

**ІМІТАЦІЙНА МОДЕЛЬ АВТОНОМНОЇ СИСТЕМИ  
ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ОБ'ЄКТІВ АВТОДОРОЖНЬОЇ  
ІНФРАСТРУКТУРИ**

***О. І. Тарасюк, аспірант***

***С. М. Волошин, кандидат технічних наук, доцент***

***Національний університет біоресурсів і природокористування України***

***E-mail: [Oleg535135@gmail.com](mailto:Oleg535135@gmail.com)***

***М. І. Рутило, кандидат технічних наук, доцент***

***Тернопільський національний педагогічний університет ім.***

***Володимира Гнатюка***

***E-mail: [rutmik@ukr.net](mailto:rutmik@ukr.net)***

**Анотація.** *Наявність централізованого електропостачання з відповідною інфраструктурою та розгалуженою розподільчою мережею зі значними технологічними втратами не тільки спричиняє підвищені ризики, а й ставить під сумнів якість та надійність енергозабезпечення віддалених об'єктів. Використання малих електростанцій на базі відновлювальних джерел енергії здатне вирішити проблему електропостачання об'єктів транспортної інфраструктури (зупинки громадського транспорту, пішохідні переходи, елементи управління дорожнім рухом тощо). Проте, доцільність використання того чи іншого джерела енергії потребує проведення імітаційного моделювання параметрів даних систем електропостачання.*

*Метою дослідження є розробка імітаційної моделі автономної системи енергозабезпечення об'єктів автодорожньої інфраструктури та перевірка її функціонування в реальних умовах. У статті наведено структурну імітаційну модель та подані характеристики її складових. Наведено порядок функціонування складових елементів та особливості їх взаємодії. Проведено експериментальне моделювання залежностей вихідної потужності фотоелектричного модуля від підтримуваної на його виході напруги, узагальнено отримані результати.*

*Розроблена модель дозволяє реалізувати режим підтримання максимальної продуктивності завдяки введенню зворотного зв'язку для контролю величини вхідної напруги перетворювача, яка порівнюється із обчисленим (заданим) значенням напруги, розрахованим за даними фактичного струму навантаження та струму короткого замикання фотоелектричного модуля для різних величин світлового потоку. Результат порівняння, з відповідним знаком, надходить до пропорційно-інтегрального регулятора, вихідним керуючим впливом якого є регулювання вихідної напруги перетворювача та зв'язаним з нею зарядним струмом*

*батареї, що, відтак, призводить до зміни вхідного струму і забезпечує підтримання заданої напруги на виході сонячної батареї. За такої умови її вихідний струм прямо пропорційний величині сонячної радіації. Також встановлено, що вибір мінімально необхідної потужності фотоелектричної панелі необхідно здійснювати з урахуванням найнесприятливішого сценарію щодо погодних умов та сезону року для забезпечення максимального заряду акумуляторної батареї.*

**Ключові слова:** *імітаційна модель, моделювання автономної системи енергозабезпечення, малі електростанції, об'єкти автодорожньої інфраструктури, фотоелектричні панелі, апаратно-програмний комплекс, мікроконтролер*

**Актуальність.** Перспективи впровадження автономних систем енергозабезпечення для живлення об'єктів автодорожньої інфраструктури (зупинки громадського транспорту, пішохідні переходи, елементи управління дорожнім рухом тощо) зумовлено необхідністю підвищення надійності електропостачання, зменшення втрат електроенергії та модернізації електричних мереж. Наявність централізованого постачання з відповідною інфраструктурою та розгалуженою розподільчою мережею зі значними технологічними втратами не тільки спричиняє підвищені ризики, а й ставить під сумнів якість та надійність енергозабезпечення віддалених об'єктів.

