

УДК 621.311.001.57

**П. Г. Плешков, проф., канд. техн. наук, В. П. Солдатенко, викл., М. В. Кубкін, викл.**

*Кіровоградський національний технічний університет, м. Кіровоград, Україна,  
E-mail: kirovograd41@gmail.com*

## Математична модель гібридної енергосистеми

В статті запропонована математична модель гібридної енергосистеми з відновлюваними джерелами енергії. Отримані рівняння моделі відображають динаміку керування енергосистеми при перерозподілі потоків енергії.

**математична модель, вітроустановка, сонячна установка, електрична енергія, тепла енергія**

**П. Г. Плешков, проф., канд. техн. наук, В. П. Солдатенко, преп., М. В. Кубкін, преп.**

*Кіровоградський національний технічний університет, г. Кіровоград, Україна*

**Усовершенствованная математическая модель гибридной энергосистемы**

В статье предложена математическая модель гибридной энергосистемы. Полученные уравнения модели отражают динамику управления энергосистемы при перераспределении энергии.

**математическая модель, ветроустановка, солнечная установка, электрическая энергия, тепловая энергия**

**Постановка проблеми.** В даний час для України невідворотно все більше і більше загострюється питання економного використання первинних енергоресурсів та надійності енергопостачання. В контексті неминучого істотного зростання цін на нафту та газ в найближчі роки слід очікувати істотних змін в структурі виробництва та споживання електричної та теплової енергії. Розширення виробництва енергії, очевидно, спостерігатиметься в бік зростання частки ядерної енергетики та широкого використання нетрадиційних та поновлювальних джерел енергії. При цьому більш актуальними стають питання рівномірного споживання електроенергії та надійності постачання енергії від різнорідних джерел, особливо для підприємств АПК [1-2]. А відтак виникає потреба математично описати комплексну систему, в якій відбувається постачання від кількох джерел електричної і теплової енергії з їх одночасним акумулюванням.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Питання комплексного використання джерел електричної та теплової енергії іще досліджені недостатньо. Аналіз робіт [1-4] показав, що основна увага приділяється: автономному енергозабезпеченню на основі вітрової сонячної та дизельної (бензинової) установки, окремим проблемам оптимізації роботи систем - процеси заряду-розряду акумуляторів, мінімізація втрат енергії при перехідних процесах, питанням надійності, застосуванню диференційованих тарифів, регулювання електроспоживання. З іншого боку недостатньо приділяється уваги утилізації викидної теплоти привідних двигунів електрогенераторів, режимам акумулювання теплової енергії, тепловим балансам.

**Постановка завдання.** Пропонується розробити математичну модель гібридної системи енергопостачання (ГСЕ), яка забезпечує споживача електричною та тепловою енергією від чотирьох джерел з частковою акумуляцією надлишкової і дешевої енергії.

**Виклад основного матеріалу.** Принципова схема ГСЕ приведена на рис. 1. Надходження основної частки електричної енергії передбачається від традиційної

енергосистеми. Вітрова і сонячна установки ВГ та СУ забезпечують вироблення електричної енергії постійного струму на шини постійного струму ШПС через зарядні пристрої ЗП, заряджання акумуляторної батареї АКБ, та віддачу енергії споживачу через інвертор. Дозаряджання АКБ можливе у нічний час дешевою електроенергією від енергосистеми.

Установка для утилізації відходів сільського господарства (гній, рослинні та тваринні рештки) виробляє біогаз, що накопичується в газгольдері з наступним спалюванням у газопоршневому двигуні ГПД.

