

МОДЕЛЮВАННЯ ОПТОЕЛЕКТРОННОГО НАВАНТАЖЕННЯ, ЯКЕ ЖИВИТЬСЯ ВІД ФОТОЕЛЕМЕНТА ТА АКУМУЛЯТОРА

Д.В. Бондаренко, канд. техн. наук

Інститут відновлюваної енергетики НАН України,
02094, вул. Гната Хоткевича 20а, м. Київ, Україна.

Метою даної роботи є побудова еквівалентних електричних схем оптоелектронного навантаження, яке живиться від фотоелемента та акумулятора. В роботі показано необхідність створення таких еквівалентних електричних схем, а саме при підключенні світлодіодів та напівпровідникових лазерів до сонячних фотоелементів, в якості джерела електричної енергії, та при використанні акумуляторів електроенергії. Показано, що еквівалентні електричні схеми витікають з фізичних явищ в напівпровідникових пристроях і рівнянь, які описують явища перетворення електричної енергії в світлову. Викладено різні еквівалентні схеми оптоелектронного навантаження. Показано, як просту так і найбільш узагальнену еквівалентні електричні схеми. Зокрема, показано еквівалентну схему акумулятора і спрощені схеми фотоелемента та оптоелектронного випромінювача світла, де в якості навантаження виступає світлодіод. Зазначено, що розвитком даної моделі є більш узагальнена еквівалентна електрична схема, де в якості оптоелектронного навантаження виступає напівпровідниковий інжекційний лазер. Розписані їх параметри та викладені рівняння для струмів та напруг. Також показано існування пасивних паразитних елементів в таких електричних схемах. Також показано, що в якості схеми заміщення фотоелемента, в спрощеній моделі, використано ідеальне джерело напруги та резистор з конденсатором. В подальшому, в узагальненій моделі, для більш широкого моделювання роботи фотоелемента, в якості схеми заміщення було використано ідеальне джерело струму та нелінійні пасивні елементи. Тобто, в результаті, було отримано узагальнену еквівалентну електричну схему акумулятора, підключеного до фотоелемента та оптоелектронного навантаження. Побудовано рівняння для струмів та напруг в отриманій схемі заміщення. Зроблено висновок. Бібл. 7, рис. 5.

Ключові слова: оптоелектронне навантаження, лазер, світлодіод, еквівалентні схеми, електрична модель, акумулятор, сонячний фотоелемент, моделювання.

SIMULATION OF OPTOELECTRONIC LOAD POWERED BY PHOTOCELL AND BATTERY

D. Bondarenko, candidate of technical science

Institute of Renewable Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine,
02094, 20A Hnata Khotkevycha Str., Kyiv, Ukraine.

The goal of this work is to create equivalent electrical circuits of optoelectronic load that is powered by the photocell and the battery. This paper demonstrates the need to create such equivalent electrical circuits, when connecting LEDs and semiconductor lasers to solar cells, as a source of electricity, and when using battery power. It is shown that equivalent electrical circuits derive from physical phenomena in semiconductor devices, and equations describing the phenomena of electrical energy conversion to light. Different equivalent schemes of optoelectronic loads are outlined. Both the simplest and the most generalized equivalent circuits are shown. In particular, equivalent circuit of a battery, a simplified circuits of a photocell and an optoelectronic source of light is shown, where the LED is a load. It is noted that the development of this model is a more generalized equivalent electrical circuit where a semiconductor injection laser is an optoelectronic load. Their parameters and equations for currents and voltages are described. The existence of passive parasitic elements in such electrical circuits is also shown. It has also been shown that the ideal voltage source and the capacitor resistor are used in the simplified model to replace the photocell. Subsequently, in the generalized model, an ideal current source and nonlinear passive elements were used as a substitution scheme for wider modeling of the photocell operation. That is, as a result, a generalized equivalent electrical circuit of a battery connected to the photovoltaic cell and optoelectronic load was obtained. The equation for currents and voltages in the obtained substitution circuit is constructed. The conclusion was drawn. Ref. 7, fig. 5.

Keywords: optoelectronic load, LED, laser, equivalent circuits, electric model, accumulator, solar pv-element, simulation.