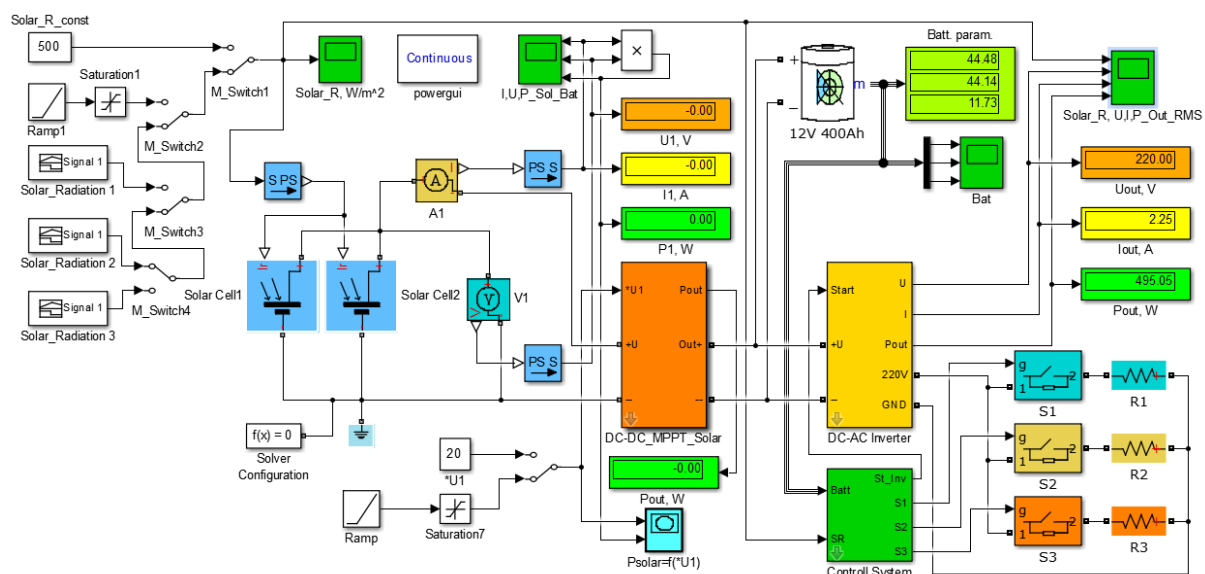
Використання автономних систем на базі відновлювальних джерел енергії здатне вирішити дану проблему. Проте, доцільність використання того чи іншого джерела енергії потребує розробки імітаційних моделей даних систем для оптимізації визначення їх конструктивних параметрів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Значна кількість публікацій присвячена питанню використання вітрових турбін на автомагістралях [1, 3] та ефективності вітрогенераторів різних типів [2]. Зокрема, автори роботи [3] досліджують ефективність використання повітряного потоку від транспорту на автомагістралях Малайзії. Недоліком зазначених досліджень є зосередження уваги лише на живленні об'єктів транспортної інфраструктури електроенергією отриманою від вітрогенераторів. Енергія сонячного випромінювання не розглядається, хоча її потенціал теж високий. Зокрема, об'єкти транспортної інфраструктури розміщені на відкритій території, що дає достатньо місця для

розміщення та спрощує орієнтацію фотоелектричних панелей за Сонцем [4]. Дослідження, наведені в роботі [5], також вказують на перспективи розвитку в Україні саме джерел електропостачання, що використовують енергію сонячного випромінювання.

**Мета дослідження** – розробка параметрів імітаційної моделі автономної системи енергозабезпечення об'єктів автодорожньої інфраструктури, яка базується на використанні відновлювального джерела сонячної енергії для генерації електричного струму засобами фотоелектричних перетворювачів.

**Матеріали і методи дослідження.** На рис. 1 представлена структура імітаційної моделі автономної системи енергозабезпечення об'єктів автодорожньої інфраструктури, яка базується на використанні відновлювального джерела сонячної енергії для генерації електричного струму засобами фотоелектричних перетворювачів.

