

Ромашко В.Я.Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Батрак Л.М.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ВПЛИВ ВИХІДНОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДЖЕРЕЛА НА ЙОГО ЕНЕРГЕТИЧНІ ПОКАЗНИКИ

Вихідна потужність реальних джерел електричної енергії залежить від їх внутрішнього опору та опору навантаження. У випадку їх рівності вихідна потужність джерела досягає максимального значення – точка максимальної потужності (ТМП) джерела. Для отримання від джерела максимальної кількості електричної енергії, бажано, щоб у процесі роботи його робоча точка перебувала в ТМП. Однак положення робочої точки на вихідній характеристиці джерела впливатиме на його енергетичні показники, зокрема на коефіцієнт використання електричної енергії. Якщо внутрішній опір джерела є лінійним, в ТМП його коефіцієнт використання електричної енергії дорівнює 50%, що для традиційних джерел недопустимо. В нетрадиційних та відновлюваних джерелах внутрішній опір, як правило, є нелінійним. Метою роботи є аналіз впливу внутрішнього опору джерела та характеру його вихідної характеристики на енергетичні показники джерела, зокрема на можливість та доцільність відбирання від такого джерела максимально можливої потужності. В роботі розглянуто два типи нелінійних вихідних характеристик джерел електричної енергії, які відрізняються характером зміни вихідного опору при змінах опору навантаження. Визначались координати ТМП джерела і проаналізовано залежність коефіцієнта використання електричної енергії від координат його ТМП. Показано, що в залежності від типу нелінійної вихідної характеристики джерела його коефіцієнт використання електричної енергії в ТМП може бути як більшим, так і меншим 50%. Відзначено, що при однаковій вихідній характеристиці, коефіцієнт використання електричної енергії в ТМП для джерела струму та напруги можуть відрізнятися. Показано, що при змінах опору навантаження джерела відносно його опору в ТМП, вихідна потужність буде зменшуватись, а швидкість її зменшення залежатиме від типу вихідної характеристики джерела.

Ключові слова: нелінійний внутрішній опір, вихідна характеристика джерела, коефіцієнт використання електричної енергії, відбирання максимальної потужності.

Постановка проблеми. Теорія електричних кіл оперує з ідеалізованими джерелами струму та напруги. Припускають, що внутрішній опір джерела напруги $r = 0$. Тому вихідна напруга такого джерела не залежатиме від його вихідного струму і залишатиметься постійною. Вважають, що вихідна потужність таких джерел є необмеженою [1]. Реальні джерела електричної енергії характеризуються наявністю в них деякого внутрішнього опору r . Тому вихідна потужність таких джерел завжди обмежується величиною цього опору. Їх вихідна напруга не є постійною і залежатиме від величини вихідного струму. Цю залежність описує вихідна характеристика джерела $U_{out} = f(I_{out})$. У загальному випадку крайніми режимами роботи джерела є режими холостого ходу та короткого замикання. У цих двох крайніх режимах вихідна потужність

джерела $P_{out} = 0$. В робочому режимі, який має місце між режимами холостого ходу і короткого замикання, вихідна потужність джерела буде змінюватись, досягаючи максимального значення в певній робочій точці. Ця точка на вихідній характеристика джерела називається його точкою максимальною потужності (ТМП) [2].

Для отримання від джерела максимальної кількості електричної енергії, бажано, щоб його робоча точка перебувала в ТМП. Однак, положення робочої точки на вихідній характеристиці джерела впливатиме на його енергетичні показники. Зокрема, на коефіцієнт використання електричної енергії $\eta = P_{out}/P_{source}$, який дорівнює відношенню вихідної потужності P_{out} до потужності P_{source} яку при цьому розвиває джерело. Різниця цих потужностей виділятиметься на внутрішньому опорі джерела, спричиняючи його нагрівання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Як відомо [1], у випадку лінійного внутрішнього опору джерела, в ТМП коефіцієнт використання його енергії $\eta = 50\%$, тобто половина енергії, що виробляється джерелом, розсіюється на його внутрішньому опорі. Для традиційних генераторів це недопустимо, внаслідок надмірного теплового режиму. Крім того, оскільки електричну енергію в традиційних джерелах отримують шляхом перетворення енергії певного енергоносія, який має відповідну вартість, його використання буде не ефективним. У зв'язку з цим, традиційні джерела електричної енергії, які переважно є джерелами напруги, працюють на ділянці вихідної характеристики з $\eta > 0,8 \dots 0,9$ [3].