Д.В. Бондаренко
D. Bondarenko

Відомості про автора:

старш. наук. співробітник Інституту відновлюваної енергетики НАН України, відділ сонячної енергетики.

Освіта: Київський національний університет ім.Т.Шевченка (Радіофізичний факультет).

Аспірантура Інституту електродинаміки НАН України.

Наукова сфера:

канд. техн. наук (теоретична електротехніка), квантова електроніка, фото- та оптоелектроніка, відновлювана енергетика.

Публікації: 43.

ORCID: 0000-0002-5629-930X

Контакти: тел: +380509729992

e-mail: dima7007bond@gmail.com

Author information:

senior scientist of Institute of Renewable Energy, National Ukrainian Academy of Science. Solar energy department.

Education: Kyiv national university T.Shevchenko (Radiophysics department). Postgraduate school of Institute of electrodynamic of NAS Ukraine.

Research area:

PhD (theoretical electrotechnic), quantum electronic, photo- and optoelectronic, renewable energy.

Publications: 43.

ORCID: 0000-0002-5629-930X

Contacts: tel: +380509729992

e-mail: dima7007bond@gmail.com

Вступ. Використання оптоелектронних пристроїв в різних сферах науки та техніки спонукає для проведення досліджень їх застосування разом з відновлюваними джерелами енергії. Наприклад, необхідно досліджувати використання світлодіодів для освітлення разом з сонячними батареями та акумуляторами, для освітлення в нічний час. Або досліджувати використання лазерів для розподілених систем безпеки, чи для архітектури та конструювання, які також мають автономне відновлюване джерело живлення. Крім того, необхідно моделювати динамічні характеристики таких систем.

Постановка завдання. Традиційним оптоелектронним навантаженням виступають випромінюючі напівпровідникові пристрої, такі як світлодіоди та лазери. Роботу таких пристроїв можна змоделювати за допомогою еквівалентних електричних схем. Електричні моделі витікають з рівнянь, які описують фізичні процеси перетворення електричної енергії в світлову, на рівні носіїв заряду та фотонів. В загальному випадку ці рівняння виглядають наступним чином [1]:

$$\frac{dN}{dt} = \frac{J}{ed} - \frac{N}{\tau_s} - \alpha(N - N_{th})P, \quad (1)$$

$$\frac{dP}{dt} = \alpha(N - N_{th})P - \frac{P}{\tau_p} + \beta \frac{N}{\tau_s}, \quad (2)$$

де N - концентрація носіїв заряду; P - густина фотонів; N_{th} - концентрація носіїв заряду при пороговій густині струму накачки; J - густина струму накачки; d - товщина активного шару випромінювача; τ_s - час спонтанної випромінюючої рекомбінації; τ_p - час життя фотона в резонаторі;

α - коефіцієнт оптичного підсилення; β - доля спонтанної рекомбінації в загальному випромінненні; e - заряд електрона.

Спрощені моделі світлодіодів і лазерів та систем на їх основі. У випадку світлодіодів, зворотній зв'язок відсутній та відсутня нелінійність вимушеної генерації фотонів. Тому рівняння (1), (2) приймуть наступний вигляд:

$$\frac{dN}{dt} = \frac{J}{ed} - \frac{N}{\tau_s}, \quad (3)$$

$$\frac{dP}{dt} = \frac{N}{\tau_s} - \frac{P}{\tau_p}. \quad (4)$$

Для того щоб перейти до електричної моделі, необхідно в (1) та (3) перейти до повного заряду, а в (2) і (4) до величини, яка моделює концентрації фотонів та еквівалентна певному електричному заряду [2,3]. Звідси отримуємо рівняння, які описують електричну модель напівпровідникового лазера:

$$C \frac{dU_N}{dt} = I - \frac{U_N}{R_N} - I_N + I_{th}, \quad (5)$$

$$C \frac{dU_P}{dt} = I_P - \frac{U_P}{R_{th}} - \frac{U_P}{R_p} + I_{SP}, \quad (6)$$