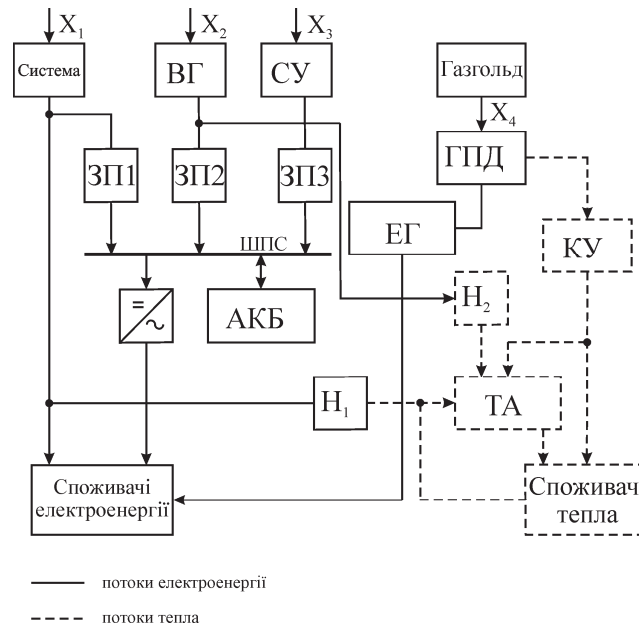


Рисунок 1 - Принципова схема ГСЕ

Використання ГПД виправдовується кращими характеристиками у порівнянні із газотурбінними установками. Двигун приводить в рух електричний генератор ЕГ, що також живить електроспоживачів.

Основне постачання теплової енергії відбувається за рахунок утилізованої з допомогою котла утилізатора КУ теплоти викидних газів та системи охолодження ГПД, а також від енергосистеми при дешевій нічній електроенергії (нагрівач Н<sub>1</sub>), та накопиченої в тепловому акумуляторі ТАМ теплоти. Передбачено також накопичення енергії вітру у вигляді теплоти через нагрівач Н<sub>2</sub>.

Структурна схема ГСЕ приведена на рис. 2.

На рис. 2 номерам відповідають 1 - енергосистема, 2 - ВГ, 3 - СУ, 4 - ГПД, 5 - ЕГ, 6 - КУ, 7 - АКБ, 8 - ТАМ, 9 і 10 - електронагрівачі,  $W$  і  $Q$  споживачі електричної та теплової енергії відповідно. Простір вхідних сигналів представляє:  $x_1(t)$  - надходження електроенергії від системи,  $x_2(t)$  - швидкість вітру,  $x_3(t)$  - інтенсивність сонячної радіації,  $x_4(t)$  - подача біогазу,  $W(t)$  - потреба в електричній енергії,  $Q(t)$  - потреба в тепловій енергії,  $\beta_7(t)$  - інтенсивність саморозряду електроакумулятора,  $\beta_8(t)$  - інтенсивність втрат тепла через ізоляцію в тепловому акумуляторі.

Елементом структурної схеми відповідає конструктивний чи експлуатаційний параметр  $p_i$  та передаточна функція  $F_i(p_i)$ , що відображає вхід у вихід. Активністю входу енергоустановок можна керувати за допомогою параметрів  $\alpha_i(t)$  ( $\alpha_i(t) = 1$  - активізувати вхід,  $\alpha_i(t) = 0$  - зробити вхід неактивним). В середині системи потоки енергії між елементами розподіляються пропорційно коефіцієнтам  $0 \leq k_{ij}(t) \leq 1$ .

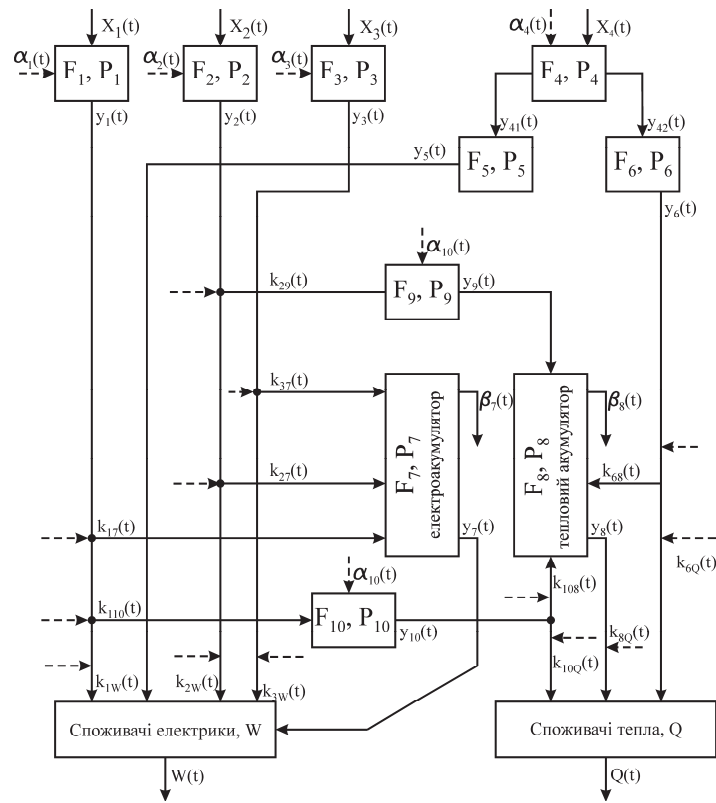


Рисунок 2 - Структурна схема ГСЕ

Визначимо простір вихідних сигналів елементів математичної моделі ГСЕ:

