

УДК 620.98

М. В. Кубкін, асист., В. П. Солдатенко, асист.

Кіровоградський національний технічний університет

Імітаційна модель комбінованої електроенергетичної системи з відновлюваними джерелами енергії

В статті наведені імітаційні моделі елементів комбінованої електроенергетичної системи, також її загальна імітаційна модель в середовищі Simulink. Запропонована модель дає можливість досліджувати режими роботи комбінованої енергосистеми протягом певних інтервалів часу (доба, місяць, рік). Отримані результати полегшують вибір оптимального складу обладнання та доцільних режимів роботи.

імітаційна модель, відновлювані джерела енергії, комбінована електроенергетична система

Вступ. Постановка задачі. Потреби людства в енергії задовольняються в наш час, головним чином, шляхом використання звичайного палива (в основному природного газу, нафти і кам'яного вугілля), ядерного палива та потенційної енергії води. Вказані джерела енергії, окрім останнього, є не відновлюваними. Обсяги використання звичайного і ядерного палива з кожним роком зростають, отже їх запаси стрімко скорочуються.

Спалювання звичайних видів палива призводить до забруднення довкілля. Атомна енергетика теж потенційно небезпечна. Гідроенергія річок хоча і є відновлюваною, але її використання, особливо на рівнинних ріках, супроводжується величезними безповоротними втратами земель сільськогосподарського призначення (в Україні — це прекрасні чорноземи).

Виходом із цього загрозливого становища є поступова відмова від традиційних не відновлюваних джерел енергії на користь відновлюваних джерел — енергії сонячного випромінювання, вітрової енергії, хімічної енергії відновлюваних вуглеводневих матеріалів, таких як деревина, опале листя, промислові та побутові відходи, які містять в собі горючі складові, і якими можна скористатися як сировиною для виробництва, наприклад, біогазу.

Так «Енергетичною стратегією України до 2030 року» [1] у перспективі передбачено значне збільшення частки відновлюваних джерел енергії в енергетичному балансі України.

Проте, використання відновлюваних джерел енергії має істотні особливості, як то: нерівномірний географічний розподіл, непостійність в часі, мала питома концентрація енергетичних ресурсів [2–4]. Саме тому і виникає необхідність використання кількох різномірних джерел електричної енергії, систем акумуляування та резервного електроживлення.

Відтак актуальною задачею є синтез так званих комбінованих електроенергетичних систем і аналіз їхньої роботи. Враховуючи широкую різноманітність обладнання установок відновлюваної енергетики (вітрогенератори, фотоелектричні батареї, акумулятори тощо), можна розробити безліч енергетичних систем різноманітних за комбінацією джерел. Особливий інтерес викликає динаміка роботи таких енергосистем протягом року. Виникає ряд питань, на які слід дати відповідь: скільки електричної енергії зможе забезпечити певне джерело енергії, яку

емність пристрою акумулювання варто обрати, яку потужність та енергію необхідно резервувати в період відсутності потоків відновлюваної енергії, чи здатна система забезпечити баланс електричної енергії в комбінованій енергосистемі кожної години протягом року при заданих показниках якості електроенергії та надійності енергопостачання?

Дати відповідь на вищевикладені питання дозволяє проведення моделювання роботи комбінованої енергосистеми за допомогою імітаційної моделі.

Метою даної роботи є: 1) розробка імітаційної моделі комбінованої електроенергетичної системи з відновлюваними джерелами енергії; 2) проведення моделювання роботи елементів та енергосистеми в цілому; 3) аналіз роботи елементів енергосистеми.

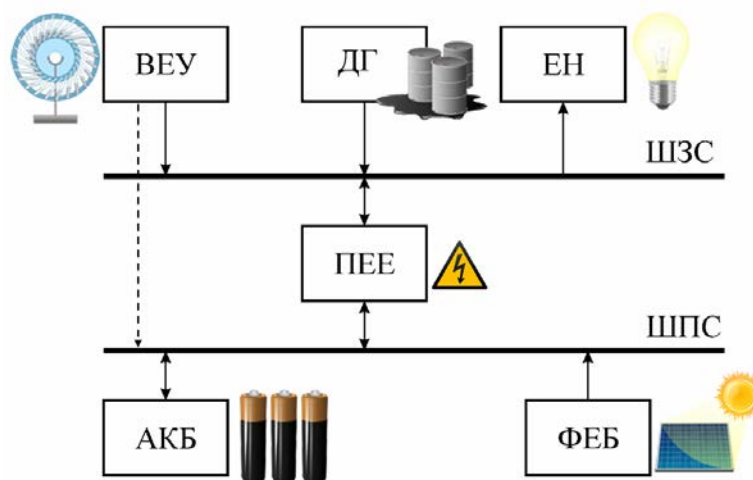


Рисунок 1 — Структурна схема комбінованої енергосистеми

В рамках поставленої мети виділяються наступні **задачі роботи:** 1) розробка математичних та імітаційних моделей фотоелектричної батареї, вітроелектричної установки, акумуляторної батареї, дизель-генератора з електричним генератором, загальної імітаційної моделі комбінованої енергосистеми; 2) моделювання роботи енергосистеми протягом однієї доби.