та напівпровідникового світлодіода:

$$C \frac{dU_N}{dt} = I - \frac{U_N}{R_N}, \quad (7)$$

$$C \frac{dU_P}{dt} = I_{SP}(U_N) - \frac{U_P}{R_P} \quad (8)$$

Тут U_N – моделює густину носіїв заряду, U_P – моделює густину фотонів, C – моделює процес накопичення заряду та перетворення його на фотони, I – струм накачки, R_N – відповідає втратам носіїв заряду на спонтанне випромінювання, R_P – відповідає втратам фотонів в активній частині напівпровідника, I_N – моделює витрату носіїв за-

ряду на створення фотонів в результаті вимушеного випромінювання (стимульованої емісії), I_P – моделює процес народження фотонів в наслідок вимушеної рекомбінації носіїв заряду, I_{th} – пороговий струм, I_{SP} - моделює процес народження фотонів внаслідок спонтанної рекомбінації носіїв заряду.

Таким чином еквівалентна електрична схема заміщення світлодіода буде мати наступний вигляд (рис. 1):

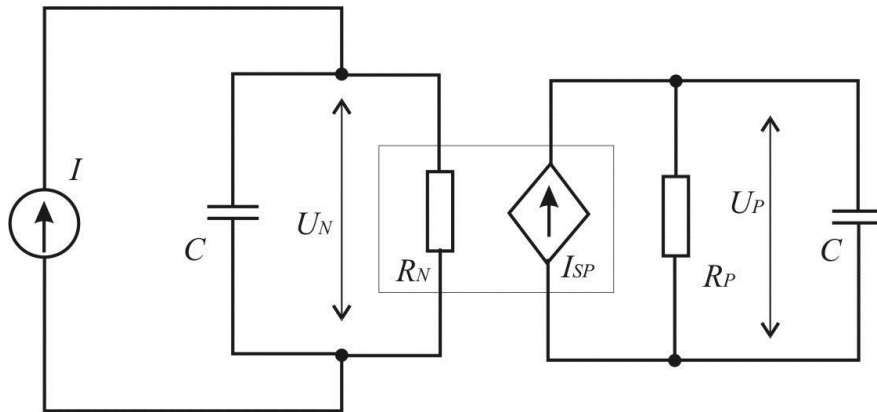


Рис. 1. Еквівалентна схема світлодіода.

Fig. 1. Equivalent circuit of LED.

а еквівалентна схема напівпровідникового лазера є наступною (рис. 2):

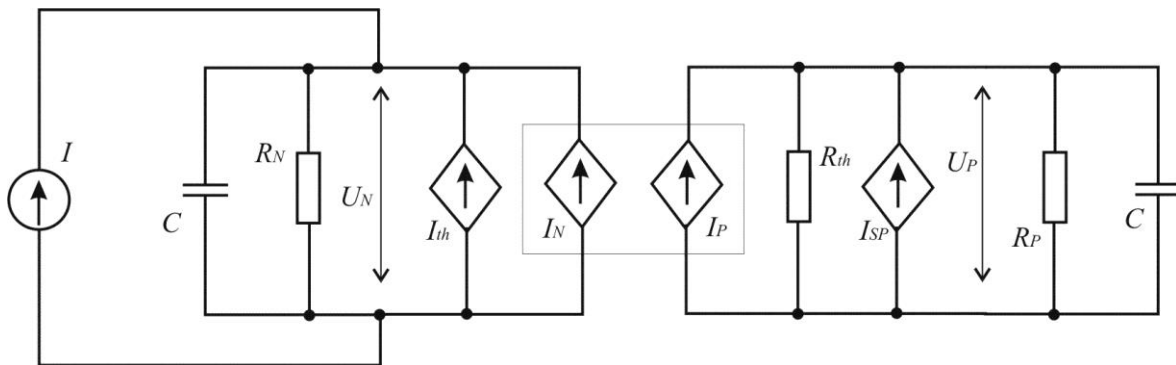


Рис. 2. Еквівалентна схема напівпровідникового лазера.

Fig. 2. Equivalent circuit of a semiconductor laser.

На рис.3 представлена схема заміщення напівпровідникового інжекційного лазера з паразитними елементами, на якому паразитні ємність,

опір та індуктивність відповідають за з'єднання напівпровідника.

