

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-349-63>

УДК 621.3

**ГОЛЯКА РОМАН**

Національний університет «Львівська політехніка»

<https://orcid.org/0000-0002-7720-0372>

e-mail: [roman.l.holiaka@lpnu.ua](mailto:roman.l.holiaka@lpnu.ua)

**ХІЛЬЧУК МИКОЛА**

Національний університет «Львівська політехніка»

<https://orcid.org/0009-0002-4445-236X>

e-mail: [mykola.o.khilchuk@lpnu.ua](mailto:mykola.o.khilchuk@lpnu.ua)

**КУХТА РОМАН**

Національний університет «Львівська політехніка»

<https://orcid.org/0009-0003-2060-4004>

e-mail: [roman.a.kukhta@lpnu.ua](mailto:roman.a.kukhta@lpnu.ua)

**ГАЛУШКА ЄВГЕН**

Національний університет «Львівська політехніка»

<https://orcid.org/0009-0001-5137-2213>

e-mail: [yevhen.o.halushka@lpnu.ua](mailto:yevhen.o.halushka@lpnu.ua)

## ОПТИМІЗАЦІЯ ТА МОДЕЛЬ ФОТОВОЛЬТАІЧНОГО ЖИВЛЕННЯ З ВРАХУВАННЯМ ВТРАТ ЕНЕРГІЇ

*Розглядаються режими керування фотовольтаїчних систем живлення, які розвивають метод відстеження точки максимальної потужності MPPT з врахуванням реальних параметрів конвертерів, зокрема приймаючи до уваги наявні в них енергетичні втрати. Науковою новизною запропонованих в роботі рішень є оптимізація режимів навантаження фотовольтаїчного джерела з врахуванням втрат енергії в MPPT конвертерах. Особливо такий аналіз є необхідним при розробленні вбудованих систем малопотужних пристроїв електроніки, зокрема в концепції Інтернету речей IoT (Internet of Things). Враховуючи, що більшість задач параметрично аналізу електронних схем проводять з використанням SPICE моделей, в даній роботі розроблено SPICE модель перетворення енергії фотовольтаїчного джерела. Запропонована модель дає можливість оперативно експрес аналізу залежності енергетичної ефективності джерел живлення від втрат енергії в MPPT конвертерах та проведення корекції режиму відбору максимальної енергії.*

*Ключові слова: фотовольтаїка, конвертер, контролер, SPICE модель.*

**HOLIAKA ROMAN, KHILCHUK MYKOLA, KUKHTA ROMAN, HALUSHKA YEVHEN**

Lviv Polytechnic National University

## PHOTOVOLTAIC POWER SUPPLY OPTIMIZATION AND MODEL WITH ENERGY LOSSES CONSIDERATION

*The use of alternative power sources is one of the defining factors in the development of modern energy systems. The most efficient and advanced sources at present are energy generation systems based on photovoltaics. In addition to photovoltaic semiconductor components that primary convert light energy into electric current, secondary energy converters play a crucial role in photovoltaic systems. These converters manage the load circuits using pulse-based switching methods, relying on specialized controllers. The main method for optimizing the load of photovoltaic components is Maximum Power Point Tracking (MPPT). To implement the MPPT method, specialized control algorithms, controllers, and buck or boost converters are used.*

*This work examines control modes for photovoltaic power systems that extend the MPPT method, taking into account the actual parameters of the converters, particularly the energy losses inherent to them. The scientific novelty of the proposed solutions lies in the optimization of the operating modes of photovoltaic sources, considering energy losses in MPPT converters. Using the example of the LT3495 boost converter, it is demonstrated that the energy efficiency of the converter significantly depends on the load current. Therefore, it is necessary to analyze the impact of load modes on energy losses in converters. Such an analysis is especially crucial when developing embedded systems for low-power electronic devices, particularly within the Internet of Things concept. Given that most parametric analyses of electronic circuits are conducted using SPICE models, this work develops a SPICE model for energy conversion in photovoltaic sources. The proposed model enables express analysis of the dependence of the power supply's energy efficiency on energy losses in MPPT converters and allows for adjustments in the energy extraction mode to maximize efficiency.*

*Key words: photovoltaics, converter, controller, SPICE model.*

### Постановка проблеми

Використання альтернативних джерел живлення є одним з визначальних факторів розвитку сучасної енергетики. Найбільш ефективними та розвиненими на даний час є джерела генерування енергії на основі фотовольтаїки (Photovoltaics). Крім, властиво, фотовольтаїчних напівпровідникових компонентів перетворення світлової енергії в електричний струм, важливу роль в системах фотовольтаїки відіграють конвертери електричної енергії. Такі конвертери забезпечують керуванням кола навантаження. Керування здійснюють імпульсними методами комутації кіл навантаження з використанням спеціалізованих контролерів. Основним методом оптимізації навантаження фотовольтаїчних компонентів є відстеження (трекінг) точки максимальної потужності MPPT (Maximum Power Point Tracking). В даній роботі розглядаються режими керування фотовольтаїчних систем живлення, які розвивають MPPT метод з врахуванням реальних параметрів конвертерів, зокрема приймаючи до уваги наявні в них енергетичні втрати.

