

Самойлик Олександр Васильович, канд. тех. наук, доцент, тел. 067-739-45-96, smsm@ukr.net,
Курбака Галина Василівна, старший викладач, тел. 067-345-06-67, kyrbaka77@mail.ru
Дудник Максим Віталійович магістр кафедри електротехнічних систем,
 Черкаський державний технологічний університет; м. Черкаси, б-р. Шевченка, 460

АНАЛІЗ БАЛАНСУ ПОТУЖНОСТІ ЛОКАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ НА БАЗІ ПОНОВЛЮВАЛЬНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ ТА АКУМУЛЯТОРНИХ БАТАРЕЙ

У статті розглянуто підходи щодо оптимізації параметрів електрогенеруючого комплексу, побудованого на базі вітроенергетичних установок (ВЕУ), сонячних електростанцій (СЕС) на базі фотоелектричних панелей і малих гідроелектростанцій (МГЕС), розташованих в заданій географічній точці місцевості і призначених для електропостачання підприємств обмеженої потужності. Наведено аналіз їх працездатності в різних режимах експлуатації і при визначених характеристиках системи акумуляування. Досліджено систему, яка включає електрогенеруючі компоненти, компоненти акумуляування і скидання електроенергії, а також підприємство обмеженою потужності. Зв'язок між компонентами здійснено за допомогою контролера (системи управління), що реагує їх на поточний стан. Вхідними енергетичними потоками системи є енергії вітру, сонячного випромінювання і водяного потоку, що перетворюються відповідно вітроелектричними генераторами, фотоелектричними перетворювачами і гідроелектричними генераторами. Потоки електроенергії після перетворення і стабілізації направляються споживачу, надлишки – в систему акумуляування енергії. Частина енергії, яку неможливо акумуляувати, в силу обмеженості ємності акумуляторних батарей або перевищення допустимого значення струму заряду, перетворюється на теплову енергію, наприклад, за допомогою системи баластних опорів (СБО) і розсіюється. Якщо згенерованої енергії недостатньо, то системі управління надходить інформаційний сигнал про необхідність підключення до електропостачання підприємства системи акумуляування. Наведено аналіз балансу потужностей в системі автономного електропостачання підприємства обмеженою потужністю. Отримано аналітичні співвідношення та створено математичну модель системи автономного електропостачання підприємства з використанням джерел альтернативної енергетики.

Ключові слова: Система акумуляування електроенергії; баланс потужностей; енергетичний баланс.

Самойлик Александр Васильевич, канд. тех. наук, доцент, тел. 067-739-45-96, smsm@ukr.net,
Курбака Галина Васильевна, старший преподаватель, тел. 067-345-06-67, kyrbaka77@mail.ru
Дудник Максим Витальевич магистр кафедры электротехнических систем,
 Черкасский государственный технологический университет, г. Черкассы, б-р. Шевченко, 460

АНАЛИЗ БАЛАНСА МОЩНОСТИ ЛОКАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ НА БАЗЕ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ И АКУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ

В статье рассмотрены подходы к оптимизации параметров электрогенерирующего комплекса, построенного на базе ветроэнергетических установок (ВЭУ), солнечных электростанций (СЭС) на базе фотоэлектрических панелей и малых гидроэлектростанций (МГЭС), расположенных в заданной географической точке местности и предназначенных для электроснабжения предприятий ограниченной мощности. Приведен анализ их работоспособности в различных режимах эксплуатации и при определенных характеристиках системы аккумулярования. Исследована система, которая включает электрогенерирующие компоненты, компоненты аккумулярования и сброса электроэнергии, а также предприятие ограниченной мощности. Связь между компонентами осуществлено при помощи контроллера (системы управления), что реагирует их текущее состояние. Входными энергетическими потоками системы энергии ветра, солнечного излучения и водяного потока, что превращаются соответственно ветроэлектрическими генераторами, фотоэлектрическими преобразователями и гидроэлектрическими генераторами. Потоки электроэнергии после преобразования и стабилизации направляются потребителю, излишки – в систему аккумулярования энергии. Часть энергии, которую невозможно аккумуляровать, в силу ограниченности емкости аккумуляторных батарей или превышения допустимого значения тока заряда, превращается в тепловую энергию, например, с помощью системы балластных сопротивлений (СБО) и рассеивается. Если сгенерированной энергии недостаточно, то системе управления поступает информационный сигнал о необходимости подключения к электроснабжению предприятия системы аккумулярования. Приведен анализ баланса мощностей в системе автономного электроснабжения предприятия ограниченной мощности. Получены аналитические соотношения и создана математическая модель системы автономного электроснабжения предприятия с использованием источников альтернативной энергетики.

