахтій Олександр Андрійович (Plakhtii Oleksandr Andriyovich)** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри промислової та біомедичної електроніки, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1535-8991>; e-mail: [a.plakhtiy1989@gmail.com](mailto:a.plakhtiy1989@gmail.com)

**Хоменко Ігор Васильович (Homenko Igor Vasiliovich)** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри передачі електричної енергії, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5141-5391>; e-mail: [igor.v.khomenko@gmail.com](mailto:igor.v.khomenko@gmail.com)

**Шелест Дмитро Андрійович (Shelest Dmytro Andriyovich)** – аспірант, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри передачі електричної енергії, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6095-658X>; e-mail: [shelllogist@gmail.com](mailto:shelllogist@gmail.com)

**Синявський Андрій Владиславович (Syniavskiy Andrii Vladyslavovych)** – аспірант, Український державний університет залізничного транспорту, «УкрДУЗТ» аспірант кафедри «Транспортний зв'язок» м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9588-6737>; e-mail: [andreivladislavovich10@gmail.com](mailto:andreivladislavovich10@gmail.com)