### Аналіз літературних джерел

Проблематика фотовольтаїчних систем живлення представлена сучасними науковими публікаціями, зокрема: силова електроніка: передові технології для інтеграції відновлюваної енергії [1], стратегія компенсації реактивної потужності та оптимізації для мережових інтерактивних каскадних фотоелектронних систем [2], аналіз якості фотоелектронної системи з використанням описової статистики індексу потужності [3], аналіз інерційних характеристик фотоелектронної системи генерації електроенергії на основі узагальненого контролю втрат [4], багаторежимний гнучкий алгоритм відстеження точки живлення для фотоелектронних електростанцій [5], стратегія оптимізації, що використовується для відновлення з використанням систем накопичення енергії на фотоелектронних батареях [6], оптимізований фракційний нелінійний синергетичний контролер для відстеження максимальної потужності фотоелектронної матриці за різкої зміни освітленості [7], покращений алгоритм постійної генерації електроенергії для фотоелектронних систем [8].

Оптимізація режимів фотовольтаїчного живлення базується на методі відстеження точки максимальної потужності MPPT. Існує декілька алгоритмів відстеження точки максимальної потужності. Ці алгоритми базуються, зокрема, на методі прямого контролю (Direct Control), методі найбільшого градієнта (Perturb and Observe, P&O) та методі інкрементальної провідності (Incremental Conductance) [9 - 13]. Відповідно до тенденцій розвитку сучасних інформаційних технологій розвиваються методи відстеження точки максимальної потужності з використанням штучного інтелекту.

**Метою роботи є:** подальший розвиток методу відстеження точки максимальної потужності MPPT. Науковою новизною запропонованих в роботі рішень є оптимізація режимів навантаження фотовольтаїчного джерела з врахуванням втрат енергії в MPPT конвертерах. Розроблено SPICE модель тракту перетворення енергії, що дає можливість проводити параметричний аналіз електронних схем MPPT контролерів.

### Виклад основного матеріалу

Для реалізації методу MPPT використовують спеціальні алгоритми керування, контролери та DC-DC конвертери понижувального (Buck) чи підвищувального (Boost) типів. Основними режимами функціонування DC-DC конвертерів є широтно-імпульсна PWM (Pulse Width Modulation) та релейна модуляція. У першому варіанті частота перемикання підтримується фіксованою, а для необхідної зміни коефіцієнта передачі модулюється ширина імпульсів. У другому варіанті робоча частота перемикання змінна та залежить від навантаження.

Зокрема, на рис. 1 наведено коротку інформацію про boost конвертер LT3495 компанії Linear Technology (Analog Devices) [14]. Зліва представлено схему застосування конвертера, а справа – залежність енергетичної ефективності (Efficiency) та втрат потужності (Power loss) в залежності від струму навантаження. Можна бачити що енергетична ефективність конвертера суттєво залежить від струму навантаження. Зокрема, при струмі 100 мА ефективність знаходиться на рівні 80 – 85 %, а при зменшенні струму до 1 мА ефективність спадає до 75 – 8 %. При подальшому зменшенні струму навантаження до 0,1 мА ефективність спадає до 40 – 45 %.

Відтак, необхідно проводити аналіз впливу режимів навантаження на втрати енергії в DC-DC конвертерах. Особливо такий аналіз є необхідним при розробленні вбудованих систем малопотужних пристроїв електроніки, зокрема в концепції Інтернету речей IoT (Internet of Things). В розвиток методу MPPT проведемо аналіз впливу неідеальності подальшого перетворення (коефіцієнту перетворення  $K_p$ ) потужності фотовольтаїчного джерела живлення на робочу точку оптимального відбору енергії. Проведення такого аналізу забезпечує можливість підвищити ефективність фотовольтаїчного живлення з врахуванням втрат в DC-DC конвертерах.

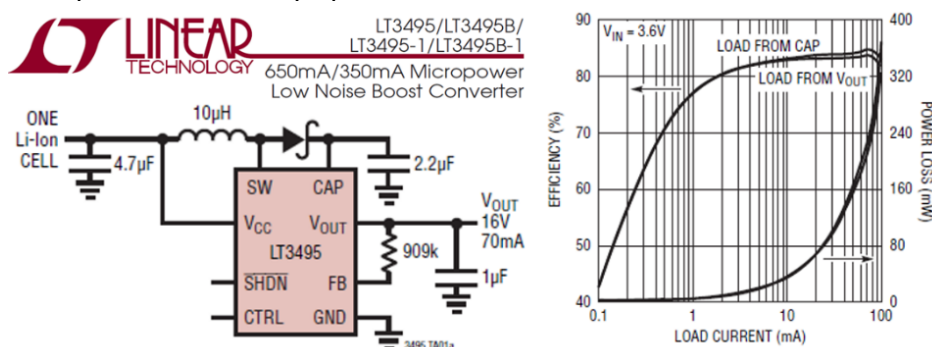


Рис. 1. Схема використання та енергетична характеристика конвертера LT3495 [14]