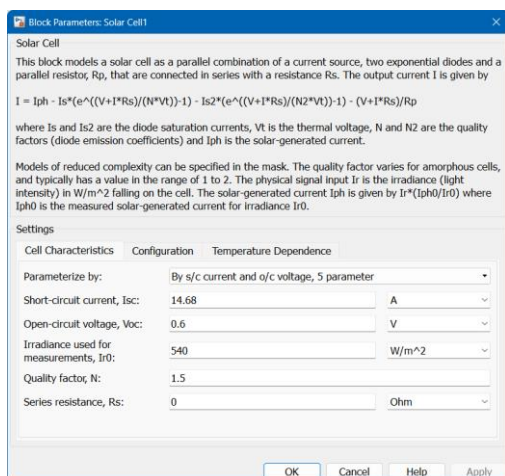


**Рис. 1. Структура імітаційної моделі автономної системи енергозабезпечення**

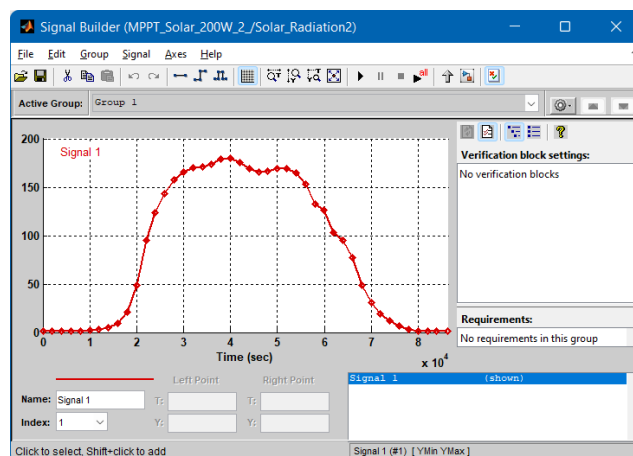
Основною функцією системи є забезпечення освітлення вказаних об'єктів у вечірній та нічний час доби. Імітаційна модель виконана за допомогою програмних засобів Simulink (Matlab) із застосуванням стандартних та спеціалізованих блоків бібліотеки Simulink Library – розділів Simscape, SimElectronics та SimPowerSystem.

У структуру моделі (за рис. 1) входять:

- Фотоелектричний перетворювач (ФП), представлений двома паралельно увімкненими сонячними модулями Solar Cell1 та Solar Cell2 з вихідною напругою у режимі холостого ходу – 24 В і максимальним сумарним струмом короткого замикання – 29,36 А. Вказані вище, а також інші специфічні параметри можна гнучко задавати у діалогових вікнах (вкладках) налаштувань модуля (рис. 2, а). Для контролю вихідних електричних параметрів фотоелектричного перетворювача слугують блоки-вимірювачі V1, A1 з відповідними цифровими дисплеями та осцилоскопом U, I, P\_Sol\_Bat.



а



б

**Рис. 2. Вікна налаштувань блоків:**

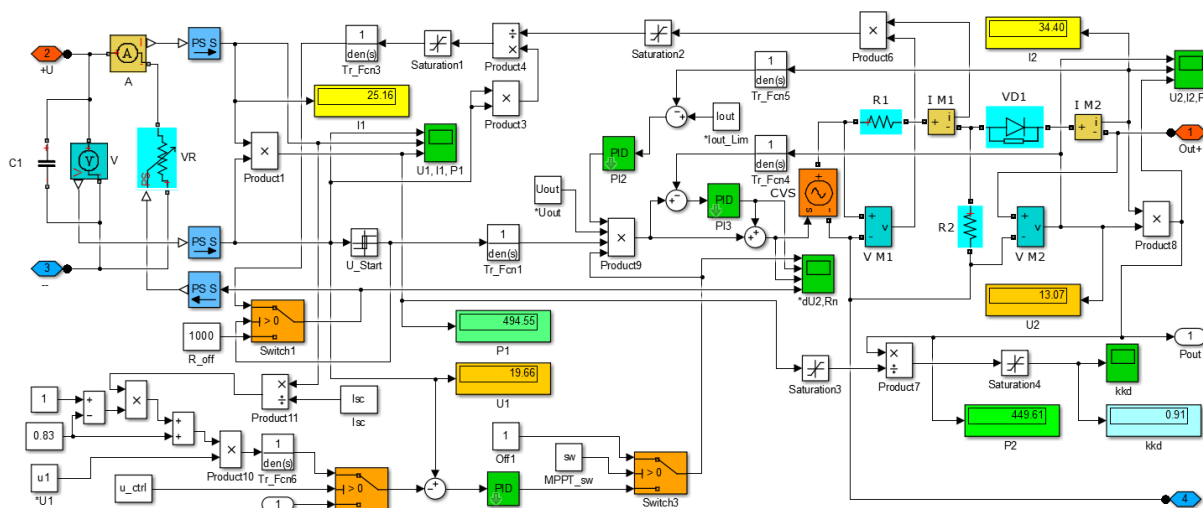
а – сонячного модуля Solar Cell, б – Signal Builder

Вхідною величиною ФП є питома потужність сонячної радіації ( $W/m^2$ ), яка може бути задана: константою – Solar\_R\_const, монотонно зростаючою чи спадною – Ramp\_SR, або змінюваною довільним чином засобами Solar\_Radiation1 – Solar\_Radiation3 (інструмент Signal Builder) (рис. 2, б), де прописані статистичні дані щодо величин сонячної радіації протягом вибраної доби. Вибір конкретного джерела сигналу здійснюється шляхом зміни станів перемикачів M\_Switch1 – M\_Switch4. Процес зміни вхідної величини в часі графічно відтворюються осцилоскопом Solar\_R,  $W/m^2$ , вихідна потужність перетворювача відображається дисплеєм Pout1, W.