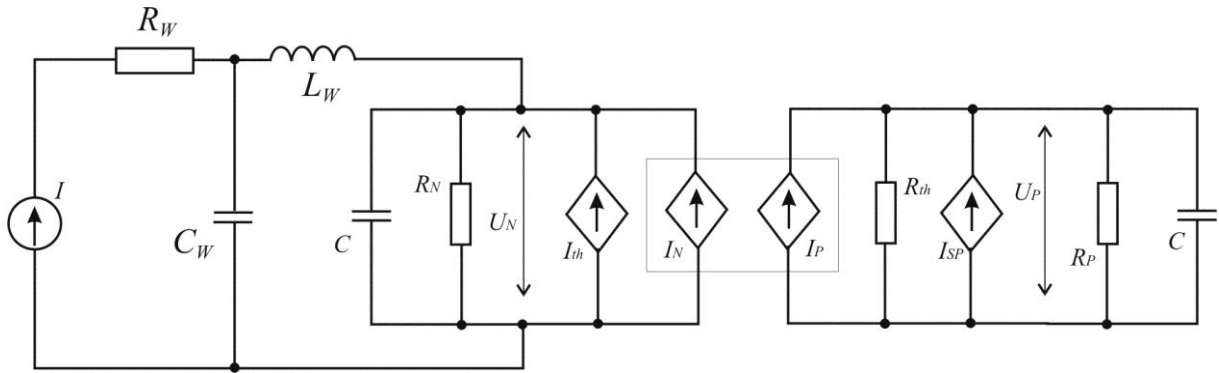


Рис. 3. Еквівалентна схема напівпровідникового лазера з паразитними елементами.

Fig. 3. Equivalent circuit of a semiconductor laser with parasitic elements.

В свою чергу, маючи загальну еквівалентну схему акумулятора [4] можна створити модель та проводити моделювання і оптимізацію електричних кіл з джерелами живлення, акумуляторами та оптоелектронним споживачами. Якщо джерелом живлення буде виступати фотоелемент, як базо-

вий елемент сонячних фотобатарей, то розглянувши еквівалентну схему фотоелемента [5] можна також створити модель системи фотоелемент-акумулятор-навантаження (рис.4). Дана модель є спрощеним варіантом і містить світлодіод в якості навантаження.

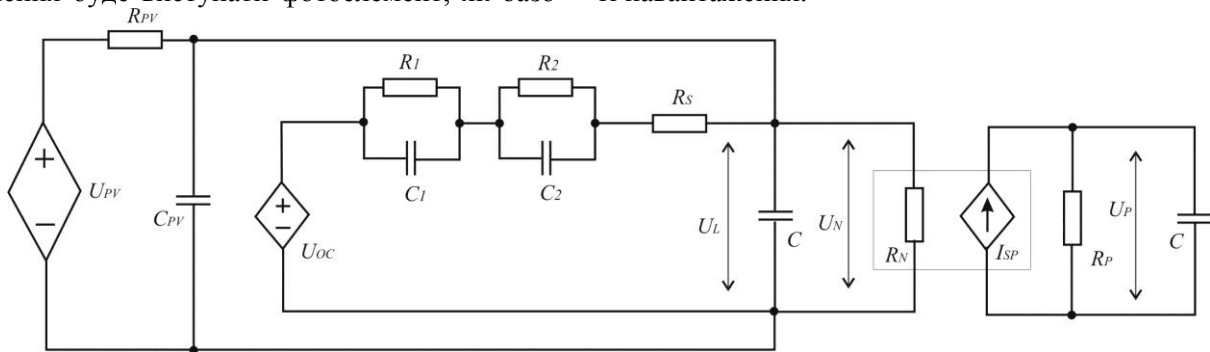


Рис. 4. Модель системи фотоелемент-акумулятор-світлодіод.

Fig. 4. Model of system PVElement-accumulator-LED.

В схемі на рис.4, крім вищеописаних параметрів, додаються кероване джерело напруги U_{PV} , яке моделює генерацію струму в фотоелементі і залежить від рівня інсоляції, а також температури та конструкції фотоелемента. Опір R_{PV} є внутрішнім опором фотоелемента, а ємність C_{PV} є паразитною та описує властивості напівпровідника та конструкцію фотоелементу. Напруга U_L є напругою на навантаженні і дорівнює напрузі U_N , яка моделює процеси накопичення та рекомбінації носіїв заряду в оптоелектронному пристрої. Кероване джерело напруги U_{OC} показує напругу на акумуляторі без навантаження, тобто напругу холостого ходу, опір R_S це внутрішній омичний опір акумулятора. Паразитні елементи R_1 та R_2 відповідають за електрохімічні процеси в акумуляторі, ємності C_1 та C_2 є ефективними ємностями

ми, які відповідають за перенос енергії в акумуляторі.