Умовне представлення вхідного та вихідного кіл конвертера фотовольтаїчного джерела живлення (Photovoltaic DC-DC Converter) наведено на рис. 2. Параметри фотовольтаїчного джерела живлення (збірки фотодіодів, фотовольтаїчної панелі) представлено джерелом  $E_{PH}$ , яке описується напругою  $V_{PH0}$  «холостого ходу» (при відсутності впливу кола навантаження) та резистором  $R_p$ , опір якого характеризує падіння напруги  $V_{INP}$  при струмі навантаження  $I_{PHD}$ . Вихідна напруга  $V_{OUT}$  вихідного кола DC-DC перетворювача TR визначається вимогою до джерел живлення сенсорного пристрою, а

струм навантаження  $I_{OUT}$  – його енергоспоживання. Коефіцієнту перетворення  $K_P$  потужності фотовольтаїчного джерела без врахування втрат рівний одиниці.

**Photovoltaic DC/DC Converter**

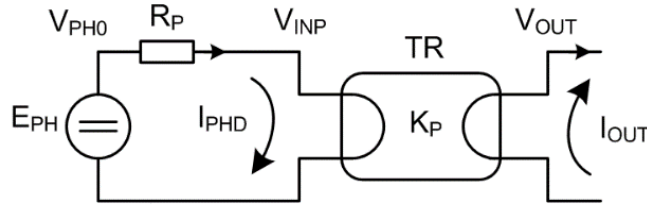


Рис. 2. Спрощена модель конвертера фотовольтаїчного джерела живлення

Розглянемо задачу оптимізації фотовольтаїчного живлення на основі трекінгу точки максимальної потужності MPPT з врахуванням реальних параметрів перетворювача TR при  $K_P < 1$ . Так, потужність вихідного кола  $P_{OUT}$  є меншою за потужність вхідного кола  $P_{INP}$ :

$$P_{OUT} = V_{OUT} \cdot I_{OUT}, \tag{1}$$

$$P_{OUT} = P_{INP} \cdot K_P, \tag{2}$$

$$P_{INP} = V_{INP} \cdot I_{PHD}, \tag{3}$$

де  $V_{INP} = V_{PHO} - I_{PHD} \cdot R_P$ . (4)

Далі, провівши відповідні перетворення виразу:

$$P_{INP} = (V_{PHO} - I_{PHD} \cdot R_P) \cdot I_{PHD} = V_{PHO} \cdot I_{PHD} - I_{PHD}^2 \cdot R_P \tag{5}$$

та ввівши параметри втрат, що в першому наближенні можуть бути представленими відповідними лінійними залежностями від струму  $I_{PHD}$  (коефіцієнт  $K_I$ ), різниці напруг  $\Delta V = |V_{OUT} - V_{INP}|$  (коефіцієнт  $K_V$ ) та «фоновими» (незалежними від режимів роботи) втратами (коефіцієнт  $K_0$ )

$$K_P = 1 - K_I \cdot I_{PHD} - K_V \cdot \Delta V - K_0, \tag{6}$$

отримуємо:

$$P_{OUT} = (V_{PHO} \cdot I_{PHD} - I_{PHD}^2 \cdot R_P) \cdot (1 - K_I \cdot I_{PHD} - K_V \cdot \Delta V - K_0). \tag{7}$$

Для визначення оптимальної точки відбору енергії проведемо диференціювання функції вихідної потужності  $P_{OUT}$  за аргументом  $I_{PHD}$

$$\frac{dP_{OUT}}{dI_{PHD}} = (V_{PHO} - 2I_{PHD} \cdot R_P) \cdot (1 - K_I \cdot I_{PHD} - K_V \cdot \Delta V - K_0) - \tag{7}$$

$$-(V_{PHO} \cdot I_{PHD} - I_{PHD}^2 \cdot R_P) \cdot K_I. \tag{8}$$

Екстремум функції має місце при

$$\frac{dP_{OUT}}{dI_{PHD}} = 0, \tag{9}$$

що при умовах «ідеальності»  $K_I = 0$ ;  $K_V = 0$ ;  $K_0 = 0$

$$\frac{dP_{OUT}}{dI_{PHD}} = V_{PHO} - 2I_{PHD} \cdot R_P = 0, \tag{10}$$

$$I_{PHD} = \frac{V_{PHO}}{2R_P}. \tag{11}$$

В реальних умовах необхідно враховувати вплив вищезгаданих коефіцієнтів  $K_I$ ,  $K_V$  та  $K_0$ . Відтак, у відповідності до поставленої задачі, по-перше, розглянемо приклади впливу цих коефіцієнтів на точку оптимального відбору енергії, і, по-друге, розробимо еквівалентну схему SPICE моделі, що надає можливість проведення такої оптимізації. Характерні приклади розрахунків залежності вихідної потужності  $P_{OUT}$  від струму  $I_{PHD}$  фотовольтаїчного джерела для наборів параметрів конвертера наведені на рис. 3 – рис. 5.