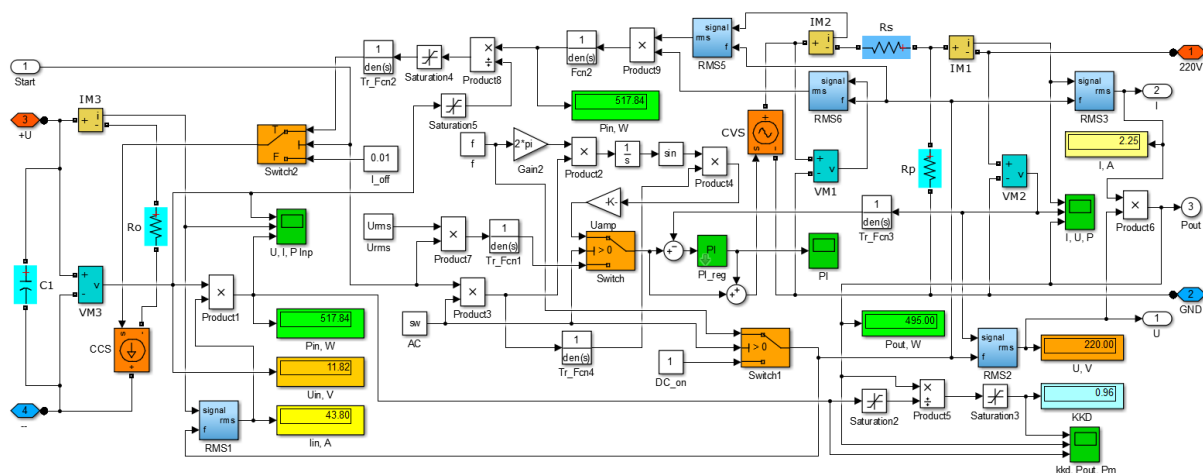
- Універсальний підвищувально-знижувальний перетворювач постійної напруги DC-DC\_MPPT\_Solar з функцією підтримання точки максимальної потужності (Maximum Power Point Tracking – MPPT), який є навантаженням сонячних модулів і який призначений для заряджання акумуляторної батареї (АКБ).

- АКБ – з номінальною напругою 12В та ємністю 400 А\*Г – вибрана із бібліотеки блоків Simulink Library/

Підсистеми конвертора DC-DC\_MPPT\_Solar та інвертора DC-AC\_inverter виконані у вигляді спрощених «поведінкових» моделей (рис. 3, а, б), які відтворюють основи функціонування перетворювачів без необхідності симуляції окремих подій перемикавання, пов'язаних з процесами широтно-імпульсної модуляції (ШІМ). Вони базуються на використанні законів збереження та перетворення енергії з урахуванням балансів вхідних та вихідних потужностей, а також втрат енергії під час її перетворення. Така концепція побудови структури імітаційної моделі значно спрощує її математичний опис, що забезпечує суттєве скорочення часу моделювання, оскільки потребує виконання меншої кількості обчислювальних операцій в одиницю часу, а відтак, і знижує використання ресурсів комп'ютера. Як результат – моделювання часового проміжку функціонування системи тривалістю 24 години виконується протягом декількох хвилин, що є суттєвим чинником під час виконання досліджень довготривалих процесів, повний цикл яких може вимірюватись годинами і навіть добами.



a



б

Рис. 3. Структури імітаційних моделей перетворювачів напруги:

а – DC-DC\_MPPT, б – DC-AC\_inverter

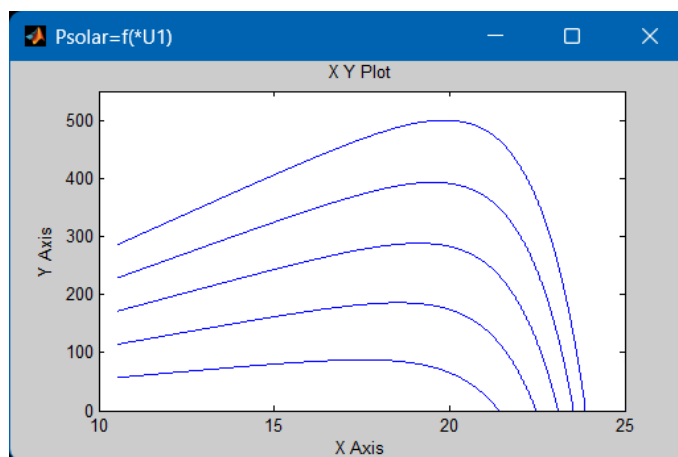
Підсистеми перетворювачів мають подібні структури і представлені у вигляді так званих «чотириполосників», вхідні порти яких «+U» та «-» (розташовані з лівої сторони підсистем) і вихідні «Out+», «-», «220» та «GND» (з правої сторони) гальванічно розв'язані між собою. Входи всіх підсистем внутрішньо підключені до динамічних навантажень, які задають необхідну споживану потужність, що визначається потужностями вторинних кіл з дотриманням загального їх балансу та з урахуванням втрат під час перетворення.