Ключевые слова: Система аккумулярования электроэнергии; баланс мощностей; энергетический баланс.

Samojlyk Oleksandr Vasylovych, Ph.D., associate professor, phone number 067-739-45-96, smsm@ukr.net
Kurbaka Galyna Vasylivna, senior lecturer, phone number 067-345-06-67, kurbaka77@mail.ru
Dudnyk Maksym Vitalijovych, holder of a Master's degree of electrical systems chair
Cherkasy State Technological University, Cherkasy, Shevchenko blvd, 460

ANALYSIS OF LOCAL POWER SUPPLY SYSTEM POWER BALANCE BASED ON RENEWABLE ENERGY SOURCES AND STORAGE BATTERIES

In the article the approaches to parameter optimization power generation system, based on the wind turbines (wind turbines), solar power plants (SPP) on the basis of photovoltaic panels and small hydroelectric plants (SHP) located in the specified geographical location and is intended for power supply of enterprises of limited power. The analysis of their performance in various operating modes and certain characteristics of the system of accumulation. Researched system that includes a power generating components, the components of accumulation and discharge of electricity, and also the enterprise of limited power. Communication between components implemented by the controller (control system) that reacts to their current state. Input energy flows of the system of wind energy, solar radiation and water flow, which become respectively droelectric generators, photoelectric converters and generators toelectricity. The flow of electricity after the conversion and stabilization are directed to the consumer surplus in the energy storage system. The part of energy that cannot be accumulated, because of limited battery capacity or it exceeds the maximum value of the charging current turns into heat energy, for example, using a system of ballast resistors (SBO) and scatters. If the generated energy is insufficient, the control system receives the information signal about the need to connect to the electricity supply enterprises of the system of accumulation. The analysis of the balance of power in the auxiliary power supply of the enterprises of limited power. The proposed analytical relations and the mathematical model of a system of Autonomous power supply of the enterprise with the use of sources of alternative energy.

Keywords: energy storage system; power balance; energy balance

Вступ

Одним із напрямків модернізації вітчизняної електроенергетики є активне впровадження децентралізованої генерації (ДГ), у тому числі на основі поновлюваних джерел енергії (ПДЕ) [1]. Децентралізовані системи електропостачання найбільш ефективні для забезпечення електричною енергією наступних груп споживачів: індивідуальні споживачі невеликої потужності від одиниць до десятків кВт (метеостанції, вежі стільникового зв'язку, фермерські господарства, прикордонні, пости і тощо); групові непромислові споживачі встановленою потужністю від десятків до сотень кВт (об'єкти соціальної сфери, торгіві, підприємства і установи охорони здоров'я тощо); промислові підприємства з встановленою потужністю від сотень до тисяч кВт (головним чином підприємства нафтогазодобувної галузей). При використанні енергетичних комплексів (ЕК) на базі різних видів ПДЕ актуальною стає оптимізація режимів роботи складових комплексу [2, 3]. Враховуючі наявний технічний гідровітросонячний потенціал регіонів України [4], найбільш ефективним представляється енергетичний комплекс (ЕК), що складається з мікрогідроелектростанції (МГЕС), вітроелектростанції (ВЕС), сонячної електростанції (СЕС).

Постановка задачі

Використання енергетичних установок на основі ПДЕ в малих автономних енергосистемах утруднене відсутністю у них можливостей забезпечення гарантованого енергопостачання. Подолання цієї проблеми забезпечується застосуванням акумуляторів електроенергії.

Метою дослідження є оптимізація параметрів електрогенеруючого комплексу, побудованого на базі вітроенергетичних установок (ВЕУ), сонячних електростанцій (СЕС) на базі фотоелектричних панелей і малих гідроелектростанцій (МГЕС), розташованого в заданій географічній точці місцевості і призначеного для електропостачання підприємств обмеженою потужності; аналіз його працездатності в різних режимах експлуатації і при визначених характеристиках системи акумуляування - акумуляторних батареях.