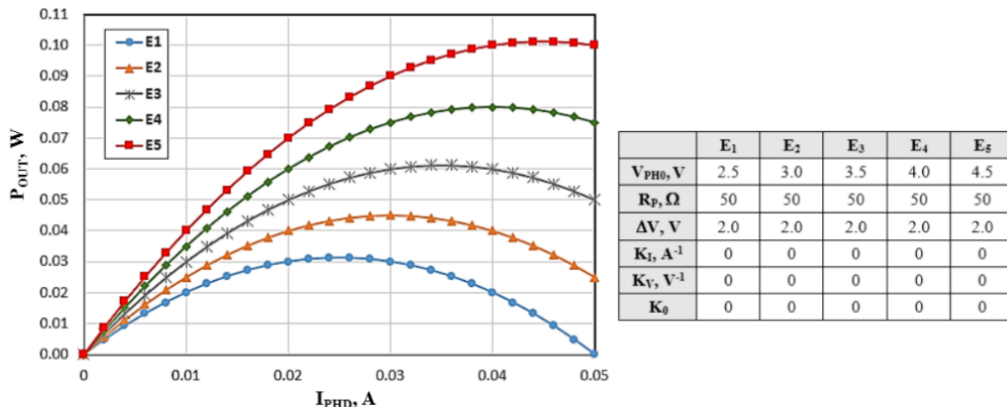


Рис. 3. Залежності вихідної потужності  $P_{OUT}$  від струму  $I_{PHD}$  (Case P1)

Як це було показано, використання методу трекінгу точки максимальної енергії MPPT необхідно проводити з врахуванням реальних параметрів DC-DC перетворювача напруги живлення фотовольтаїчного джерела енергії, тобто при  $K_P < 1$ . Враховуючи, що більшість задач параметрично аналізу електронних схем проводять з використанням SPICE моделей [15], в даній роботі розроблено SPICE модель перетворення енергії фотовольтаїчного джерела. Критерієм ефективності запропонованої моделі є можливість оперативного розрахунку (експрес аналізу) режимів оптимального відбору енергії фотовольтаїчного джерела при наперед заданих значеннях коефіцієнтів  $K_I$ ,  $K_V$ ,  $K_0$ .

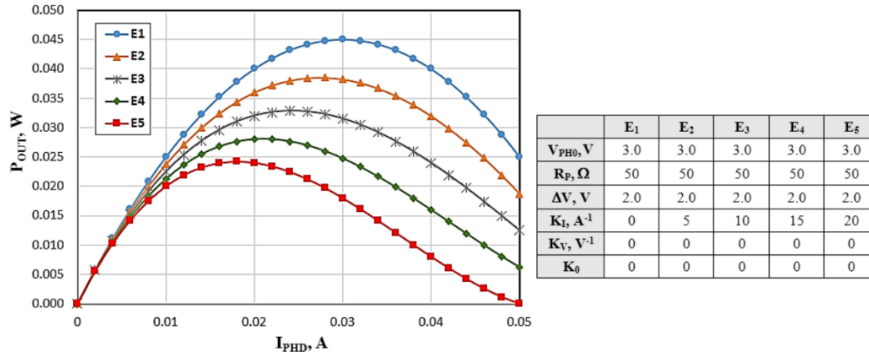


Рис. 4. Залежності вихідної потужності  $P_{OUT}$  від струму  $I_{PHD}$  (Case P3)

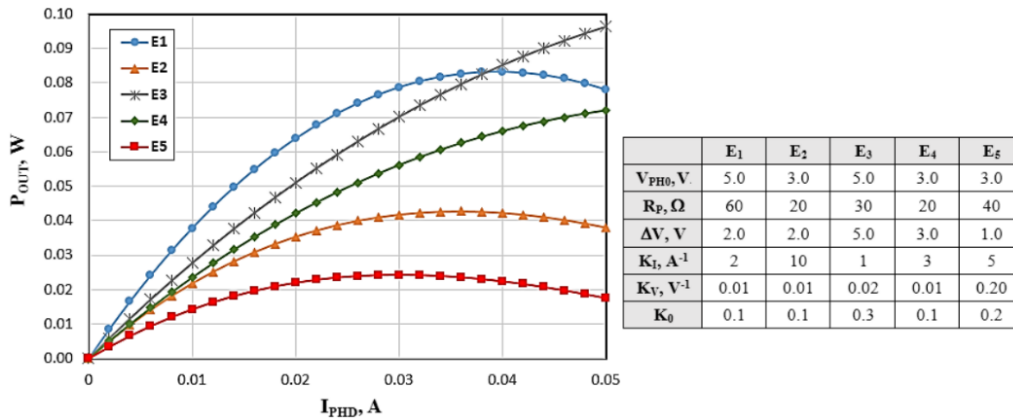


Рис. 5. Залежності вихідної потужності  $P_{OUT}$  від струму  $I_{PHD}$  (Case P4)

Модель M1 синтезуємо з використанням: джерела напруги  $V_{ph}$ , що специфікує напругу «холостого ходу» фотовольтаїчного джерела енергії, резистора  $R_p$ , що специфікує внутрішній (паразитний) опір вищезгаданого джерела, джерела напруги  $V_{out}$ , що специфікує вихідну напругу DC-DC перетворювача, та двох взаємозв'язаних джерел струму – універсального джерела струму  $I_{out}$  та функціонального джерела струму формального типу  $G_{in}$  (NF) – Function Source Formula type current (рис. 6, рис. 7, а).