До вхідного навантаження підсистеми DC-DC\_MPPT\_Solar входять регульований резистивний елемент VR, опір якого можна динамічно змінювати через зовнішній порт, а також засоби вимірювання вхідних струму і напруги (блоки A, I). Опір цього елемента встановлюється за результатами комплексних обчислень, зокрема спершу обраховується вихідна потужність  $P'_2$  (вторинного кола з урахуванням втрат), з якої, шляхом ділення на квадрат вхідної напруги перетворювача визначається величина опору навантаження:  $R(VR) = P'_2/U_1^2$ . Розраховане значення задається через зовнішній порт елемента VR.

Корисна потужність споживача  $P_2$  визначається як добуток вихідної напруги U2 ( $\leq 14V$ ) і струму навантаження, який є зарядним струмом акумуляторної батареї. Втрати у навантаженому та холостому режимах перетворювача задаються величинами опорів резистивних елементів: послідовного – R1, паралельного – R2, а

також параметрами діода VD1. Енергоспоживання у режимі очікування задається величиною  $R_{off}$ .

Функція MPPT реалізована у моделі так: оскільки максимальна потужність сонячної батареї досягається у випадку забезпечення на її виході визначеної величини напруги, яка залежить від величин сонячної радіації та струму навантаження (для вибраного сонячного модуля максимальне значення  $U_{sol\_bat} = 20$  В та монотонно спадає при зменшенні випромінювання, за результатами моделювання, рис. 4), то завданням алгоритму MPPT – власне і є визначення та підтримання напруги сонячного модуля залежно від величини сонячної радіації  $U_{sol\_bat} = f(P_{solar})$  шляхом регулювання зарядного струму АКБ. Це досягається введенням зворотного зв'язку для контролю величини вхідної напруги перетворювача, яка порівнюється із обчисленим (заданим) значенням напруги, розрахованим за даними фактичного струму навантаження та струму короткого замикання ФП для різних величин світлового потоку.

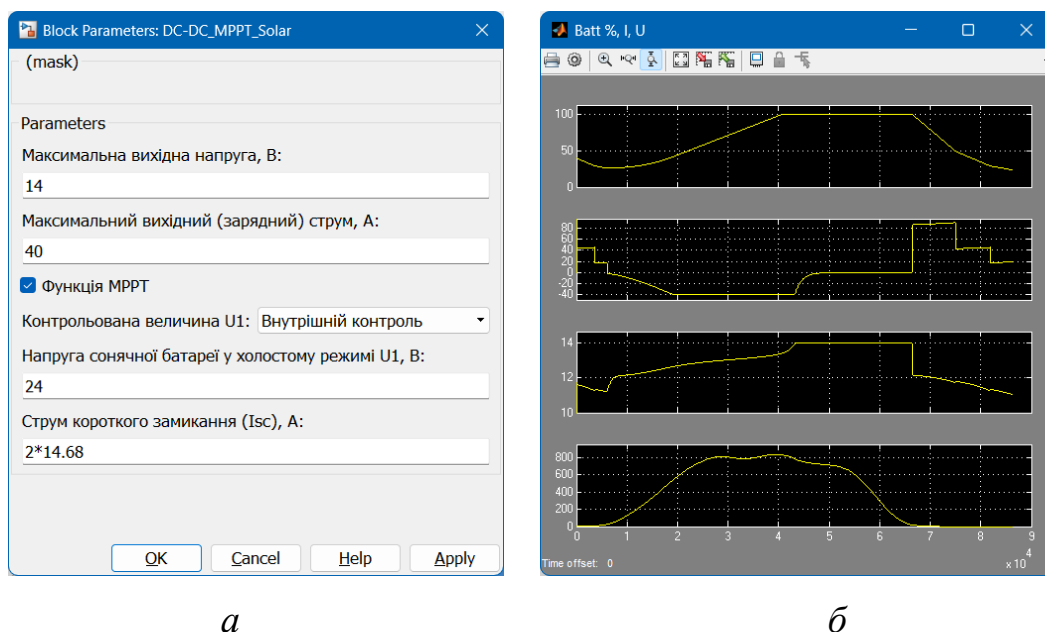


**Рис. 4. Результати моделювання залежностей вихідної потужності сонячного модуля від підтримуваної на його виході напруги  $P_{sol\_bat} = f(*U_{sol\_bat})$  для різних величин сонячної радіації (100 – 500 Вт/м²)**

Результат порівняння, з відповідним знаком, надходить до пропорційно-інтегрального регулятора (PI1, див. рис. 3, а), вихідним керуючим впливом якого є регулювання вихідної напруги перетворювача та, зв'язаним з нею, зарядним струмом батареї, що, відтак, призводить до зміни вхідного струму і забезпечує підтримання заданої напруги на виході сонячної батареї. За такої умови її вихідний струм прямо пропорційний величині сонячної радіації.