Математична модель фотоелектричної батареї. Потужність фотоелектричної батареї (ФЕБ) при стандартних умовах (густина потоку сонячного випромінювання $I_{\text{СУ}} = 1 \text{ кВт/м}^2$, температура поверхні ФЕБ $\vartheta_{\text{ФЕБ}} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$) називається *номінальною потужністю*. Вихідна потужність ФЕБ при іншій густині потоку сонячного випромінювання $\bar{I}_{\beta}(t)$ буде пропорційна останній [5]:

$$P_{\text{ФЕБ}}(t) = P_{\text{ФЕБном}} \frac{\bar{I}_{\beta}(t)}{I_{\text{СУ}}}, \quad (1)$$

де $P_{\text{ФЕБ}}(t)$ — вихідна потужність ФЕБ;

$P_{\text{ФЕБном}}$ — номінальна потужність ФЕБ при стандартних умовах;

$k_{\text{з.е.}}$ — коефіцієнт зниження ефективності ФЕБ;

$\bar{I}_{\beta}(t)$ — середнє значення густини потоку сонячного випромінювання, яке потрапляє на поверхню ФЕБ за годинний інтервал;

I_{cy} — густина потоку сонячного випромінювання, яке потрапляє на поверхню ФЕБ при стандартних умовах.

Втрати потужності в елементах ФЕБ враховуються коефіцієнтом зниження ефективності ФЕБ $k_{\text{з.е.}}$. Таким чином остаточною математичною моделлю ФЕБ буде:

$$P_{\text{ФЕБ}}(t) = P_{\text{ФЕБном}} k_{\text{з.е.}} \frac{\bar{I}_{\beta}(t)}{I_{\text{cy}}}. \quad (2)$$

В моделі (2) не враховано вплив температури оточуючого середовища на вихідну потужність ФЕБ.

На рис. 2 наведено імітаційну модель ФЕБ в середовищі Simulink згідно (2).

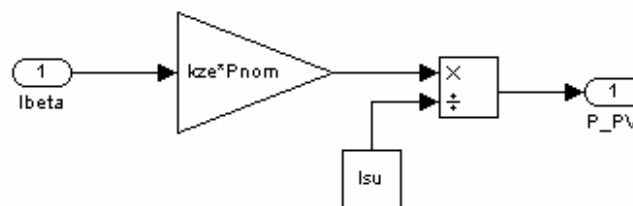


Рисунок 2 — Імітаційна модель ФЕБ

Математична модель вітроелектричної установки. Потужність, що віддається вітроенергетичною установкою (ВЕУ) в мережу, залежить від швидкості вітру, висоти мачи, на якій встановлено генератор, та вихідної характеристики генератора [6]. Так як швидкість повітря біля поверхні землі залежить від висоти, а потужність, що віддається вітрогенератором, залежить від кубу швидкості руху повітряних мас, висота мачи суттєво впливає на вихідну потужність. При розрахунку вихідної потужності ВЕУ дані вимірювання середньогодинної швидкості повітря необхідно привести до висоти установки вітрогенератора.

Найчастіше для перерахунку швидкості повітря з висоти установки анемометра на задану висоту (висоту установки вітрогенератора) використовують наступні закони:

а) логарифмічний:

$$u_h = u_{\text{анем}} \frac{\ln \frac{h}{z_0}}{\ln \frac{h_{\text{анем}}}{z_0}}, \quad (3)$$

де u_h — швидкість повітря на висоті h ;

$u_{\text{анем}}$ — швидкість повітря на висоті установки анемометра $h_{\text{анем}}$;

z_0 — параметр нерівномірності поверхні землі (за табл. 1);

б) потенційний:

$$u_h = u_{\text{анем}} \left(\frac{h}{h_{\text{анем}}} \right)^\alpha, \quad (4)$$

де α — показник степеня, який залежить від нерівномірності поверхні землі (табл. 2).

Зазвичай вихідна характеристика потужності ВЕУ задається парами експериментальних точок $\{u_i, P_{\text{ВЕУ} \text{ } \text{cy}_i}\}$, які знімаються при стандартній температурі та тиску ($p_0 = 101,325 \text{ кПа}$, $T_0 = 288,15 \text{ К}$). Для знаходження значень потужності в проміжних точках використовують різного роду інтерполяцію експериментальних точок (наприклад, кусково-лінійну, сплайнову тощо).