Далі розглянемо більш узагальнену модель системи фотоелемент-акумулятор-випромінювач. Так зокрема, візьмо до розгляду напівпровідниковий інжекційний лазер, а для поглибленого аналізу процесів в сонячних фотоелементах використаємо трохи іншу еквівалентну схему, ніж на рис.4. Для цього введемо в схему заміщення фотоелемента нелінійний опір та нелінійну ємність (рис.5). Нелінійна ємність C_{PV} виникає завдяки дифузійній та бар'єрній ємностям в напівпровіднику фотоелемента і впливає на перехідні процеси. Опір R_{PV} є внутрішнім опором джерела живлення і визначає його вольт-амперну характеристику. Опір R_{W-PV} і індуктивність L_{W-PV} є опором і індуктивністю контактних з'єднань відповідно [6], R_{W-L} – опір з'єднання лазера.

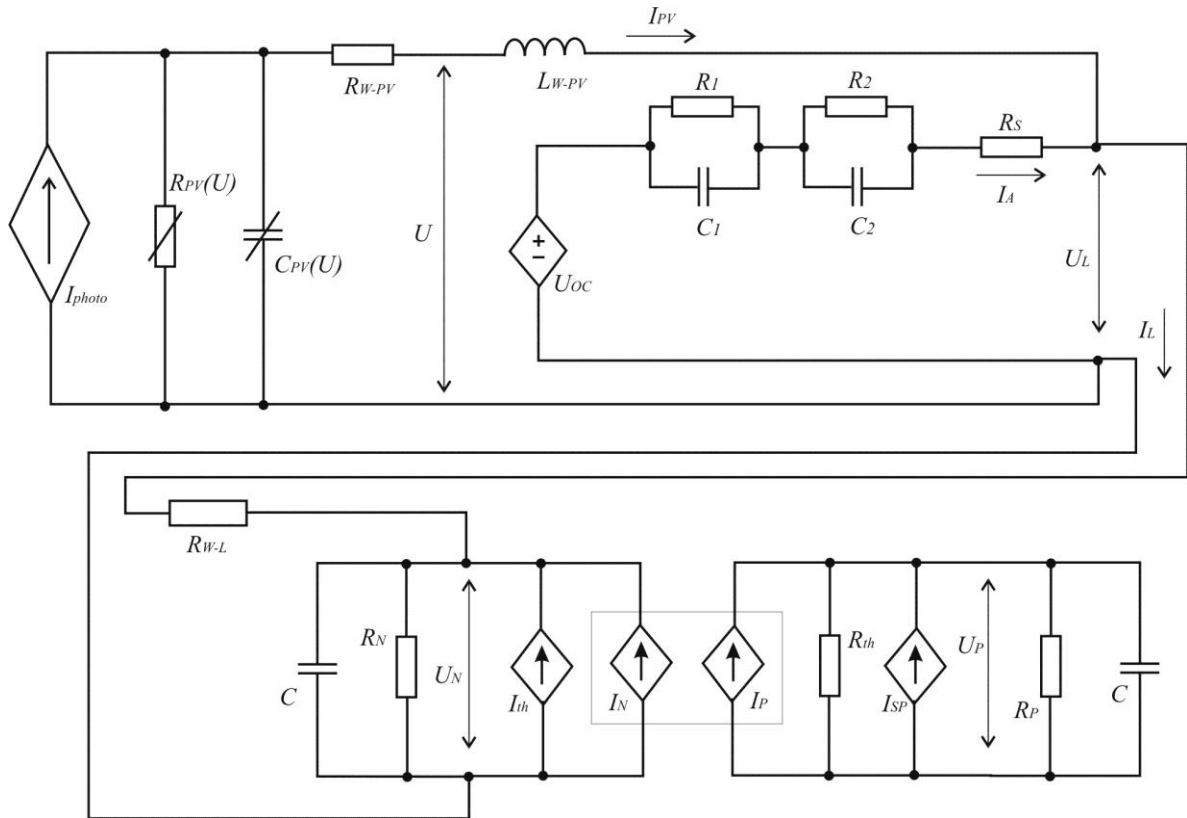


Рис. 5. Модель системи фотоелемент-акумулятор-лазер з нелінійними елементами.