Процес функціонування перетворювача відбувається за достатнього рівня сонячної радіації (у світлу пору доби), коли величина напруги фотоелектричного модуля перевищить встановлене значення ( $U_{start} > 12$  В), а повноцінне його функціонування у режимі MPPT розпочинається, коли вхідна напруга досягне контрольованого системою значення для визначеної величини сонячної радіації. Із зростанням рівня сонячної радіації зростає також і зарядний струм, який може перевищувати для вибраної батареї допустиме значення, тому алгоритмом також передбачено його обмеження на заданому рівні (40 А), як і вихідної напруги (14 В) (рис. 5, а).



**Рис. 5. Вікно налаштувань блоку DC-DC\_MPPT\_Solar (а); часові діаграми зміни заряду, струму і напруги акумуляторної батареї та сонячної радіації (б)**

Подальша логіка функціонування електротехнічного комплексу визначається алгоритмом, закладеним у системі керування (підсистема Control System), структура якої представлена на рис. 6. Система керування контролює стан акумуляторної батареї, а також рівень сонячної радіації і здійснює керування інвертором DC-AC\_inverter та силовими комутаційними пристроями S1, S2, S3 навантажень R1, R2, R3, еквівалентних потужностям освітлювальних приладів (відповідно 200, 300 і 500 Вт) сумарною потужністю 1000 Вт.



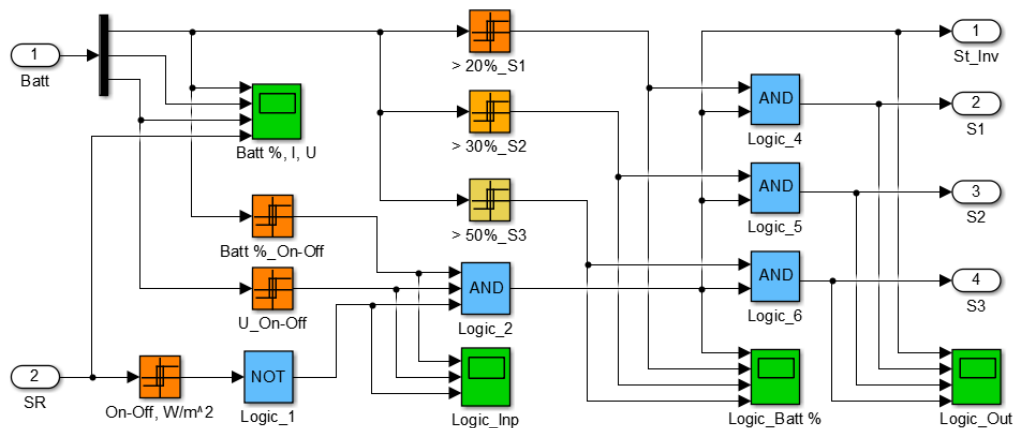


Рис. 6. Структура підсистеми Control System

Дозвіл на старт системи (інвертора) формується тривходовим логічним елементом Logic\_2 (3-AND) на підставі отриманих високих рівнів сигналів (логічних одиниць) з виходів релейних елементів у випадку одночасного виконання всіх наступних умов: рівень заряду та напруга батареї не нижчі відповідно за 15% і 11 В, рівень сонячної радіації – нижче 20 Вт/м<sup>2</sup>. Вказані значення можна задавати у відповідних полях діалогового вікна налаштувань підсистеми Control System (рис. 7).