Таблиця 1 — Параметри нерівномірності поверхні землі [7]

Характер поверхні	$z_0, \text{ м}$
Відкрита спокійна вода; гладкий лід	$10^{-6} — 10^{-4}$
Сніг; рівнина за відсутності рослинності	$2 \cdot 10^{-4} — 5 \cdot 10^{-3}$
Відкрита рівнина, трава висотою 0,2 м; невелика кількість окремих перешкод	0,01 — 0,03
Низькі посіви; трава висотою 0,25 — 1 м; окремі великі перешкоди	0,04 — 0,1
Високі посіви; розосереджені перешкоди: $15 \leq x/h < 20$	0,25
Паркова зона, кущі, велика кількість перешкод: $x/h=10$	0,5
Однорідні великі перешкоди: $x/h \ll 10$ (ліс, передмістя з низькими будівлями)	0,03
Поля засіяні зерновими культурами	0,5 — 5,0
Центр міста з високими та низькими будівлями	1,0 — 6,0

Примітка: h — висота перешкод, x — відстань між ними.

Таблиця 2 — Значення коефіцієнта α в залежності від нерівності поверхні [8]

Характер поверхні	α
Море, озеро, рівний ґрунт	0,10
Низька трава на рівній поверхні землі	0,15
Високі зернові, живопліт, кущі	0,20
Лісиста сільська місцевість з великою кількістю дерев	0,25
Невеличке місто з малою кількістю деревами та кущами	0,30
Міська територія з високими будівлями	0,40

Імітаційна модель ВЕУ, приведена на рис. 3. В якості інтерполятора вихідної характеристики використано блок кусково-лінійної інтерполяції.

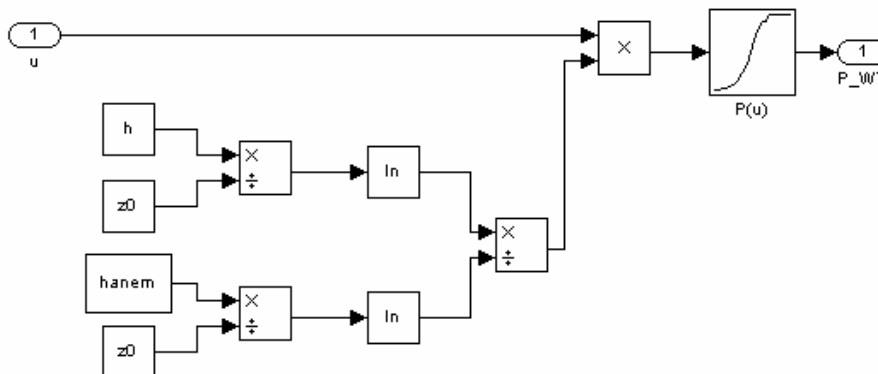


Рисунок 3 — Імітаційна модель ВЕУ

Математична модель акумуляторної батареї. Рівняння динаміки акумуляторної батареї (АБ) в кінцевих приростах [9]:

$$g_{AB}(t + \Delta t) = g_{AB}(t)(1 - \sigma\Delta t) + [P_{зар}(t)\eta_{зар} - P_{розр}(t)\eta_{розр}] \Delta t, \quad (5)$$

де g_{AB} — заряд АБ;

σ — коефіцієнт саморозряду;

$P_{зар}(t)$, $P_{розр}(t)$ — потужності заряду та розряду відповідно;

$\eta_{зар}$, $\eta_{розр}$ — ККД заряду та розряду відповідно;

Δt — інтервал часу.

Прийmemo $\eta_{зар} = \eta_{розр} = \eta_s$ і, ввівши позначення $P_{\Delta}(t) = P_{зар}(t) - P_{розр}(t)$, отримаємо:

$$g_{AB}(t + \Delta t) = g_{AB}(t)(1 - \sigma\Delta t) + P_{\Delta}(t)\eta_s\Delta t. \quad (6)$$

В (6) величина $P_{\Delta}(t)$ буде додатною в разі заряду та від'ємною в разі розряду.