Необхідно відзначити, що при певних варіантах специфікації компонентів такої SPICE моделі спостерігаються проблеми зриву процесу розрахунку (рис. 7, б). В процесі таких зривів втрачається неперервність функцій, що завершується переходом від DC аналізу до Pseudo-Transient аналізу. Відтак, в процесі синтезу моделі необхідно враховувати відсутність критичних зворотних зав'язків, які б могли призвести до некоректних результатів модельного дослідження.

### Function Source - Formula type current

Schematic format:

**PART attribute:**  
 <name>  
 This attribute defines the part name.

Examples:  
 Funct1  
 NF11

**VALUE attribute:**  
 <formula>  
 This attribute defines the nonlinear function [expression](#).

Examples:  
 $U_0 \cdot Cox \cdot Wid / Len \cdot ((V_{gs1} - V_{T1}) - (V_{ds1} / 2)) \cdot V_{ds1} \cdot (1 + Lam \cdot V_{ds1})$   
 $1.5 + 2 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot 1E6 \cdot t) + 25 \cdot I_B(Q1)$

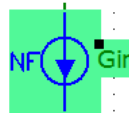


Рис. 6. Синтаксис джерела струму G (NF)

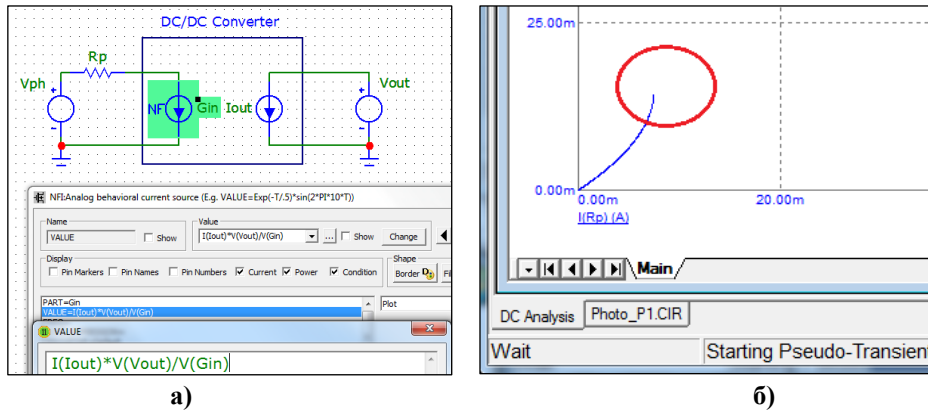


Рис. 7. Приклад специфікації моделі M1 (а) та демонстрація проблеми зриву процесу розрахунку цієї моделі (б)

Для підвищення ефективності використання розробленої моделі процесу перетворення енергії фотovoltaїчного джерела живлення доцільно використовувати метод формальної аналогії. Її суть полягає в описі фізичних величин чи коефіцієнтів функцій певними параметрами компонентів електричних кіл. При цьому фізична суть процесів чи розмірність величин значення не мають – мова йде лише про кількісні значення параметрів тих чи інших компонентів. Зокрема, в модель M2 вводимо резистори RK0, RKI, RKV, значення опорів яких представляють відповідні коефіцієнти  $K_I$ ,  $K_V$ ,  $K_0$ . Також, доцільно ввести проміжні компоненти, специфікація яких відображає певний фрагмент складної функціональної залежності. Приклади використання таких компонентів та специфікації джерел струму формульного типу GKP та Gout моделі наведені на рис. 8 та рис. 9.