Fig. 5. Model of system PVelement-accumulator-laser with nonlinear elements.

Математична модель, яка відповідає схемі заміщення, представленої на рис.5, має вигляд:

$$I_{PV} = I_{photo} - \frac{U}{R_{PV}(U)} - C_{pv}(U) \frac{dU}{dt}, \quad (9)$$

$$I_L = I_{PV} + I_A, \quad (10)$$

$$U_L = U_{OC} - U_{RC1} - U_{RC2} - I_A \cdot R_S, \quad (11)$$

$$I_A = C_2 \frac{dU_{RC2}}{dt} + \frac{U_{RC2}}{R_2}, \quad (12)$$

$$C_1 \frac{dU_{RC1}}{dt} + \frac{U_{RC1}}{R_1} = C_2 \frac{dU_{RC2}}{dt} + \frac{U_{RC2}}{R_2}, \quad (13)$$

$$U_L = I_L \cdot R_{W-L} + U_N, \quad (14)$$

$$C \frac{dU_N}{dt} = I - \frac{U_N}{R_N} - I_N + I_{th} \quad (15)$$

$$C \frac{dU_P}{dt} = I_P - \frac{U_P}{R_{th}} - \frac{U_P}{R_P} + I_{SP} \quad (16)$$

де U_{RC1} та U_{RC2} це напруги на RC-ланцюгах.

Висновок. Таким чином, використовуючи сучасні методи моделювання електричних схем, можна провести всебічне моделювання запропо-

нованих схем та отримати результати для аналізу різних режимів роботи оптоелектронного випромінювача, який живиться від фотоелемента та акумулятора, а також застосувати отримані результати при побудові сучасного електронного обладнання [7].

1. Бондаренко Д.В. Електричні схеми заміщення напівпровідникових електроінжекційних лазерів. Праці Інституту електродинаміки НАН України. Збірник наукових праць. 2000. С. 194-200.

2. Bondarenko D.V. Use of electrical equivalent circuits at simulation optoelectronic systems. 5th International Workshop on Laser and Fiber-Optical Networks Modeling. Proceedings of LFNМ. 2003. Pp. 72-74.

3. Bondarenko D.V. The equivalent electrical circuits of semiconductor lasers with quantum wells. 6th International Workshop on Laser and Fiber-Optical Networks Modeling. Proceedings of LFNМ. 2004. Pp. 125-127.

4. Бондаренко Д.В. Еквівалентні схеми акумуляторів електроенергії, які підключені до сонячних фотоелементів. Відновлювана енергетика. 2019. № 3. С. 30-34. doi: 10.36296/1819-8058.2019.3(58).30-34.

5. Бондаренко Д.В. Використання еквівалентних електричних схем для розрахунку перехідних процесів у колах з фотобатареєю та нелінійним оптоелектронним навантаженням. Праці Інституту електродинаміки НАН України. Збірник наукових праць. 2002. № 2. С. 13-15.

6. Бондаренко Д.В., Кудря Т.С., Ашуєва Т.Г. Електрична модель батареї сонячних елементів. Відновлювана енергетика. 2005. № 2. С. 21-25.

7. Бондаренко Д.В. Використання сонячних батарей для побудови автономних систем екологічного моніторингу. Відновлювана енергетика. 2015. № 3. С. 18-20.