Виконавши для (6) граничний перехід та провівши перетворення, отримаємо рівняння динаміки АБ в диференційній формі:

$$\frac{d}{dt} g_{AB}(t) = -g_{AB}(t)\sigma + P_{\Delta}(t)\eta_s. \quad (7)$$

Застосувавши до (7) перетворення Лапласа, отримаємо рівняння динаміки АБ в операторній формі:

$$s g_{AB}(s) = -g_{AB}(s)\sigma + P_{\Delta}(s)\eta_s.$$

Звідки можна визначити передавальну функцію АБ:

$$W_{AB}(s) = \frac{P_{\Delta}(s)}{g_{AB}(s)} = \frac{\eta_s}{s + \sigma}. \quad (8)$$

Для представлення останнього рівняння у вигляді структурної схеми поділимо чисельник і знаменник правої частини (8) на s :

$$W_{AB}(s) = \frac{\frac{\eta_s}{s}}{\frac{s + \sigma}{s}} = \frac{\eta_s}{1 + \sigma \frac{1}{s}}. \quad (9)$$

Рівнянню (9) буде відповідати структурна схема, наведена на рис. 4.

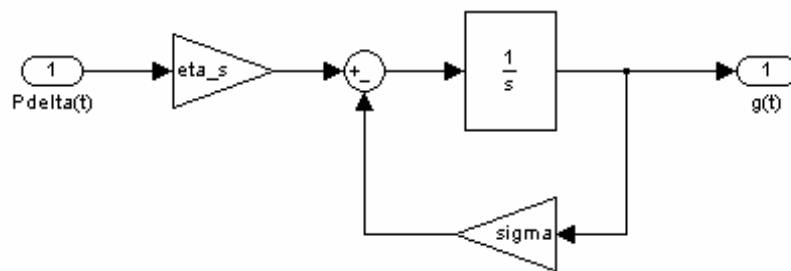


Рисунок 4 — Імітаційна модель ідеалізованої акумуляторної батареї

Так як АБ має певний початковий заряд g_0 , а на режим роботи накладаються обмеження на рівень заряду (обмеженнями на струм розряду нехтуємо):

$$g_{\text{АБmin}} \leq g_{\text{АБ}}(t) \leq g_{\text{АБmax}}, \quad (10)$$

де g_{min} — мінімальний рівень заряду АБ, який нормується виробником;

g_{max} — максимальний рівень заряду АБ;

то остаточно структурна схема імітаційної моделі АБ буде відповідати такій, що зображена на рис. 5, де інтегратор замінено на інтегратор з насиченням (верхня межа кривої насичення відповідає рівню g_{max} , нижня — g_{min}) та введено сталу інтегрування, що відповідає значенню g_0 .

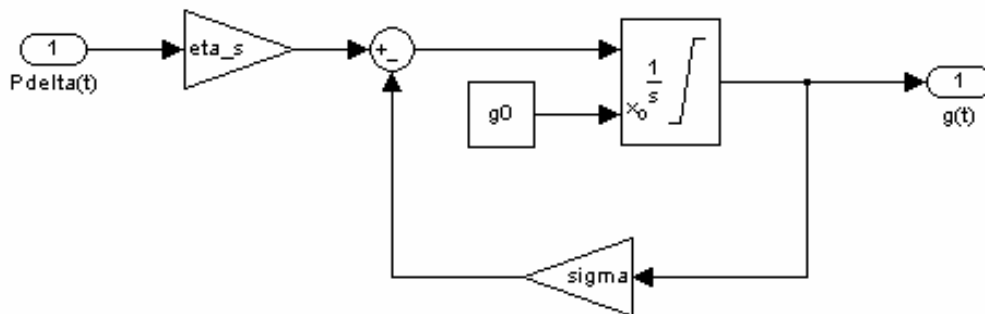


Рисунок 5 — Імітаційна модель акумуляторної батареї

Математична модель дизель-генератора. При моделюванні роботи генератора електричної енергії з дизель-генератором (ДГ) найважливішими параметрами моделі є:

а) годинна витрата палива під час роботи m , л/год;

б) ККД дизель-генератора $\eta_{\text{ДГ}}$.

Як правило в технічних даних на ДГ з генератором приводяться:

а) номінальна потужність ДГ $P_{\text{ДГном}}$, кВт;

б) об'єм паливного баку V_6 , л;

в) годинна витрата палива при 25%, 50%, 75% та 100% навантаженні відповідно $m_{25\%}$, $m_{50\%}$, $m_{75\%}$ та $m_{100\%}$, л/год.

Для можливості визначення витрати палива при інших завантаженнях за координатами чотирьох точок можна шляхом апроксимації підібрати параболічну функцію, яка буде проходити через ці точки:

$$m(P_{\text{ДГ}}) = m_0 + m_1 \left(\frac{P_{\text{ДГ}}}{P_{\text{ДГном}}} \right) + m_2 \left(\frac{P_{\text{ДГ}}}{P_{\text{ДГном}}} \right)^2, \quad (11)$$

де m — годинна витрата палива, л/год;

m_2, m_1, m_0 — коефіцієнти апроксимації, л/год;

$P_{\text{ДГ}}$ — поточне електричне навантаження генератора, кВт;

$P_{\text{ДГном}}$ — номінальна потужність генератора, кВт.