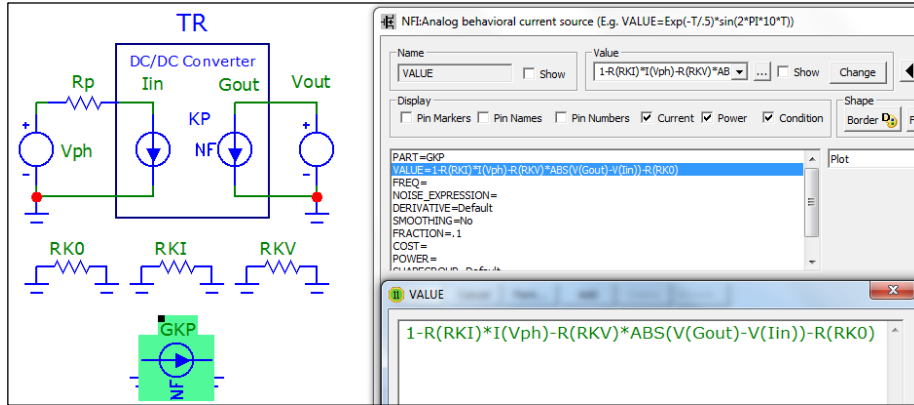


Рис. 8. Приклад специфікації джерела GKP моделі M2

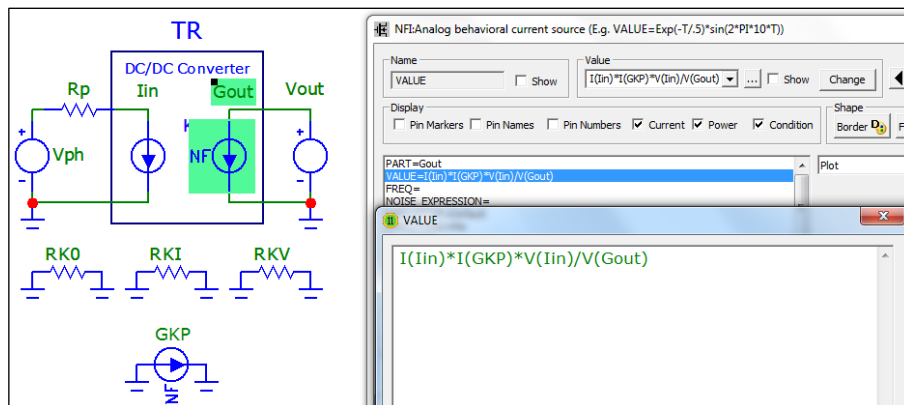


Рис. 9. Приклад специфікації джерела Gout моделі M2

Приклад коректного розрахунку енергетичної ефективності перетворювача фотovoltaїчного джерела з використанням моделі M2 представлено на рис. 10. Можна бачити сімейство енергетичних діаграм, що відповідають вище розглянутим (зокрема, рис. 3) функціональним залежностям вихідної потужності  $P_{OUT}$  від струму  $I_{PHD}$  фотovoltaїчного джерела для наборів параметрів конвертера.

Наведені вище моделі та приклади розрахунків демонструють виявлений вплив параметрів кіл живлення та коефіцієнтів  $K_I$ ,  $K_V$ ,  $K_0$  на зміщення точки оптимального відбору енергії фотovoltaїчного джерела. Відтак, отримані результати представляють собою подальший розвиток методу точки максимальної потужності MPPT. Ці результати особливо важливі при проектуванні малопотужних пристроїв фотovoltaїки, зокрема сенсорних пристроїв IoT з фотovoltaїчним живленням.



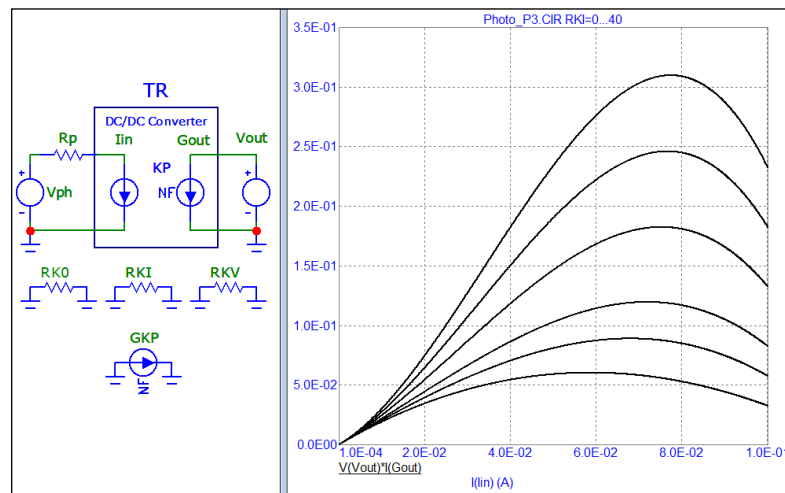


Рис. 10. Приклад розрахунку енергетичної ефективності перетворювача фотovoltaїчного джерела

### Висновки

Проведено аналіз режимів керування фотovoltaїчних систем живлення з використанням методу відстеження точки максимальної потужності МРРТ. На прикладі DC-DC конвертера LT3495 (Linear Technology) показано, що енергетична ефективність конвертера суттєво залежить від струму навантаження. Відтак, необхідно проводити аналіз впливу режимів навантаження на втрати енергії в МРРТ системах. Новизною запропонованих в роботі рішень є оптимізація режимів навантаження фотovoltaїчного джерела з врахуванням втрат енергії. Розроблено SPICE модель перетворення енергії фотovoltaїчного джерела, що враховує ці втрати. Демонструються приклади модельних досліджень та аналізу енергетичної ефективності, що є необхідним при розробленні вбудованих систем малопотужних пристроїв електроніки, зокрема в концепції Інтернету речей.