В той же час для нетрадиційних та відновлюваних джерел електричної енергії вказані обмеження не є критичними. Часто енергоносії у відновлюваних джерелах є безкоштовним. Тому, навіть при порівняно невисокому η , від таких джерел доцільно намагатись відбирати максимально можливу потужність. Що стосується втрат енергії у самому джерелі, то багато нетрадиційних та відновлюваних джерел мають розподілену структуру і являють собою набір модулів порівняно невеликої потужності. У зв'язку з цим площа їх поверхності є достатньою для розсіювання тепла, що виділяється. Крім того, це тепло може бути використане у нетрадиційних джерелах електричної енергії типу термогенераторів [4, 5, 6, 7].

Більшість нетрадиційних та відновлюваних джерел електричної енергії мають нелінійний внутрішній опір. Відповідно вихідна характеристика таких джерел також є нелінійною. Причому ця нелінійність може бути різного виду.

Постановка завдання. Метою роботи є аналіз впливу внутрішнього опору джерела та характеру його вихідної характеристики на енергетичні показники джерела, зокрема на можливість відбирання від такого джерела максимально можливої потужності.

Виклад основного матеріалу. Якщо внутрішній опір джерела r є лінійним, його вихідний опір $r_{вих} = \Delta U_{вих} / \Delta I_{вих} = r$ і залишається постійним при змінах вихідного струму. Вихідна характеристика таких джерел являє собою пряму лінію, яка описується простим аналітичним виразом [8]

$$U_{вих} = U_{xx} - I_{вих} r, \quad (1)$$

де U_{xx} – напруга холостого ходу джерела.

Якщо ж внутрішній опір джерела є нелінійним, його вихідний опір буде змінюватись при

змінах вихідного струму. Найчастіше вольт-амперну характеристику (ВАХ) внутрішнього опору не вдається описати достатньо простим аналітичним виразом. В той же час вихідну характеристику джерела завжди можна визначити експериментально.

Маючи графік вихідної характеристики джерела (рис. 1а), ВАХ його внутрішнього опору r можна побудувати графічно (рис. 1б), використовуючи другий закон Кіргофа

$$U_{xx} = U_r(I) + U_R(I). \quad (2)$$

Тому, подальший аналіз здійснюватимемо з використанням вихідних характеристик джерел електричної енергії. За необхідності, ВАХ внутрішнього опору завжди можна визначити графічно.

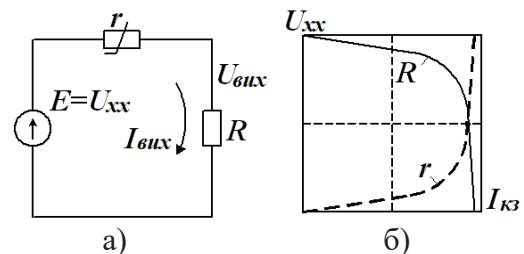


Рис. 1. Визначення ВАХ внутрішнього опору джерела напруги

Для спрощення аналізу і зручності практичного використання отриманих результатів, вихідні характеристики представимо в нормованому вигляді у відносних одиницях (рис. 2) де $U^* = U / U_{xx}$, $I^* = I / I_{kz}$; U_{xx} та I_{kz} , відповідно напруга холостого ходу та струм короткого замикання джерела.