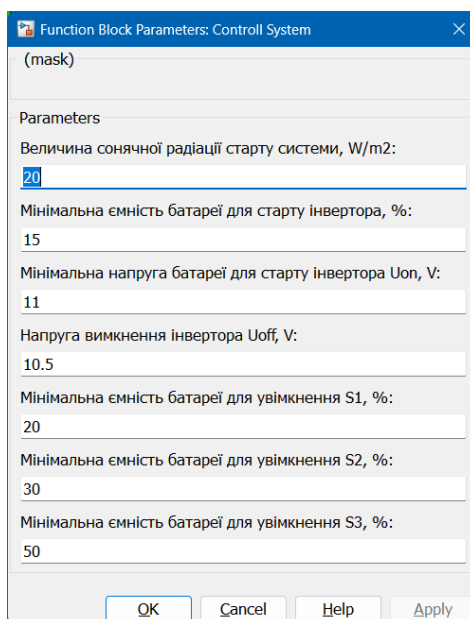
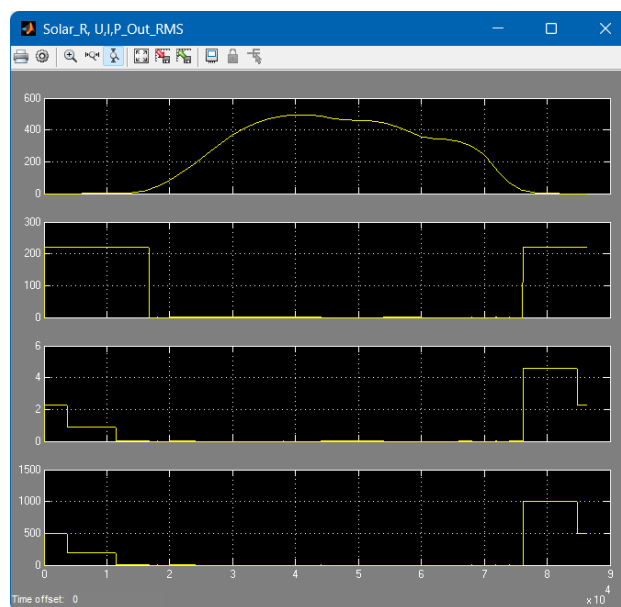


Рис. 7. Вікно налаштувань підсистеми Control System

**Результати досліджень та їх обговорення.** Виходячи із вказаних вище умов, старт системи освітлення завжди відбувається у вечірній час і, в більшості випадках,

за повністю зарядженої батареї (величина заряду батареї залежить від інтенсивності сонячної радіації протягом світлового дня), в результаті чого системою дається дозвіл на підключення споживачів з максимальною потужністю (1000 Вт). У процесі розряджання батареї до рівня нижче 50 % релейний елемент системи  $>50\%\_S3$  формує стан логічного нуля на своєму виході, і система вимикає комутаційний пристрій S3 споживача R3 потужністю 500 Вт. Далі, коли заряд батареї досягне рівня нижче 30 %, релейний елемент  $>30\%\_S2$  вимкне комутаційний пристрій S2 споживача R2 (300 Вт). У системі енергозабезпечення залишається увімкнутим тільки споживач R1 потужністю 200 Вт, його функціонування продовжується до моменту настання одного із факторів: зазвичай це – початок світлового дня наступної доби (рівень сонячної радіації вище заданого у налаштуваннях –  $20 \text{ Вт/м}^2$ ) або також, коли заряд батареї опуститься нижче від заданого у системі мінімального рівня (15 %) з метою уникнення глибокого розряду. Цей процес безперервно повторюється, він має добовий циклічний характер, тому для моделювання встановлено часовий інтервал – 24 год. Результати моделювання представлено на рис. 8.



**Рис. 8. Результати моделювання функціонування системи енергозабезпечення: часові діаграми (з верху вниз, протягом 24 год) сонячної радіації ( $\text{Вт/м}^2$ ), діючого значення напруги інвертора (U, В), струму (I, А) та вихідної потужності (P, Вт)**

Протягом усього світлового дня відбувається заряджання АКБ струмом, який буде залежати від величини сонячної радіації, тому вибір мінімально необхідної потужності ФП необхідно здійснювати з урахуванням найнесприятливішого сценарію щодо погодних умов та сезону року для забезпечення максимального заряду АКБ.

**Висновки і перспективи.** Запропонована імітаційна модель автономної системи енергозабезпечення об'єктів автодорожньої інфраструктури дозволяє оцінити ефективність використання відновлювального джерела сонячної енергії для генерації електричного струму засобами фотоелектричних перетворювачів та моделювати різні режими роботи системи.

Подальша робота направлена на удосконалення імітаційної моделі, а саме на розширення складових системи енергозабезпечення, зокрема, введення до системи вітрогенератора.