Основною характеристикою дизель-генератора є коефіцієнт корисної дії, для визначення якого можна скористатися формулою, що запропонована в [10]:

$$\eta_{\text{ДГ}} = \frac{P_{\text{ДГ}}}{Qm} \cdot 100\%, \quad (12)$$

де $\eta_{\text{ДГ}}$ — коефіцієнт корисної дії генератора, %;

$P_{\text{ДГ}}$ — потужність ДГ, кВт;

Q — теплота згорання палива, кВт·год/л (для дизельного палива — 10,08 кВт·год/л, для бензину — 9,43 кВт·год/л);

m — витрата палива, л/год.

З урахуванням викладеного запропонована модель дизель-генератора, яка наведена на рис. 6. Для знаходження витрати палива за весь період роботи ДГ в моделі використовується інтегратор.

При складанні моделі було враховано те, що ДГ, який встановлено в комбінованій системі, виконує функцію джерела безперебійного живлення, і його потужність обирається з урахуванням максимальної потужності споживача.

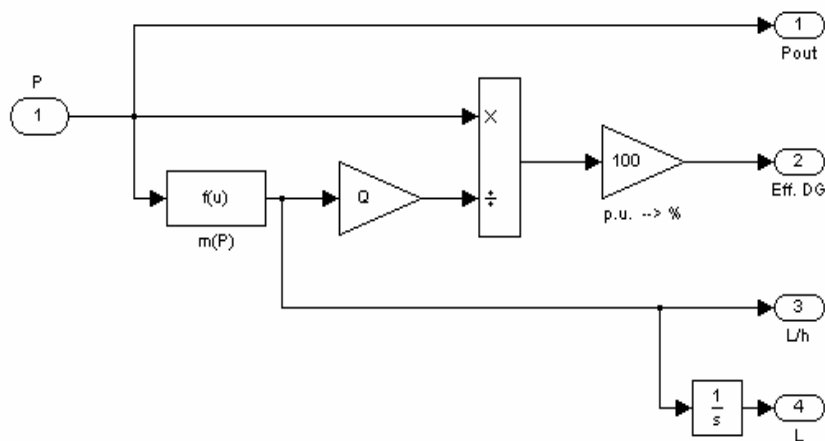


Рисунок 6 — Імітаційна модель дизель-генератора

Стратегія керування зарядом акумуляторної батареї та роботою дизель-генератора. Потужність, що поступає до акумуляторної батареї або відбирається з неї, визначається різницею потужностей джерел енергії (ФЕБ та ВЕУ) і потужністю споживання:

$$\Delta P(t) = [P_{\text{ФЕБ}}(t) + P_{\text{ВЕУ}}(t)] - P_{\text{спож}}(t), \quad (13)$$

де $P_{\text{ФЕБ}}(t), P_{\text{ВЕУ}}(t)$ — поточні потужності ФЕБ та ВЕУ відповідно;
 $P_{\text{спож}}(t)$ — поточна потужність споживання.

Очевидно, що ΔP буде приймати як додатні значення (потужність джерел енергії більше за потужність споживання, тобто є *надлишок* енергії) так і від’ємні (потужність споживання більше за наявну потужність джерел енергії, тобто існує *дефіцит* енергії). В першому випадку надлишок енергії необхідно акумулювати, в другому — дефіцит енергії необхідно компенсувати за рахунок акумулятора, а якщо він розряджений — за рахунок ДГ. Так як на ступінь заряду АБ накладаються обмеження (10), то потужність що приймає (відає) АБ, буде визначатись наступним чином (крок моделювання $\Delta t = 1$):

$$P_{\text{АБ}}(t) = \begin{cases} \Delta P(t), & \text{якщо } g_{\text{АБmin}} - g_{\text{АБ}}(t) \leq \Delta P(t)\Delta t \leq g_{\text{АБmax}} - g_{\text{АБ}}(t); \\ \frac{1}{\Delta t} [g_{\text{АБmax}} - g_{\text{АБ}}(t)], & \text{якщо } \Delta P(t)\Delta t > g_{\text{АБmax}} - g_{\text{АБ}}(t); \\ \frac{1}{\Delta t} [g_{\text{АБmin}} - g_{\text{АБ}}(t)], & \text{якщо } \Delta P(t)\Delta t < g_{\text{АБmin}} - g_{\text{АБ}}(t). \end{cases} \quad (14)$$

Надлишок потоку енергії, який не може бути накопиченим в АБ (при $g_{\text{АБ}}(t) = g_{\text{АБmax}}$):

$$P_{\text{excess}}(t) = \Delta P(t) - P_{\text{АБ}}(t). \quad (15)$$

Дефіцит потужності, який не може компенсувати АБ (при $g_{\text{АБ}}(t) = g_{\text{АБmin}}$):

$$P_{\text{unmet}}(t) = |\Delta P(t) - P_{\text{АБ}}(t)|. \quad (16)$$

По суті $P_{\text{unmet}}(t)$ буде являться потужністю, яку забезпечує ДГ.