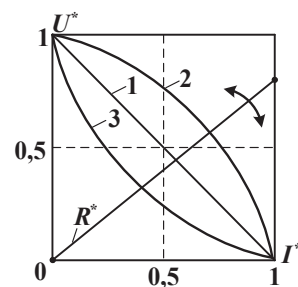


Рис. 2. Вихідні характеристики в нормованому вигляді

Проаналізуємо енергетичні характеристики джерел з трьома типами вихідних характеристик (рис. 2).

1. Лінійна вихідна характеристика, для якої при змінах опору навантаження R^* , вихідний опір джерела $r_{вих}^*$ залишається постійним.

2. Нелінійна вихідна характеристика, для якої зі зменшенням опору навантаження R^* , вихідний опір джерела $r_{\text{вих}}^*$ збільшується.

3. Нелінійна вихідна характеристика, для якої зі зменшенням опору навантаження R^* , вихідний опір джерела $r_{\text{вих}}^*$ також зменшується.

Особливістю нетрадиційних та відновлюваних джерел електричної енергії є те, що частина з цих джерел є джерелами напруги, а інша частина – джерелами струму. Крім того, дуже часто подібні джерела можуть працювати в широкому діапазоні зміни опору навантаження – практично від режиму холостого ходу до режиму короткого замикання. Подальший аналіз здійснюватимемо з урахування цих особливостей.

Лінійна вихідна характеристика 1-го типу

Пронормуємо по напрузі U_{xx} вихідну характеристику (1)

$$U / U_{xx} = 1 - Ir / U_{xx},$$

або

$$U^* = 1 - I^* \quad (3)$$

де $U_{xx} / r = I_{кз}$.

Аналогічно, вихідна характеристика джерела струму матиме вигляд

$$I = I_{кз} - U / r. \quad (4)$$

Пронормувавши по струму $I_{кз}$, одержимо вихідну характеристику джерела струму у відносних одиницях

$$I^* = 1 - U^*, \quad (5)$$

де $I_{кз} r = U_{xx}$.

При роботі з нормованими характеристиками використовують нормований опір

$$R^* = U^* / I^* = \frac{U}{I} \cdot \frac{I_{кз}}{U_{xx}} = \frac{R}{r}. \quad (6)$$

Очевидно, що нормоване значення внутрішнього опору джерела $r^* = r / r = 1$.

Використовуючи нормовані вихідні характеристики (3) та (5), опір навантаження джерела R^* можемо визначити, знаючи лише вихідну напругу джерела U^* або його вихідний струм I^*

$$R^* = U^* / I^* = U^* / (1 - U^*) = (1 - I^*) / I^*. \quad (7)$$

Відповідно, знаючи опір навантаження джерела R^* , можемо визначити його вихідну напругу U^* або струм I^* . З урахуванням (7)

$$U^* = R^* / (1 + R^*); \quad I^* = 1 / (1 + R^*) \quad (8)$$

Оцінимо енергетичні характеристики джерела з лінійним внутрішнім опором. Вихідну

потужність джерела P^* , можна визначити як

$$P^* = U^* I^* = U^* (1 - U^*) = (1 - I^*) I^*,$$

або

$$P^* = U^* - U^{*2} = I^* - I^{*2}. \quad (9)$$

В ТМП вихідна потужність джерела досягає максимального значення. Для визначення координат ТМП визначимо похідну P'^* і прирівняємо її до нуля

$$P'^* = 1 - 2U^* = 1 - 2I^* = 0. \quad (10)$$

Отже координати ТМП джерела з лінійним внутрішнім опором

$$U_{МП}^* = 0.5; \quad I_{МП}^* = 0.5. \quad (11)$$

Визначимо коефіцієнт використання електричної енергії джерела для випадків, коли джерело енергії є джерелом напруги (рис. 3 а) та джерелом струму (рис. 3 б)

$$\left. \begin{aligned} \eta_E &= \frac{U^* I^*}{1 \cdot I^*} = U^* \\ \eta_I &= \frac{U^* I^*}{U^* \cdot 1} = I^* \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

Отже, коефіцієнт використання електричної енергії джерела напруги співпадає з його відносною вихідною напругою, а джерела струму – з його відносним вихідним струмом.