Предмет дослідження даної статті – система, що зображена на рис. 1, яка включає електрогенеруючі компоненти, компоненти акумулювання і скидання електроенергії, а також підприємство обмеженою потужності. Зв'язок між компонентами здійснюється за допомогою контролера (системи управління), що реагує їх на поточний стан.

Метою дослідження є: аналіз балансу потужностей в системі автономного електропостачання (рис. 1) підприємства обмеженою потужності; отримання аналітичних співвідношень для створення математичної моделі системи автономного електропостачання підприємства з використанням джерел альтернативної енергетики. отримання аналітичних співвідношень для створення математичної моделі системи автономного електропостачання підприємства з використанням джерел альтернативної енергетики.

Наявність або відсутність окремих електрогенеруючих компонентів визначає структуру системи. Параметрами системи є кількісний склад і властивості кожного з її компонентів. Стан компонента, – є деяка функція часу, що залежить від його параметрів і впливів з боку інших компонентів.

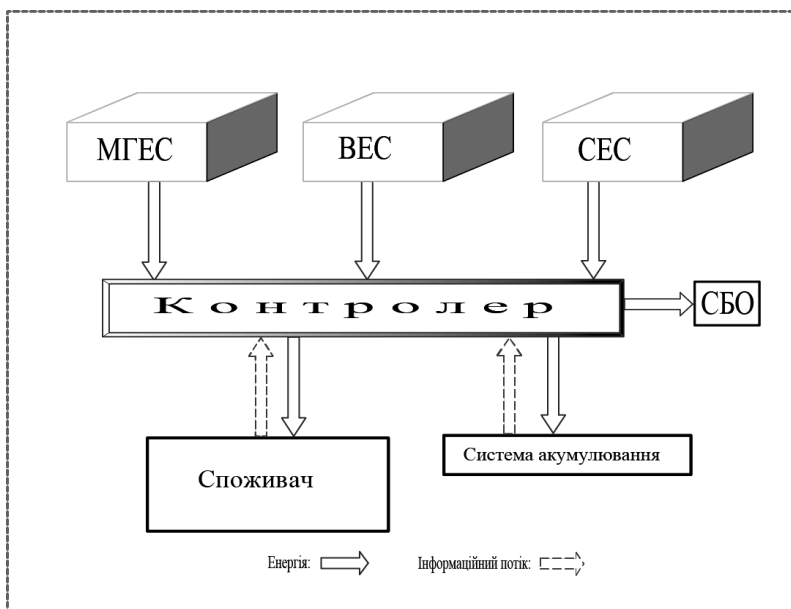


Рис. 1. Енергетичні потоки в системі автономного електропостачання підприємства обмеженою потужності: МГЕС – мікрогідроелектростанція, ВЕС – вітроелектростанція, СЕС – сонячна електростанція, СБО – система баластних опорів

Вхідними енергетичними потоками системи є енергії вітру, сонячного випромінювання і водяного потоку, що перетворюються відповідно вітроелектричними генераторами, фотоелектричними перетворювачами і гідроелектричними генераторами. Потоки електроенергії після перетворення і стабілізації направляються споживачу, надлишки – в систему акумулювання енергії. Частина енергії, яку неможливо акумулювати, в силу обмеженості ємності акумуляторних батарей або перевищення допустимого значення струму заряду, перетворюється на теплову енергію, наприклад, за допомогою системи баластних опорів (СБО) і розсіюється. Якщо згенерованої енергії недостатньо, то системі управління надходить інформаційний сигнал про необхідність підключення до електропостачання підприємства системи акумулювання. Основний показник працездатності системи електропостачання – можливість забезпечення підприємства електроенергією потужністю не нижче необхідної:

$$P_{Г} + P_{а} \geq P_{СП} \cdot k_{з}, \tag{1}$$

де $P_{Г}$ – потужність, що генерується спільно всіма типами джерел енергії, Вт;

P_a – потужність акумульована, Вт; $P_{СП}$ – потужність, що необхідна приймачу (споживачеві), Вт; k_3 – коефіцієнт запасу.