Враховуючи зазначене, імітаційна модель, що реалізує алгоритм керування (14), (15), (16) наведена на рис. 7.

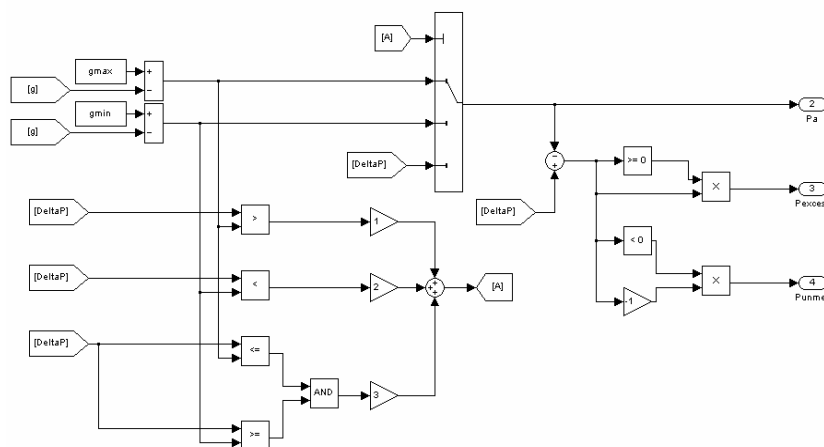


Рисунок 7 — Імітаційна модель алгоритму керування акумуляторною батареєю та роботою дизель-генератора

Імітаційна модель комбінованої електроенергетичної системи. На рис. 8 наведено імітаційну модель комбінованої електроенергетичної системи, структурна схема якої зображена на рис. 1. При побудові моделі в середовищі Simulink були знехтувані втрати в інверторі/випрямлячі. Для знаходження кількості електроенергії, яка генерувалась та споживалась елементами енергосистеми, використовувались блоки інтеграторів. Параметри імітаційної моделі задані в табл. 3.