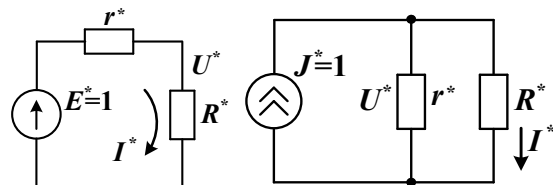


Рис. 3. а) джерело напруги, б) джерело струму

З урахуванням (11) робимо висновок, що при лінійному внутрішньому опорі як джерело напруги, так і джерело струму в ТМП мають $\eta_{ТМП} = 0.5$. Відмінність полягає в тому, що при $U^* > U_{МП}^*$ коефіцієнт η_E зменшуватиметься, а η_I зростатиме і навпаки.

Таким чином джерела струму та напруги з лінійним внутрішнім опором r матимуть однакову вихідну характеристику. Тому процеси у навантаженні таких джерел відрізнятися не будуть. В той же час внутрішні енергетичні процеси в самих джерелах, зокрема коефіцієнт використання електричної енергії, суттєво відрізнятимуться. На рис. 4 представлено графіки вихідної характеристики джерела з лінійним внутрішнім

опором $u^* = (\quad)$, графік залежності вихідної потужності $P^* = f(I^*)$, а також графік залежності $P^*/P_{МП}^* = f(I^*)$, які ілюструють результати проведеного аналізу.

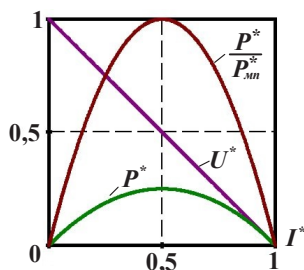


Рис. 4. Вихідна характеристика джерела з лінійним внутрішнім опором $U^* = f(I^*)$, залежності вихідної потужності $P^* = f(I^*)$ та $P^*/P_{МП}^* = f(I^*)$

Нелінійна вихідна характеристика 2-го типу

В принципі існує безліч вихідних характеристик такого типу. Щоб проаналізувати їх особливості, як приклад, розглянемо вихідну характеристику, що являє собою ділянку кола, яке описується достатньо простим нелінійним аналітичним виразом $U^{*2} + I^{*2} = 1$. Отже вихідна характеристика, яку аналізуємо

$$U^* = \sqrt{1 - I^{*2}}; \quad I^* = \sqrt{1 - U^{*2}}. \quad (13)$$

Щоб отримати на виході такого джерела напругу U^* , опір навантаження R^* має бути

$$R^* = U^* / I^* = U^* / \sqrt{1 - U^{*2}}. \quad (14)$$

Відповідно, щоб отримати вихідний струм I^*

$$R^* = U^* / I^* = \sqrt{1 - I^{*2}} / I^*. \quad (15)$$

Якщо опір навантаження R^* відомий, з урахуванням (14) можна визначити вихідну напругу джерела

$$U^* = R^* / \sqrt{1 + R^{*2}}. \quad (16)$$

Аналогічно, з урахуванням (15) можна визначити вихідний струм джерела

$$I^* = 1 / \sqrt{1 + R^{*2}}. \quad (17)$$

Вихідна потужність джерела, з урахуванням (13)

$$P^* = U^* I^* = U^* \sqrt{1 - U^{*2}} = \sqrt{U^{*2} - U^{*4}}. \quad (18)$$

Визначимо координату ТМП $U_{МП}^*$, в якій вихідна потужність досягає максимального значення $P_{МП}^*$. Очевидно, що в цій же точці досягає максимального значення і функція $P^{*2} = U^{*2} - U^{*4}$. Візьмемо похідну від цієї функції і порівняємо її до нуля

$$\frac{dP^{*2}}{dU^*} = 2U^* - 4U^{*3} = 0.$$

Отже $2U^{*2} = 1$

$$U_{МП}^* = \sqrt{0.5} = 0.707. \quad (19)$$

Аналогічно можна показати, що координата $I_{МП}^*$ також дорівнюватиме 0,707. Отже, для джерела з нелінійною вихідною характеристикою розглянутого типу, коефіцієнт використання електричної енергії в ТМП $\eta_{МПТ} = 0.707$ і буде однаковим, як для джерела напруги, так і для джерела струму. На рис. 5 представлено графіки вихідної характеристики джерела, а також графіки зміни його вихідної потужності, які ілюструють результати проведеного аналізу.