### Література

1. Power electronics: The enabling technology for renewable energy integration [Електронний ресурс] / Zhongting Tang, Yongheng Yang, Frede Blaabjerg // CSEE Journal of Power and Energy Systems. — 2022. — Т. 8, № 1. — С. 39—52. — Режим доступу: <https://doi.org/doi:10.17775/CSEJPES.2021.02850>.
2. Reactive Power Compensation and Optimization Strategy for Grid-Interactive Cascaded Photovoltaic Systems [Електронний ресурс] / Liming Liu [та ін.] // IEEE Transactions on Power Electronics. — 2015. — Т. 30, № 1. — С. 188—202. — Режим доступу: <https://doi.org/10.1109/tpel.2014.2333004>
3. Quality Analysis of Photovoltaic System Using Descriptive Statistics of Power Performance Index [Електронний ресурс] / Gyu Gwang Kim [та ін.] // IEEE Access. — 2023. — Т. 11, № 1. — С. 28427—28438. — Режим доступу: <https://doi.org/10.1109/access.2023.3257373>
4. Analysis of Inertia Characteristics of Photovoltaic Power Generation System Based on Generalized Droop Control [Електронний ресурс] / Yuxin Zha [та ін.] // IEEE Access. — 2021. — Т. 9. — С. 37834—37839. — Режим доступу: <https://doi.org/10.1109/access.2021.3059678>
5. A Multi-Mode Flexible Power Point Tracking Algorithm for Photovoltaic Power Plants [Електронний ресурс] / Hossein Dehghani Tafti [та ін.] // IEEE Transactions on Power Electronics. — 2019. — Т. 34, № 6. — С. 5038—5042. — Режим доступу: <https://doi.org/10.1109/tpel.2018.2883320>
6. Stratified Optimization Strategy Used for Restoration With Photovoltaic-Battery Energy Storage Systems as Black-Start Resources [Електронний ресурс] / Junhui Li [та ін.] // IEEE Access. — 2019. — Т. 7. — С. 127339—127352. — Режим доступу: <https://doi.org/10.1109/access.2019.2937833>
7. An Optimized Fractional Nonlinear Synergic Controller for Maximum Power Point Tracking of Photovoltaic Array Under Abrupt Irradiance Change [Електронний ресурс] / Mena Maurice Farag [та ін.] // IEEE Journal of Photovoltaics. — 2023. — Т. 13, № 2. — С. 305—314. — Режим доступу: <https://doi.org/10.1109/jphotov.2023.3236808>
8. An Improved Constant Power Generation Algorithm for Photovoltaic Systems [Електронний ресурс] / Tangwu Yang, Xingshuo Li, Shuye Ding // CPSS Transactions on Power Electronics and Applications. — 2022. — Т. 7, № 4. — С. 451—460. — Режим доступу: <https://doi.org/10.24295/cpsstpea.2022.00041>
9. Introduction to Photovoltaic Systems Maximum Power Point Tracking. Application Report. Texas Instruments. [Електронний ресурс] // Analog | Embedded processing | Semiconductor company | TI.com. — Режим доступу: <https://www.ti.com/solution/solar-charge-controller>
10. SM72442 - Programmable Maximum Power Point Tracking Controller for Photovoltaic Solar Panels. Texas Instruments. [Електронний ресурс] // Analog | Embedded processing | Semiconductor company | TI.com. — Режим доступу: <https://www.ti.com/solution/solar-charge-controller>

11. Single-phase grid-connected PV system with golden section search-based MPPT algorithm [Електронний ресурс] / Shuang Xu [та ін.] // Chinese Journal of Electrical Engineering. — 2021. — Т. 7, № 4. — С. 25—36. — Режим доступу: <https://doi.org/10.23919/cjee.2021.000035>
12. PV maximum power-point tracking using modified particle swarm optimization under partial shading conditions [Електронний ресурс] / Al-wesabi Ibrahim [та ін.] // Chinese Journal of Electrical Engineering. — 2020. — Т. 6, № 4. — С. 106—121. — Режим доступу: <https://doi.org/10.23919/cjee.2020.000035>
13. A New High Gain DC-DC Converter With Model-Predictive-Control Based MPPT Technique for Photovoltaic Systems [Електронний ресурс] / Omar Abdel-Rahim, Haoyu Wang // CPSS Transactions on Power Electronics and Applications. — 2020. — Т. 5, № 2. — С. 191—200. — Режим доступу: <https://doi.org/10.24295/cpsstpea.2020.00016>
14. LT3495 Datasheet and Product Info | Analog Devices [Електронний ресурс] // Mixed-signal and digital signal processing ICs | Analog Devices. — Режим доступу: <https://www.analog.com/en/products/lt3495.html>
15. Performance Analysis of Wireless Sensor Network Node Based on Thermoelectric Generator Using SPICE Model [Електронний ресурс] / Miloš Marjanović [та ін.] // 2023 10th International Conference on Electrical, Electronic and Computing Engineering (IcETRAN), East Sarajevo, 5—8 черв. 2023 р. — [Б. м.], 2023. — С. 1—6. — Режим доступу: <https://doi.org/10.1109/icetran59631.2023.10192212>