Ефективність електрогенеруючого комплексу, в загальному випадку, – цілий набір значень показників, що визначають не тільки його працездатність, а й надійність, характеристики економічного плану: вартість, собівартість електроенергії, термін окупності, площа розміщення, зручність обслуговування і багато іншого. Рішення завдання проектування дійсно ефективного електрогенеруючого комплексу, може бути здійснено тільки шляхом застосування методів моделювання і оптимізації, що спираються на сучасні комп'ютерні технології [5]. Вважаючи систему автономного електропостачання підприємства, представлену на рис. 1 замкнутої, можна стверджувати, що сума потужностей джерел електричної енергії повинна дорівнювати сумі потужностей, які витрачаються в приймачах цієї енергії за вирахуванням втрат внаслідок її передачі і різного роду перетворень. Джерелами енергії в даній системі є пристрої, що використовують енергію вітру, сонячного випромінювання і водяного потоку для генерації електричного струму. Споживач – підприємство обмеженою потужності і баластний опір.

Система акумулювання електроенергії, в залежності від кількісного співвідношення вироблюваної і споживаної енергії, може виступати як в ролі її джерела, так і приймача. Відповідно, на практиці можливі такі варіанти руху енергетичних потоків, що визначають баланс потужностей в даній системі автономного електропостачання підприємства:

1. Потужність електроенергії (P_G), що генерується в будь-який момент часу (t), з розглянутого часового відрізка (T), з урахуванням втрат, більше потужності, що необхідна підприємству ($P_{СП}$).

Кількість енергії, можливе для збереження в поточний момент часу (t) визначається двома параметрами: «вільною» ємністю системи акумулювання (Θ_a) і максимальним значенням струму заряду (I_3). Якщо значення ємності акумулятора одно C_a , то

$$C_a \cdot (1 - k_p) \geq \Theta_a, \quad (2)$$

де k_p – коефіцієнт допустимого розряду акумулятора (зазвичай $k_p \approx 0,2$).

На рис. 2 представлено баланс потужностей в системі автономного електропостачання підприємства в режимі зарядки акумулятора; тут P_6 – потужність, що виділяється на системі баластних опорів (СБО).

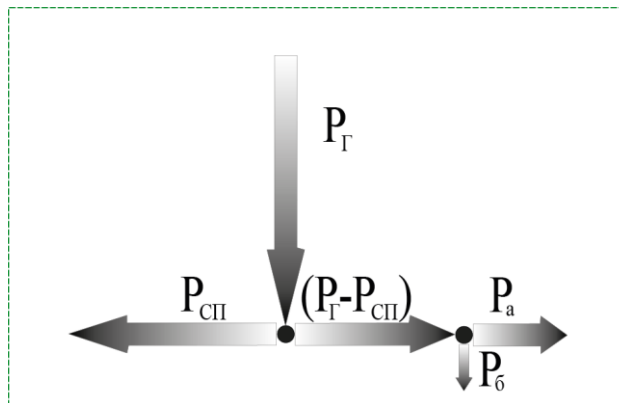


Рис. 2. Баланс потужностей в системі автономного електропостачання підприємства в режимі зарядки акумулятора

Таким чином, математичне вираження для розрахунку балансу потужностей при $P_a = P_\Gamma - \frac{P_{СП}}{\chi} \geq 0$ відповідно до рис. 2 матиме вигляд:

$$\begin{cases} P_a \cdot t \leq \Theta_a \cdot U_a \cdot k_a; \\ I_a = \frac{P_a}{N_a \cdot U_a} \leq I_3, \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \Theta_a^k = \Theta_a - \frac{P_a \cdot t}{U_a} \eta; \\ P_6 = 0 \end{cases}, \quad (3)$$

$$\begin{cases} P_a \cdot t \leq \Theta_a \cdot U_a \cdot \eta; \\ I_a = \frac{P_a}{N_a \cdot U_a} > I_3, \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \Theta_a^k = \Theta_a - I_3 \cdot t \cdot \eta; \\ P_6 = P_a - I_3 \cdot U_a \end{cases}, \quad (4)$$

$$\begin{cases} P_a \cdot t \geq \Theta_a \cdot U_a \cdot \eta; \\ I_a = \frac{P_a}{N_a \cdot U_a} \leq I_3, \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \bar{\Theta}_a = 0; \\ P_6 = P_a - \frac{\Theta_a \cdot U_a}{\eta \cdot t} \end{cases}, \quad (5)$$

$$\begin{cases} P_a \cdot t \geq \Theta_a \cdot U_a \cdot \eta; \\ I_a = \frac{P_a}{N_a \cdot U_a} > I_3, \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \Theta_a^k = \Theta_a - I_3 \cdot t \cdot \eta; \\ P_6 = (P_a - I_3 \cdot U_a) \end{cases}, \quad (6)$$

де N_a – кількість акумуляторних батарей, з'єднаних паралельно;
 U_a – напруга заряду однієї акумуляторної батареї, В;
 I_a – струм заряду однієї акумуляторної батареї, А;
 $\eta < 1$ – ККД акумулятора;
 Θ_a і Θ_a^k – початкове і кінцеве значення «вільної» ємності системи акумуляування, А·год;
 P_a – надлишок потужності, частина якої може бути акумуляована або розсіяна баластним навантаженням, Вт;
 $\chi < 1$ – ККД інвертора.