#### **Список використаних джерел**

1. Bharathi, S., Balaji, G. A Method for Generating Electricity by Fast Moving Vehicles. Appl. Mech. 2012. Vol. 110–116, pp. 2177–2182.
2. Kozirsky, V., Podoltsev, O., Tregub, M. Rationalization of dimensions for ring-shaped rotor of wind-electric switched reluctance generator. Tekhnichna elektrodynamika. 2018. No 6, P. 54 – 57, DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2018.06.054>
3. A. A. Al-Aqel, B. K. Lim, E. E. Mohd Noor, T. C. Yap and S. A. Alkaff, "Potentiality of small wind turbines along highway in Malaysia," 2016 International Conference on Robotics, Automation and Sciences (ICORAS), Ayer Keroh, 2016, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICORAS.2016.7872634.
4. V. Kozyrsky, S. Makarevych, S. Voloshyn. Economic Aspects and Factors of Solar Energy Development in Ukraine / Intelligent Computing and Optimization. ICO 2020. Advances in Intelligent Systems and Computing, vol 1324. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-68154-8\\_12](https://doi.org/10.1007/978-3-030-68154-8_12)
5. Skrypnyk, A., Klymenko, N., Voloshyn, S., Holiachuk, O. and Sabishchenko, O. Global and regional externalities of the Ukrainian energy sector", International Journal of Energy Sector Management. 2023. Vol. 17 No. 1, pp. 145-166. <https://doi.org/10.1108/IJESM-05-2021-0005>.

#### **References**

1. Bharathi, S., Balaji, G. (2012). A Method for Generating Electricity by Fast Moving Vehicles. Appl. Mech., 110–116, 2177–2182.

2. Kozirsky, V., Podoltsev, O., Tregub, M. (2018). Rationalization of dimensions for ring-shaped rotor of wind-electric switched reluctance generator. *Tekhnichna elektrodynamika*, 6, 54 – 57, DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2018.06.054>
3. A. A. Al-Aqel, B. K. Lim, E. E. Mohd Noor, T. C. Yap and S. A. Alkaff (2016). "Potentiality of small wind turbines along highway in Malaysia," 2016 International Conference on Robotics, Automation and Sciences (ICORAS), Ayer Keroh, 1-6, doi: 10.1109/ICORAS.2016.7872634.
4. V. Kozyrsky, S. Makarevych, S. Voloshyn (2020).. Economic Aspects and Factors of Solar Energy Development in Ukraine. *Intelligent Computing and Optimization. ICO 2020. Advances in Intelligent Systems and Computing*, Vol 1324. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-68154-8\\_12](https://doi.org/10.1007/978-3-030-68154-8_12)
5. Skrypnyk, A., Klymenko, N., Voloshyn, S., Holiachuk, O. and Sabishchenko, O. (2023). Global and regional externalities of the Ukrainian energy sector", *International Journal of Energy Sector Management*, 17 (1), 145-166. <https://doi.org/10.1108/IJESM-05-2021-0005>.

## **THE SIMULATION MODEL OF AN AUTONOMOUS ENERGY SUPPLY SYSTEM FOR HIGHWAY INFRASTRUCTURE OBJECTS**

**O. Tarasiuk, S. Voloshyn, M. Rutylo**

**Abstract.** *The presence of a centralized power supply with the appropriate infrastructure and an extensive distribution network with significant technological losses not only causes increased risks, but also calls into question the quality and reliability of the energy supply of remote objects. The use of small power plants based on renewable energy sources can solve the problem of power supply of transport infrastructure objects (public transport stops, pedestrian crossings, traffic control elements, etc.). However, the expediency of using one or another energy source requires simulation modeling of the parameters of these power supply systems.*

*The purpose of this study is to develop a simulation model of the autonomous energy supply system of road infrastructure objects and to check its functioning in real conditions. The article describes the structural simulation model and presents the characteristics of its components. The order of functioning of the constituent elements and the peculiarities of their interaction are given. Experimental modeling of the dependences of the output power of the photovoltaic module on the voltage maintained at its output was carried out, and the obtained results were summarized.*

*The developed model makes it possible to implement the mode of maintaining maximum performance thanks to the introduction of feedback to control the value of the input voltage of the converter, which is compared with the calculated (set) value of the voltage, calculated from the data of the actual load current and short-circuit current of the photovoltaic module for different values of light flux. The result of the comparison, with the appropriate sign, is sent to the proportional-integral regulator, the output control effect of which is the regulation of the output voltage of the converter and, related to it, the charging current of the battery, which, therefore, leads to a change in the input current and ensures the maintenance of the set voltage at solar cell outputs. Under this condition, its output current is directly proportional to the amount of solar radiation. It is also*

*established that the selection of the minimum required capacity of the photovoltaic panel must be carried out taking into account the most unfavorable scenario regarding weather conditions and the season of the year in order to ensure the maximum charge of the battery.*

**Key words:** *simulation model, simulation of an autonomous energy supply system, small power plants, road infrastructure objects, photovoltaic panels, hardware and software complex, microcontroller*