### References

1. Power electronics: The enabling technology for renewable energy integration [Electronic resource] / Zhongting Tang, Yongheng Yang, Frede Blaabjerg // CSEE Journal of Power and Energy Systems. — 2022. — Vol. 8, no. 1. — P. 39—52. — Mode of access: <https://doi.org/doi:10.17775/CSEEJPES.2021.02850>
2. Reactive Power Compensation and Optimization Strategy for Grid-Interactive Cascaded Photovoltaic Systems [Electronic resource] / Liming Liu [et al.] // IEEE Transactions on Power Electronics. — 2015. — Vol. 30, no. 1. — P. 188—202. — Mode of access: <https://doi.org/10.1109/tpel.2014.2333004>
3. Quality Analysis of Photovoltaic System Using Descriptive Statistics of Power Performance Index [Electronic resource] / Gyu Gwang Kim [et al.] // IEEE Access. — 2023. — Vol. 11, no. 1. — P. 28427—28438. — Mode of access: <https://doi.org/10.1109/access.2023.3257373>
4. Analysis of Inertia Characteristics of Photovoltaic Power Generation System Based on Generalized Droop Control [Electronic resource] / Yuxin Zha [et al.] // IEEE Access. — 2021. — Vol. 9. — P. 37834—37839. — Mode of access: <https://doi.org/10.1109/access.2021.3059678>
5. A Multi-Mode Flexible Power Point Tracking Algorithm for Photovoltaic Power Plants [Electronic resource] / Hossein Dehghani Tafti [et al.] // IEEE Transactions on Power Electronics. — 2019. — Vol. 34, no. 6. — P. 5038—5042. — Mode of access: <https://doi.org/10.1109/tpel.2018.2883320>
6. Stratified Optimization Strategy Used for Restoration With Photovoltaic-Battery Energy Storage Systems as Black-Start Resources [Electronic resource] / Junhui Li [et al.] // IEEE Access. — 2019. — Vol. 7. — P. 127339—127352. — Mode of access: <https://doi.org/10.1109/access.2019.2937833>
7. An Optimized Fractional Nonlinear Synergic Controller for Maximum Power Point Tracking of Photovoltaic Array Under Abrupt Irradiance Change [Electronic resource] / Mena Maurice Farag [et al.] // IEEE Journal of Photovoltaics. — 2023. — Vol. 13, no. 2. — P. 305—314. — Mode of access: <https://doi.org/10.1109/jphotov.2023.3236808>
8. An Improved Constant Power Generation Algorithm for Photovoltaic Systems [Electronic resource] / Tangwu Yang, Xingshuo Li, Shuye Ding // CPSS Transactions on Power Electronics and Applications. — 2022. — Vol. 7, no. 4. — P. 451—460. — Mode of access: <https://doi.org/10.24295/cpsstpea.2022.00041>
9. Introduction to Photovoltaic Systems Maximum Power Point Tracking. Application Report. Texas Instruments. [Electronic resource] // Analog | Embedded processing | Semiconductor company | TI.com. — Mode of access: <https://www.ti.com/solution/solar-charge-controller>
10. SM72442 - Programmable Maximum Power Point Tracking Controller for Photovoltaic Solar Panels. Texas Instruments. [Electronic resource] // Analog | Embedded processing | Semiconductor company | TI.com. — Mode of access: <https://www.ti.com/solution/solar-charge-controller>
11. Single-phase grid-connected PV system with golden section search-based MPPT algorithm [Electronic resource] / Shuang Xu [et al.] // Chinese Journal of Electrical Engineering. — 2021. — Vol. 7, no. 4. — P. 25—36. — Mode of access: <https://doi.org/10.23919/cjee.2021.000035>
12. PV maximum power-point tracking using modified particle swarm optimization under partial shading conditions [Electronic resource] / Al-wesabi Ibrahim [et al.] // Chinese Journal of Electrical Engineering. — 2020. — Vol. 6, no. 4. — P. 106—121. — Mode of access: <https://doi.org/10.23919/cjee.2020.000035>
13. New High Gain DC-DC Converter With Model-Predictive-Control Based MPPT Technique for Photovoltaic Systems [Electronic resource] / Omar Abdel-Rahim, Haoyu Wang // CPSS Transactions on Power Electronics and Applications. — 2020. — Vol. 5, no. 2. — P. 191—200. — Mode of access: <https://doi.org/10.24295/cpsstpea.2020.00016>
14. LT3495 Datasheet and Product Info | Analog Devices [Electronic resource] // Mixed-signal and digital signal processing ICs | Analog Devices. — Mode of access: <https://www.analog.com/en/products/lt3495.html>
15. Performance Analysis of Wireless Sensor Network Node Based on Thermoelectric Generator Using SPICE Model [Electronic resource] / Miloš Marjanović [et al.] // 2023 10th International Conference on Electrical, Electronic and Computing Engineering (IcETRAN), East Sarajevo, 5—8 June 2023. — [S. l.], 2023. — P. 1—6. — Mode of access: <https://doi.org/10.1109/icetran59631.2023.10192212>