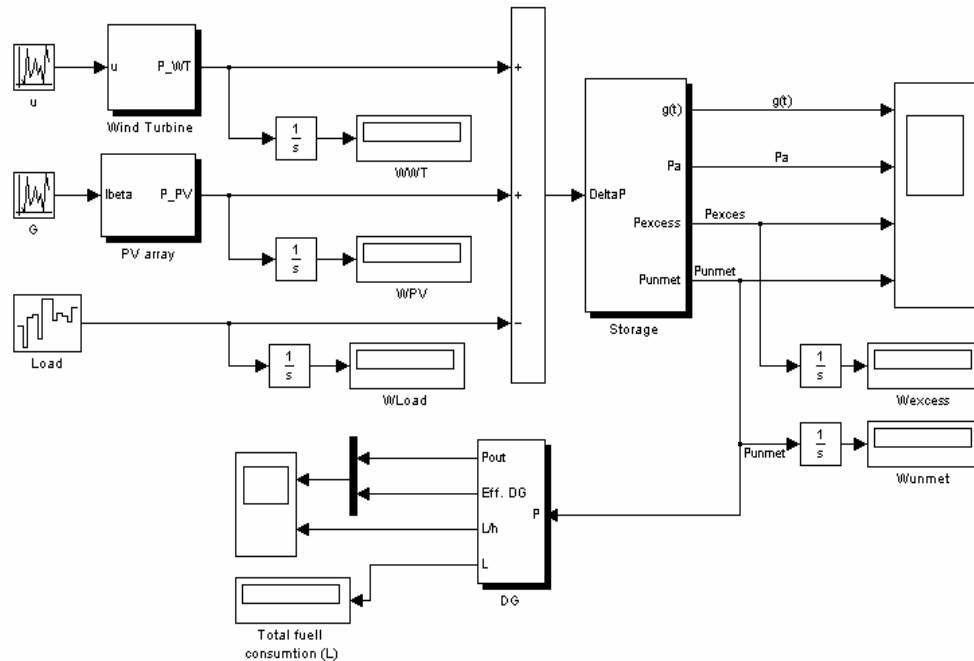


Рисунок 8 — Імітаційна модель комбінованої енергосистеми в середовищі Simulink

Таблиця 3 — Параметри моделі елементів у середовищі Simulink

Параметр	Значення
<i>Фотовольтпанаельна батарея</i>	
$k_{з.е.}$	0,9
$P_{ФЕБном}$	2000 Вт
$I_{су}$	1000 Вт/м ²
<i>Вітроенергетична установка</i>	
h	10 м
$h_{анем}$	13 м
z_0	0,5
<i>Акумуляторна батарея</i>	
η_s	1
σ	0,002 с ⁻¹
g_{max}	25000 Вт·год
g_0	20000 Вт·год
g_{min}	10000 Вт·год
<i>Дизель генератор</i>	
Q	9430 Вт·год/л
$m(P_{дг})$	$0,25 \cdot 10^{-3} \cdot P_{дг} + 0,008 \cdot 10^{-3}$

Для моделювання були задані добові графіки середньої швидкості вітру, інтенсивності сонячного випромінювання (рис. 9) та потужності навантаження (рис. 10).

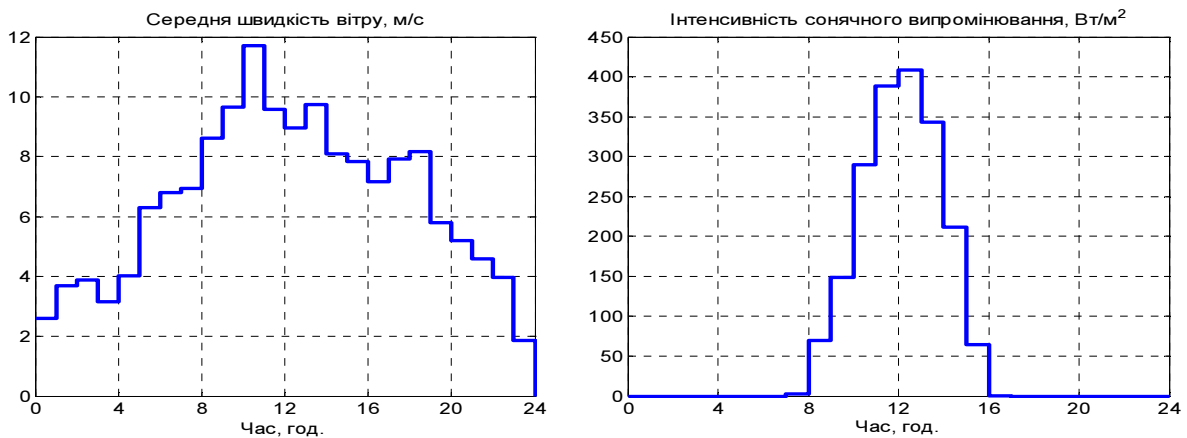


Рисунок 9 — Добові графіки середньої швидкості вітру та інтенсивності сонячного випромінювання

Моделювання проводилось для однієї доби з часовим інтервалом 1 година. Результати моделювання представлені на рис. 10.

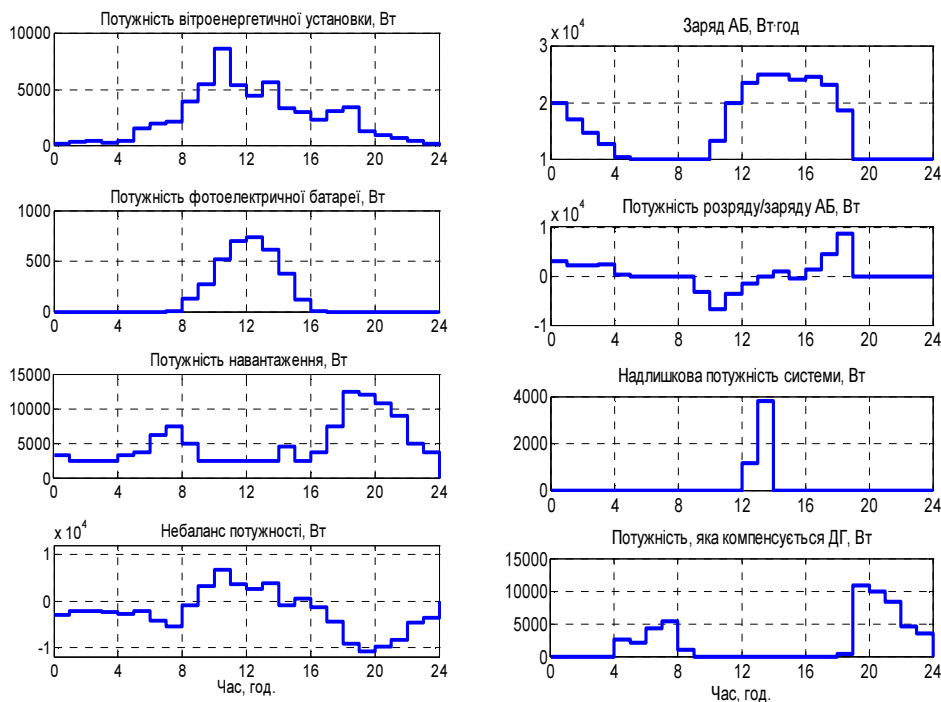


Рисунок 10 — Результати моделювання добової роботи комбінованої електроенергетичної системи