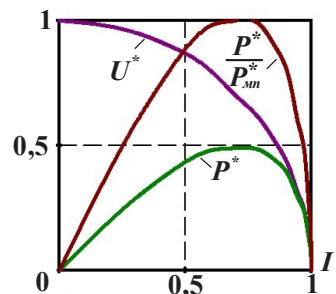


Рис. 5. Вихідна характеристика джерела та графік зміни вихідної потужності

Нелінійна вихідна характеристика 3-го типу

Як приклад, проаналізуємо вихідну характеристику, яка є симетричною до характеристики 2, відносно характеристики 1 (рис. 2). Ця характеристика також являє собою ділянку кола, яке описується наступним аналітичним виразом

$$(1 - U^*)^2 + (1 - I^*)^2 = 1. \quad (20)$$

Отже, вихідні характеристики цього джерела будуть такими

$$U^* = 1 - \sqrt{1 - (1 - I^*)^2}; \quad I^* = 1 - \sqrt{1 - (1 - U^*)^2}. \quad (21)$$

Наведені аналітичні вирази вихідної характеристики можна проаналізувати аналогічно до характеристики 2. Однак цю процедуру можна спростити. Введемо заміну $U_* = 1 - U^*$; $I_* = 1 - I^*$. При такій заміні формули для вихідних характеристик 2-го та 3-го типу матимуть однаковий вигляд. Отже, формули, отримані для характеристики 2, після відповідної заміни будуть дійсними і для характеристики 3.

Зокрема, відповідно до (19), координати ТМП для характеристики 3 $U_{МП}^* = 0.707$; $I_{МП}^* = 0.707$. Переходячи до дійсних параметрів отримуємо

$$1 - U_{МП}^* = 0.707; 1 - I_{МП}^* = 0.707.$$

Отже

$$U_{МП}^* = 1 - 0.707 = 0.293; I_{МП}^* = 1 - 0.707 = 0.293. \quad (22)$$

Відповідно, для джерела з розглянутою вихідною характеристикою, в ТМП коефіцієнт використання електричної енергії $\eta_{МП} = 0.293$ і буде однаковим для джерела напруги та джерела струму. На рис. 6 представлено графіки вихідної характеристики джерела, а також графіки зміни його вихідної потужності при зміні вихідного струму.

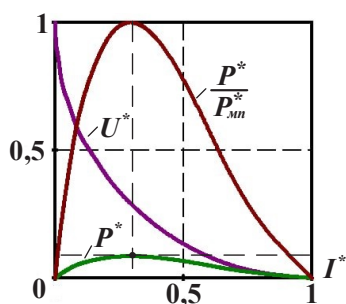


Рис. 6. Вихідна характеристика джерела та графік зміни вихідної потужності

Для джерел з розглянутими вихідними характеристиками, в ТМП коефіцієнт використання електричної енергії буде однаковим, як для джерела напруги, так і струму. Введемо параметр – опір навантаження в ТМП