1. Потужність електроенергії (P_Γ), що генерується в будь-який момент часу (t) з розглянутого часового відрізка (T) з урахуванням втрат, менше потужності, необхідної підприємству ($P_{СП}$). Дефіцит потужності повинен бути заповнений, якщо це можливо, з системи акумуляування електроенергії (рис. 3).

Математичний опис балансу потужностей при $P_a = P_\Gamma - \frac{P_{СП}}{\chi} < 0$, відповідно до рис. 3:

$$\begin{cases} |P_a| \cdot t \leq [(1 - k_p) \cdot C_a - \Theta_a] \cdot U_a; \\ I_a = \frac{|P_a|}{N_a \cdot U_a} \leq I_p, \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \Theta_a^k = \Theta_a + \frac{|P_a| \cdot t}{U_a} \Psi_p(I_a); \\ \bar{C}_a = (1 - k_p) \cdot C_a - \Theta_a^k > 0 \end{cases}, \quad (7)$$

де I_p – максимально допустимий струм розряду акумулятора, А;
 $\Psi_p(I_a)$ – деяка коригувальна функція струму розряду в ланцюзі системи акумуляування, значення якої ≥ 1 ;
 \bar{C}_a – поточна ємність акумулятора, А·год.

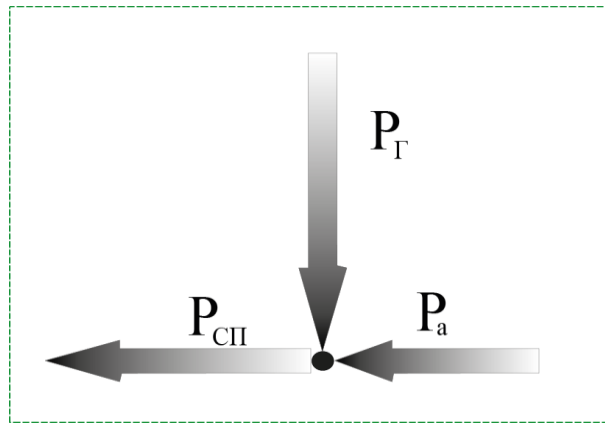


Рис. 3. Баланс потужностей в системі автономного електропостачання підприємства в режимі розрядки акумуляторів: P_{Γ} – потужність електроенергії, що генерується в будьякий момент; $P_{СП}$ – потужність споживача; $P_{а}$ – надлишок потужності, частина якої може бути акумульована

Значення параметрів I_p і \bar{C}_a визначають працездатність системи електропостачання підприємства.

Найважливішими характеристиками системи акумулювання є її ємність, швидкість акумуляції (заряду) і параметри віддачі електроенергії (розряду). Останні з одного боку обмежуються гранично допустимі значення струмів заряду (I_3) і розряду (I_p), з іншого – залежністю значення реальної ємності деяких з систем акумулювання від величини струму розряду.

Сумарна потужність (1) в загальному випадку є функцією часу, значення якої доступні в дискретних точках t_i , заданих через постійні часові проміжки:

$$\Delta T = t_{i+1} - t_i = \text{const.} \quad (8)$$

Тоді, вважаючи що функція $P_{\Gamma}(t)$ на відріжку часу ΔT змінюється за лінійним законом від значення P_1 до P_2 , а споживана потужність $P_{СП}$ постійна, матимемо такі вирази для розрахунку надлишкової $W_{\text{над}}$ і відсутньої $W_{\text{від}}$ енергії при наступних чотирьох можливих варіантах співвідношень між значеннями P_1 , P_2 і $P_{СП}$:

$$1) \quad P_1 \geq \frac{P_{СП}}{\chi}, \quad P_2 \geq \frac{P_{СП}}{\chi}, \quad \begin{cases} W_{\text{над}} = \frac{P_1 + P_2 - \frac{2P_{СП}}{\chi}}{2} \cdot \Delta T; \\ W_{\text{від}} = 0 \end{cases} \quad (9)$$

$$2) \quad P_1 < \frac{P_{СП}}{\chi}, \quad P_2 < \frac{P_{СП}}{\chi}, \quad \begin{cases} W_{\text{від}} = \frac{\frac{2P_{СП}}{\chi} - P_1 - P_2}{2} \cdot \Delta T; \\ W_{\text{над}} = 0 \end{cases} \quad (10)$$

$$3) \quad P_1 > \frac{P_{СП}}{\chi}, \quad P_2 < \frac{P_{СП}}{\chi}, \quad \left\{ \begin{array}{l} W_{над} = \frac{\left(P_1 - \frac{P_{СП}}{\chi}\right)^2}{2(P_1 - P_2)} \cdot \Delta T \\ W_{від} = \frac{\left(P_2 - \frac{P_{СП}}{\chi}\right)^2}{2(P_1 - P_2)} \cdot \Delta T \end{array} \right. ; \quad (11)$$

$$4) \quad P_1 < \frac{P_{СП}}{\chi}, \quad P_2 > \frac{P_{СП}}{\chi}, \quad \left\{ \begin{array}{l} W_{над} = \frac{\left(P_2 - \frac{P_{СП}}{\chi}\right)^2}{2(P_2 - P_1)} \cdot \Delta T \\ W_{від} = \frac{\left(P_1 - \frac{P_{СП}}{\chi}\right)^2}{2(P_2 - P_1)} \cdot \Delta T \end{array} \right. . \quad (12)$$

Рисунок 4 ілюструє розглянуті 4 варіанти.

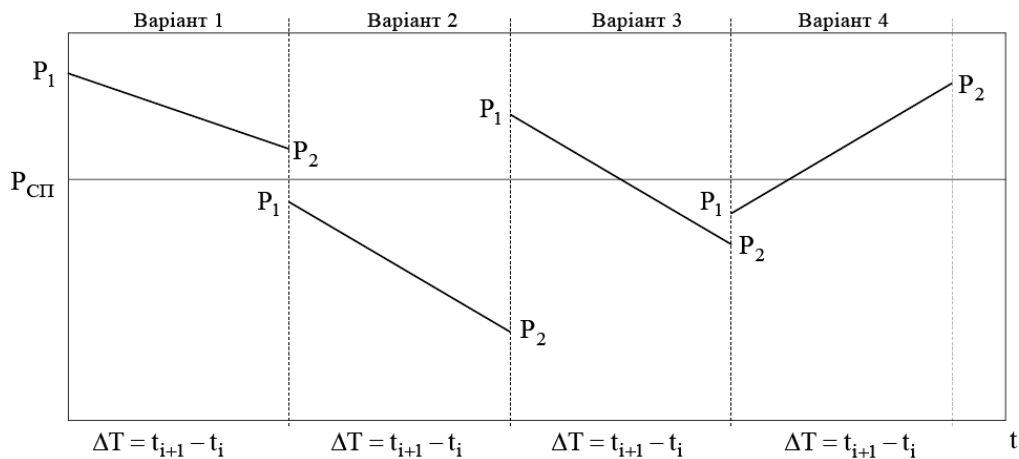


Рис. 4. Можливі варіанти співвідношень між значеннями P_1 , P_2 і $P_{СП}$

Таким чином, на часовому відрізку $[t_i, t_{i+1}]$ $i=0,1,2...m$ значення потужності, надлишкової $\Delta W_i \geq 0$ або відсутньої $\Delta W_i < 0$, відповідно до залежностями (9) – (12), дорівнює:

$$\Delta W_i = W_{н} - W_{в}, \quad (13)$$

де i – порядковий номер часового відрізка.

Якщо $\Delta W_i \geq 0$, то частина надлишкової енергії $\Delta \Theta_a \cdot \Delta T_i$ може бути акумульована:

$$\Delta \Theta_{ai} = \Theta_{ai} - \Theta_{ai}^k, \quad (14)$$

а решта – розсіяна.