Шляхом моделювання було встановлено, що навантаженням було спожито 119950 Вт·год електроенергії, джерелами енергії було вироблено наступна кількість електроенергії: фотоелектричною батареєю — 3468,28 Вт·год, вітроенергетичною установкою — 58827,86 Вт·год, віддано акумулятором — 25593 Вт·год, запасено акумулятором — 15593 Вт·год. За добу надлишок енергії складає — 5018,69 Вт·год, недостача енергії — 52672,56 Вт·год, добова витрата палива складає 13,17 л.

Результати моделювання показують, що доля відновлюваної енергії в енергоспоживанні при заданих параметрах моделі складає 51,94 %, частка спожитої

енергії від акумулятора — 8,33 %, доля енергії, що покривається дизель-генератором — 43,91 %, надлишок енергії, який не спожитий і не запасений в акумуляторі — 4,18 %.

Таким чином в роботі були розроблені моделі окремих елементів в середовищі Simulink та загальна імітаційна модель комбінованої електроенергетичної системи з відновлюваними джерелами енергії, яка дозволяє моделювати режими роботи запропонованої енергосистеми протягом року для кожної години доби.

Було проведено моделювання роботи комбінованої електроенергетичної системи для однієї доби. Отримані результати дають змогу наочно оцінити режими роботи окремих складових системи, а також визначити об'єми споживання навантаженням та генерації джерелами.

Список літератури

1. Энергетична стратегія України на період до 2030 року. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://search.ligazakon.ua>.
2. Неисчерпаемая энергия. Кн. 1. Ветрогенераторы / В. С. Кривцов, А. М. Олейников, А. И. Яковлев. — Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», Севастополь: Севаст. нац. техн. ун-т, 2003. — 400 с.
3. Неисчерпаемая энергия. Кн. 2. Ветроэнергетика / В. С. Кривцов, А. М. Олейников, А. И. Яковлев. — Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», Севастополь: Севаст. нац. техн. ун-т, 2004. — 519 с.
4. Неисчерпаемая энергия. Кн. 3. Альтернативная энергетика / В. С. Кривцов, А. М. Олейников, А. И. Яковлев. — Учебник. — Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», Севастополь: Севаст. нац. техн. ун-т, 2007. — 643 с.
5. Bedescu V. Modeling Solar Radiation at the Earth's Surface Recent Advances. — Springer, Bucharest, 2008. — 580 p.
6. Duffie J. Solar engineering of thermal processes / J. Duffie, W. Beckman. — John Wiley & Sons, Inc, New York. — 1980.
7. Атмосфера. Справочник. — Л.: Гидрометеиздат, 1991. — 510 с.
8. Patel R. Wind and Solar Power System / R. Patel, R. Mukund — CRC Press, 1999. — 350 p.
9. Сабірзянов Т. Г. Узагальнена математична модель накопичувача енергії. /Т. Г. Сабірзянов, М. В. Кубкін, В. П. Солдатенко, В. В. Мартиненко // Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету «Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація». Випуск 25, част. I. — Кіровоград: РВЛ КНТУ, 2012. — С. 145—150.
10. Muselli M. Desing of hybrid-photovoltaic power generation, with optimization of energy management / M Muselli // Solar Energy/ — 1999. — Vol. 65. — №3. — P. 143—157.

М. Кубкин, В. Солдатенко

Имитационная модель комбинированной электроэнергетической системы с возобновляемыми источниками энергии

В статье разработаны модели отдельных элементов комбинированной электроэнергетической системы с возобновляемыми источниками энергии и ее общая имитационная модель в среде Simulink. Предложенная модель дает возможность исследовать режимы работы предложенной энергосистемы на протяжении определенных интервалов времени (сутки, месяц, год). Полученные результаты облегчают выбор оптимального состава оборудования и целесообразных режимов работы энергосистемы.

M. Kubkin, V. Soldatenko

Imitation Model of the Hybrid Power System Based on Renewable Energies

The article provides the imitation model of the elements of hybrid power system as well as its general imitation model in Simulink. The introduced model gives the opportunity to study the operating conditions of the hybrid power system during certain periods of time (day, month and year). The obtained results make a choice of the optimal equipment and expedient operating conditions much easier.

Одержано 15.09.12