$$R_{МП}^* = U_{МП}^* / I_{МП}^*. \quad (23)$$

Для розглянутих характеристик $R_{МП}^* = 1$. Зауважимо, що для джерел з лінійним внутрішнім опором $R_{МП}^*$ завжди дорівнює одиниці, тобто $R = r$. В той же час, для джерел з нелінійним внутрішнім опором, він може приймати різні значення, як більші, так і менші за одиницю. А це означає, що коефіцієнт використання електричної енергії в ТМП буде різним для джерела струму та напруги. Якщо $R_{МП}^* > 1$, $\eta_E > \eta_{\Sigma}$. Якщо ж $R_{МП}^* < 1$, $\eta_E < \eta_{\Sigma}$. Наприклад, координати ТМП сонячної батареї приблизно дорівнюють $U_{МП}^* \approx 0.8$; $I_{МП}^* \approx 0.9$ [9, 10, 11]. Отже $R_{МП}^* \approx 0.8 / 0.9 \approx 0.89 < 1$. Оскільки за своїм фізичним принципом дії сонячна батарея є джерелом струму, її коефіцієнт використання електричної енергії в ТМП $\eta_{\Sigma} \approx 0.9$.

Таким чином, на відміну від ідеальних, реальні джерела напруги та струму можуть мати однакову вихідну характеристику. У цьому випадку процеси в навантаженні джерела напруги та струму відрізнятися не будуть. В той

же час енергетичні процеси в самих джерелах відрізнятимуться суттєво. Зокрема, при наближенні до режиму холостого ходу $\eta_E \rightarrow 1$, а $\eta_{\Sigma} \rightarrow 0$, а при наближенні до режиму короткого замикання $\eta_E \rightarrow 0$, а $\eta_{\Sigma} \rightarrow 1$. Отже, коефіцієнт використання електричної енергії джерела в будь-якій робочій точці, у загальному випадку, залежатиме від того, що являє собою це джерело – джерело струму чи напруги.

Як зазначалося, джерело досягає ТМП за певної величини опору навантаження $R_{МП}^*$. При збільшенні або зменшенні R^* відносно $R_{МП}^*$ вихідна потужність джерела зменшуватиметься. Нехай допустимим є зменшення вихідної потужності на 10% відносно $P_{МП}^*$

$$\frac{P_{МП}^* - P^*}{P_{МП}^*} = 0.1.$$

Аналіз показує, що для джерел з різними типами вихідної характеристики допустима зміна опору R^* буде відрізнятися. В табл. 1 наведено чисельні значення максимально і мінімально допустимого опору R_{max}^* та R_{min}^* , а також допустимий діапазон його зміни $\Delta R^* = R_{max}^* - R_{min}^*$, за якого вихідна потужність джерела зменшиться не більше ніж на 10% відносно $P_{МП}^*$.

Таблиця 1

Допустима зміна опору навантаження R^*

Вихідна характеристика	R_{max}^*	R_{min}^*	ΔR^*
Нелінійна 2	1.6	0.65	0.95
Лінійна 1	1.85	0.55	1.3
Нелінійна 3	2.3	0.43	1.87

З табл. 1 випливає, що найменша допустима зміна опору R^* відповідає джерелам з вихідною характеристикою 2 типу, а найбільша – 3-го типу. Джерела з лінійною вихідною характеристикою 1-го типу займають проміжне положення. Це пов'язано з тим, що для характеристик 2-го типу зі зменшенням опору навантаження R^* , вихідний опір джерела зростатиме. Тому ТМП, для якої $R = r_{вих}$, буде пройдена швидше. Для характеристик 3-го типу зі зменшенням опору навантаження вихідний опір джерела також зменшуватиметься. Тому вихідна потужність джерела змінюватиметься повільніше. Очевидно, що для різних видів характеристик одного типу, допустимий діапазон зміни R^* буде відрізнятися. Наприклад, для вихідної характеристики джерела, яка описується експоненціальною функцією, допустимий діапазон

дорівнює $\Delta R^* = 2.31$. Таким чином, для забезпечення роботи джерела в околиці ТМП, при вихідних характеристиках 2-го типу допустима зміна опору навантаження є мінімальною, а для характеристик 3-го типу максимальною.

Проаналізовані вихідні характеристики описуються достатньо простими аналітичними виразами. Однак багато реальних нетрадиційних та відновлюваних джерел мають нелінійні вихідні характеристики, для описання яких необхідно використовувати значно складніші аналітичні вирази [12, 13, 14].