При цьому енергетичний баланс системи описується таким співвідношенням:

$$\Delta \Theta_{ai} \cdot U_a + P_{бі} \cdot \Delta T = \Delta W_i, \quad (15)$$

де Θ_{ai} , Θ_{ai}^k , $P_{\sigma i}$ – визначаються з рівнянь (3) – (6) з урахуванням наступних рівностей:

$$P_a = \frac{\Delta W_i}{\Delta T}, \quad P_{\sigma i} = P_{\sigma}, \quad \Delta T = t. \quad (16)$$

Якщо $\Delta W_i < 0$, то інша частина енергії $\Delta \Theta_a \cdot \Delta T_i$ повинна бути заповнена з системи акумулювання. Рівняння енергетичного балансу системи в цьому випадку:

$$\frac{\Delta W_i}{\Delta T} = \Delta \Theta_a \cdot \Delta T_i, \quad (17)$$

де Θ_{ai} – може бути знайдена з рівнянь (7) з урахуванням (16).

Співвідношення (15) і (17) представляють математичну модель системи автономного електропостачання підприємства з використанням джерел альтернативної енергетики. Рішення задачі моделювання передбачає реалізацію послідовності математичних розрахунків, відповідно до розробленої методики, для m часових точок t_1, t_2, \dots, t_m , якими розбиває досліджуваний проміжок часу T ($m-1$) інтервал.

Висновки

Отримані співвідношення (15) і (17), що представляють математичну модель системи автономного електропостачання підприємства з використанням джерел альтернативної енергетики.

Проведено аналіз балансу потужностей в системі автономного електропостачання з використання ПДЕ для підприємства обмеженої потужності.

Список використаних джерел:

1. Праховник А. В. Интегрированное ресурсное планирование энергозабезпечення [Електронний ресурс] / А. В. Праховник, О. В. Кулик. – Режим доступу : http://esco-ecosys.narod.ru/2006_5/art_09.doc.
2. Агроскин В. Распределённая генерация, перспективы и проблемы [Електронний ресурс] / В. Агроскин // ЭСКО / Електронний журнал енергосервісної компанії «Екологічні системи». – 2003. – № 7 (19). – Режим доступу до журн. : http://esco-ecosys.narod.ru/2003_7.
3. Кириленко О. В. Технічні аспекти впровадження джерел розподільної генерації в електричних мережах [Текст] / О. В. Кириленко, В. В. Павловський, Л. М. Лук'яненко // Технічна електродинаміка. – К.: Інститут електродинаміки НАН України, 2011. – № 1 – С. 46–53.
4. Атлас енергетичного потенціалу відновлюваних та нетрадиційних джерел енергії. – К.: Інст. возобновляемой энергетике НАНУ. – 2005. – 44 с.
5. Кельтон, В. Имитационное моделирование. Классика CS /В. Кельтон, А. Лоу. 3-е изд. – СПб.: Киев, Издательская группа BHV, 2004. – 847 с.

Referenses:

1. Prakhovnyk A. V. Intehrovane resursne planuvannia enerhozabezpechennia [Elektronnyi resurs] / A. V. Prakhovnyk, O. V. Kulyk. – Rezhym dostupu : http://esco-ecosys.narod.ru/2006_5/art_09.doc.
2. Ahroskyn V. Raspredeľnaia heneratsyia, perspektivy y problemy [Elektronnyi resurs] / V. Ahroskyn // ЭСКО / Elektronnyi zhurnal enerhoservisnoi kompanii «Ekolohichni systemy». – 2003. – № 7 (19). – Rezhym dostupu do zhurn. : http://esco-ecosys.narod.ru/2003_7.
3. Kyrylenko O. V. Tekhnichni aspekty vprovodzhennia dzherel rozpodilnoi heneratsii v elektrychnykh merezhakh [Tekst] / O. V. Kyrylenko, V. V. Pavlovskiy, L. M. Lukianenko // Tekhnichna elektrodynamika. – K.: Instytut elektrodynamiky NAN Ukrainy, 2011. – № 1 – S. 46–53.
4. Atlas enerhetychnoho potentsialu vidnovliuvanykh ta netradytsiinykh dzherel enerhii. – K.: Ynst. vobnovliaemoi enerhetyky NANU. – 2005. – 44 s.
5. Kelton, V. Ymytatsyonnoe modelyrovanye. Klassyka CS /V. Kelton, A. Lou. 3-e yzd. – SPb.: Kyev, Yzdatelskaia hruppa BHV, 2004. – 847 s.

Прийнято до друку 12.11. 2019 р.