REFERENCES

1. Bondarenko D.V. Electrychni shemy zamishchennia naprivprovidnykovykh electroinzhektsiynykh laseriv. [Electrical equivalent circuits of semiconductor injection lasers]. Proceedings of the Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine. Collection of scientific works. 2000. Pp. 194-200. [in Ukrainian].
2. Bondarenko D.V. Use of electrical equivalent circuits at simulation optoelectronic systems. 5th International Workshop on Laser and Fiber-Optical Networks Modeling. Proceedings of LFNМ. 2003. Pp. 72-74. [in English].
3. Bondarenko D.V. The equivalent electrical circuits of semiconductor lasers with quantum wells. 6th International Workshop on Laser and Fiber-Optical Networks Modeling. Proceedings of LFNМ. 2004. Pp. 125-127. [in English].
4. Bondarenko D.V. Ekvivalentni shemy akumuliatoriv elektroenergii yaki pidklucheni dosoniachnykh fotoelementiv. [Equivalent circuits of electric power accumulators connected to solar photocells]. Vidnovluvana energetika. 2019. No. 3. Pp. 30-34. doi: 10.36296/1819-8058.2019.3(58).30-34. [in Ukrainian].
5. Bondarenko D.V. Vykorystannia ekvivalentnykh elektrychnykh shem dlia rozrahunku perehidnykh protsesiv u kolah z fotobatareeiu ta neliniynym optoelekronnym navantazhenniam. [Using of equivalent electrical circuits for calculating transition processes in circles with pv-battery and nonlinear optoelectronic load]. Proceedings of the Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine. Collection of scientific works. 2002. No. 2. Pp. 13-15. [in Ukrainian].
6. Bondarenko D.V., Kudria T.S., Ashueva T.G. Electrychna model batarei soniachnykh elementiv. [Electrical model of solar cells battery]. Renewable energy. 2005. No. 2. Pp. 21-25. [in Ukrainian].
7. Bondarenko D.V. Vykorystannia soniachnykh batarei dlia pobudovy avtonomnykh system ekologichjnogo monitoryngu. [Useing of solar panels for the design of autonomous systems of environmental monitoring]. Vidnovluvana energetika. 2015. No. 3. Pp. 18-20. [in Ukrainian].

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТОЭЛЕКТРОННОЙ НАГРУЗКИ, КОТОРАЯ ПИТАЕТСЯ ОТ ФОТОЭЛЕМЕНТА И АККУМУЛЯТОРА

Д.В. Бондаренко, канд. техн. наук

Институт возобновляемой энергетики НАН Украины,
02094, ул. Гната Хоткевича 20а, г. Киев, Украина.

Целью работы является построение эквивалентной электрической схем оптоэлектронной нагрузки, которая питается от фотоэлемента и аккумулятора. В работе показана необходимость создания таких эквивалентных электрических схем, а именно при подключении светодиодов и полупроводниковых лазеров к солнечным фотоэлементам, в качестве источника электрической энергии, и при использовании аккумуляторов электроэнергии. Показано, что эквивалентные электрические схемы вытекают с физических явлений в полупроводниковых устройствах, и уравнений, которые описывают явления превращения электрической энергии в световую. Изложены разные эквивалентные схемы оптоэлектронной нагрузки. Показано, как простую, так и наиболее обобщенную эквивалентную электрические схемы. В частности, показано эквивалентную схему аккумулятора, и упрощенные схемы фотоэлемента и оптикоэлектронного излучателя света, где в качестве излучателя выступает светодиод. Отмечено, что развитием данной модели есть более обобщенная эквивалентная электрическая схема, где в качестве оптоэлектронной нагрузки выступает полупроводниковый инжекционный лазер. Расписаны их параметры и изложены уравнения для токов и напряжений. Также показано существование пассивных элементов в таких электрических схемах. Также показано, что в качестве схемы замещения фотоэлемента, в упрощенной модели, использован идеальный источник напряжения и резистор с конденсатором. В дальнейшем, в обобщенной модели, для более широкого моделирования работы фотоэлемента, в качестве схемы замещения был использован идеальный источник тока и нелинейные пассивные элементы. То есть, в результате, была получена обобщенная эквивалентная электрическая схема аккумулятора, который подключен к фотоэлементу и оптоэлектронной нагрузке. Построены уравнения для токов и напряжений в полученной схеме замещения. Сделан вывод. Библ. 7, рис. 5.

Ключевые слова: оптоэлектронная нагрузка, лазер, светодиод, эквивалентные схемы, электрическая модель, аккумулятор, солнечный фотоэлемент, моделирование.

Стаття надійшла до редакції 30.10.19
Остаточна версія 05.06.20