У зв'язку з цим вихідну характеристику джерела часто визначають експериментально. У таких випадках для дослідження цих джерел доцільно використовувати графоаналітичні методи. Методика досліджень може бути такою.

Шляхом зміни опору навантаження встановлюємо взаємозв'язок між вихідною напругою та струмом джерела $U_{вих} = f(I_{вих})$. У процесі вимірювань заповнюємо табл. 2.

Для кожної з n робочих точок обчислюємо опір навантаження, який відповідає цій робочій точці $R_i = U_i / I_i$, а також вихідну потужність $P_i = U_i I_i$.

Аналізуючи отримані результати виявляємо ТМП джерела, а також опір навантаження $R_{МП} = U_{МП} / I_{МП}$, за якого джерело живлення перебуватиме в ТМП.

Для спрощення аналізу отриманих результатів і можливості узагальнень, вихідну характеристику, а також опори та потужності доцільно представляти в нормованому вигляді. Крім того, таке представлення спрощує розрахунок

узгоджувального імпульсного регулятора для забезпечення відбирання максимальної потужності від джерела в широкому діапазоні змін опору навантаження [15].

Таблиця 2

Результати вимірювань

U	U _{xx}	U1	U2	...	U _{МП}	...	U _{n-1}	U _n	0
I	0	I1	I2	...	I _{МП}	...	I _{n-1}	I _n	I _{кз}
R=U/I	∞	R1	R2	...	R _{МП}	...	R _{n-1}	R _n	0
P=UI	0	P1	P2	...	P _{МП}	...	P _{n-1}	P _n	0

Висновки. В джерелах струму та напруги з лінійним внутрішнім опором координати ТМП є однаковими $U_{МП}^* = I_{МП}^* = 0.5$. При цьому коефіцієнт використання електричної енергії джерела $\eta_E = \eta_{\Sigma} = 50\%$.

В джерелах електричної енергії з нелінійним внутрішнім опором координати ТМП по струму та напрузі можуть відрізнятися. У таких випадках коефіцієнт використання електричної енергії джерела струму та напруги матимуть різні значення.

В джерелах з нелінійною вихідною характеристикою 2-го типу в ТМП коефіцієнт використання електричної енергії, як правило, більше 50%, а з характеристикою 3-го типу – менше 50%.

В ТМП опір навантаження джерела $R^* = R_{МП}^*$. При змінах опору R^* відносно $R_{МП}^*$ вихідна потужність джерела зменшуватиметься. Швидкість зменшення вихідної потужності dP^*/dR^* буде найбільшою для джерел з нелінійною вихідною характеристикою 2-го типу і найменшою для джерел з характеристикою 3-го типу.

Список літератури:

1. Панченко С.В., Ананьєва О.М., Бабаєв М.М. та ін. Теорія електричних і магнітних кіл: підручник. 2-ге вид. Харків, 2020. 246 с. ISBN 978-617-654-135-6.
2. Baba A.O., Liu G., Chen X. Classification and evaluation review of maximum power point tracking methods. *Sustainable Futures*. 2020. Vol. 2. Article ID: 100020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sft.2020.100020>
3. Glisson T.H. Introduction to Circuit Analysis and Design. Dordrecht, 2011. 768 p.
4. Patel J., Singh M. Thermoelectric Generators. *Open Science Journal*. 2021. URL: <https://surl.li/unumtp>
5. Champier D. Thermoelectric generators: A review of applications. *Energy Conversion and Management*. 2017. Vol. 140. P. 167–181. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.02.070>.
6. Tang Z.B., Deng Y.D., Su C.Q., Shuai W.W., Xie C.J. A research on thermoelectric generator's electrical performance under temperature mismatch conditions for automotive waste heat recovery system. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2015. Vol. 5. P. 143–150. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.csite.2015.03.006>.
7. Fernández-Yáñez P., Romero V., Armas O., Cerretti G. Thermal management of thermoelectric generators for waste energy recovery. *Applied Thermal Engineering*. 2021. Vol. 196. Article ID: 117291. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117291>.
8. Гончаров Ю.П., Будьонний О.В., Морозов В.Г., Панасенко М.В., Ромашко В.Я., Руденко В.С. Перетворювальна техніка: підручник. У 2 ч. Ч. 2. Харків, 2000. 360 с. ISBN 966-03-0697-0.
9. Ромашко В.Я., Батрак Л.М., Абакумова О.О. Регулювальна характеристика понижувального імпульсного регулятора, який заряджає батарею від сонячної батареї. *Електротехніка та електромеханіка*. 2020. № 2. С. 64–67. DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2020.2.10>.

10. Вербицький Є.В., Ромашко В.Я. Особливості знаходження точки максимальної потужності сонячної батареї методами холостого ходу та короткого замикання. *Електроніка та зв'язок*. 2013. № 5(76). С. 13–18. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/9948>.
11. Faranda R., Leva S. Energy comparison of MPPT techniques for PV systems. *WSEAS Transactions on Power Systems*. 2008. Vol. 3, № 5. P. 446–455. URL: <https://surl.li/bfxhly>
12. Rahma E., Brahim B., Smail M. A particle swarm optimization-based maximum power point tracking algorithm for PV Systems. *Studies in Engineering and Exact Sciences*. 2024. Vol. 5, № 2. e11181. DOI: <https://doi.org/10.54021/seesv5n2-577>.
13. Farzinnia M., Farhadi-Kangarlu M. Application of an Exact MPPT Method to Track the Global Maximum Power Point of PV Arrays. *Proc. of 10th Iranian Conf. on Renewable Energy & Distributed Generation (ICREDG2023)*, Shahrood, Iran. 2023. URL: <https://surl.lu/urmnj>
14. Álvarez J.M., [et al.] Analytical modeling of current-voltage photovoltaic performance: an easy approach to solar panel behavior. *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11, № 9. Article ID: 4250. DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/app11094250>.
15. Ромашко В.Я., Батрак Л.М. Особливості роботи імпульсних регуляторів у режимі максимального відбору потужності: монографія. Київ: НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського»; Дніпро: Середняк Т.К., 2024. 162 с. ISBN 978-617-8139-54-4.

Romashko V.Ya., Batrak L.M. THE INFLUENCE OF THE SOURCE'S OUTPUT CHARACTERISTICS ON ITS ENERGY PERFORMANCE

The output power of real sources of electric energy depends on their internal resistance and load resistance. In the case of their equality, the output power of the source reaches its maximum value – the maximum power point (MPP) of the source. To obtain the maximum amount of electric energy from the source, it is desirable that its operating point be in the MPP during operation. However, the position of the operating point on the source output characteristic will affect its energy indicators, in particular, electrical energy utilization factor. If the internal resistance of the source is linear, in the MPP its electrical energy utilization factor is 50%, which is unacceptable for traditional sources. In non-traditional and renewable sources, the internal resistance is usually nonlinear. The goal of the work is to analyze the influence of the internal resistance of the source and the nature of its output characteristic on the energy indicators of the source, in particular, on the possibility and feasibility of extracting the maximum possible power from such a source. The work considers two types of nonlinear output characteristics of electric energy sources, which differ in the nature of the change in output resistance when the load resistance changes. The coordinates of the MPP of the source were determined and the dependence of the electrical energy utilization factor, on the coordinates of its MPP was analyzed. It is shown that depending on the type of nonlinear output characteristic of the source, its electrical energy utilization factor, in the MPP can be either greater or less than 50%. It is noted that with the same output characteristic, the electrical energy utilization factor, in the MPP for the current and voltage source may differ. It is shown that when the load resistance of the source changes relative to its resistance in the MPP, the output power will decrease, and the rate of its decrease will depend on the type of output characteristic of the source.

Key words: nonlinear internal resistance, source output characteristic, electrical energy utilization factor, maximum power extraction.