$$y_1(t) = F_1(x_1(t), p_1)\alpha_1(t), \quad (1)$$

$$y_2(t) = F_2(x_2(t), p_2)\alpha_2(t), \quad (2)$$

$$y_3(t) = F_3(x_3(t), p_3)\alpha_3(t), \quad (3)$$

$$y_{41}(t) = F_{41}(x_4(t), p_4)\alpha_4(t), \quad (4)$$

$$y_{42}(t) = F_{42}(x_4(t), p_4)\alpha_4(t), \quad (5)$$

$$y_5(t) = F_5(y_{41}(t), p_5)\alpha_5(t), \quad (6)$$

$$y_6(t) = F_6(y_{42}(t), p_6)\alpha_6(t), \quad (7)$$

$$y_7(t) = F_7((y_1(t)k_{17}(t) + y_2(t)k_{27}(t) + y_3(t)k_{37}(t)), p_7) - \beta_7(t), \quad (8)$$

$$y_8(t) = F_8((y_1(t)k_{17}(t) + y_2(t)k_{27}(t) + y_3(t)k_{37}(t)), p_8) - \beta_8(t), \quad (9)$$

$$y_9(t) = F_9(y_2(t) \cdot k_{29}(t), p_9)\alpha_9(t), \quad (10)$$

$$y_{10}(t) = F_{10}(y_1(t) \cdot k_{110}(t), p_{10})\alpha_{10}(t). \quad (11)$$

Очевидно, що для коефіцієнтів  $k_{ij}(t)$  справедливо:

$$\begin{aligned} k_{37}(t) + k_{3W}(t) &= k_{68}(t) + k_{6Q}(t) = k_{108}(t) + k_{10Q}(t) = \\ &= k_{17}(t) + k_{110}(t) + k_{1W}(t) = k_{29}(t) + k_{27}(t) + k_{2W}(t) = 1 \end{aligned} \quad (12)$$

Баланс енергії в акумуляторах описується наступними рівняннями:

$$Z_{7\min} \leq Z_{7\min}(t) = Z_{70} + \int_{t_1}^{t_2} (y_1(t)k_{17}(t) + y_2(t)k_{27}(t) + y_3(t)k_{37}(t) - y_7(t) - \beta_7(t))dt \leq Z_{7\max}, \quad (13)$$

$$Z_{8\min} \leq Z_{8\min}(t) = Z_{80} + \int_{t_1}^{t_2} (y_9(t) + y_{10}(t)k_{108}(t) + y_6(t)k_{68}(t) - y_8(t) - \beta_8(t))dt \leq Z_{8\max}. \quad (14)$$

Надходження електричної та теплової енергії від КЕЕС визначається відповідними рівняннями:

$$F_W(t) = y_1(t)k_{1W}(t) + y_2(t)k_{2W}(t) + y_3(t)k_{3W}(t) + y_7(t), \quad (15)$$

$$F_Q(t) = y_{10}(t)k_{10Q}(t) + y_8(t) + y_6(t)k_{6Q}(t), \quad (16)$$

Функціонування ГСЕ як відкритої системи спрямоване на задоволення потреби навантаження, яке задане функціями  $W(t)$  і  $Q(t)$ . Наявність керуючих впливів та зміна вхідних характеристик обумовлює відхилення функцій  $W(t)$  і  $Q(t)$  від  $F_W(t)$  та  $F_Q(t)$  як у варіанті  $W(t) < F_W(t)$  чи  $F(t) < Q(t)$ , так і у варіанті  $W(t) > F_W(t)$  чи  $Q(t) > F_Q(t)$ . Правомірно вимагати від системи такого результату дії, при якому відхилення виробітку від потреби впродовж інтервалу функціонування  $t_1$ -  $t_2$  було б мінімальним, тобто:

$$\int_{t_1}^{t_2} ((F_W(t) - W(t))^2) = K_W \rightarrow 0, \quad (17)$$

$$\int_{t_1}^{t_2} ((F_Q(t) - Q(t))^2) = K_Q \rightarrow 0. \quad (18)$$

Доповнюємо систему співвідношень, вводячи вартісні оцінки електричної (теплової) енергії:  $C_{W_i}(t)$  ( $C_{Q_i}(t)$ ) - вартість одиниці ресурсу витраченого на забезпечення роботи  $i$ -того елемента;  $C'_{W_i}(t)$  ( $C'_{Q_i}(t)$ ) - приведена вартість обслуговування  $i$ -того елемента під час його роботи;  $C''_{W_i}(t)$  ( $C''_{Q_i}(t)$ ) - приведена вартість обслуговування  $i$ -того елемента при простої.

Вартісна оцінка електроенергії від ГСЕ при диференційованому обліку:

$$C_{W1}(t) = T_W \cdot \left( \begin{matrix} K_{II} + K_{III} + K_H \\ \forall t \in T_{II} \quad \forall t \in T_{III} \quad \forall t \in T_H \end{matrix} \right). \quad (19)$$

де  $T_W$  – тариф на електроенергію;

$K_{II}$ ,  $K_{III}$ ,  $K_H$  – тарифні коефіцієнти в піковій, полупіковій та нічній зоні доби.

На забезпечення функціонування вітрової та сонячної установок витрачати первинні енергоресурси не потрібно. Тобто для цих установок рівні нулю  $C_{W2}(t) = C_{W3}(t) = 0$ .

Вартості електроенергії від різних джерел:

$$B_{W1}(t) = \int_{t_1}^{t_2} U_{W1}(t) y_1(t) (1 - k_{110}(t)) dt, \quad (20)$$

$$B_{W2}(t) = \int_{t_1}^{t_2} (U'_{W2}(t) y_2(t) (1 - k_{29}(t)) + U''_{W2}(t) (1 - \alpha_2(t))) dt, \quad (21)$$

$$B_{W3}(t) = \int_{t_1}^{t_2} (U'_{W3}(t) y_3(t) + U''_{W3}(t) (1 - \alpha_3(t))) dt, \quad (22)$$

$$B_{W4}(t) = \int_{t_1}^{t_2} ((U_{W4}(t) + U'_{W4}(t)) \alpha_4(t) x_4(t) + U''_{W4}(t) (1 - \alpha_4(t))) dt, \quad (23)$$

$$B_{W7}(t) = \int_{t_1}^{t_2} (U'_{W7}(t) y_7(t) + U''_{W7}(t)) dt. \quad (4)$$

Сукупні витрати на забезпечення електроенергією мінімізуються:

$$B_W(t) = \sum B_{Wi}(t) = K_{BW} \rightarrow \min. \quad (25)$$

Вартісна оцінка теплової енергії від ГСЕ при диференційованому обліку:

$$U_{Q1}(t) = K_{W \rightarrow Q} \cdot U_{W1}(t). \quad (26)$$

де  $K_{W \rightarrow Q}$  коефіцієнт перерахунку енергії.

Для вітрової та сонячної установок прийmemo вартості первинного тепла  $U_{Q2}(t) = U_{Q3}(t) = 0$ . А оскільки основною задачею ГПД є виробництво електроенергії, то можна вважати утилізовану теплоту також позбавленою вартості  $U_{Q4}(t) = 0$

Вартості теплової енергії від різних джерел:

$$B_{Q1}(t) = \int_{t_1}^{t_2} (U_{Q1}(t) + U'_{Q1}(t) y_{10}(t) + U''_{Q1}(t) (1 - \alpha_{10}(t))) dt, \quad (27)$$

$$B_{Q2}(t) = \int_{t_1}^{t_2} (U'_{Q2}(t) y_9(t) \alpha_9(t) + U''_{Q2}(t) (1 - \alpha_9(t))) dt, \quad (28)$$

$$B_{Q6}(t) = \int_{t_1}^{t_2} (U'_{Q6}(t) \alpha_6(t) x_4(t) + U''_{Q6}(t) (1 - \alpha_6(t))) dt, \quad (29)$$

$$B_{Q8}(t) = \int_{t_1}^{t_2} (U'_{Q7}(t) y_8(t) + U''_{Q8}(t)) dt. \quad (30)$$

Сукупні витрати на забезпечення тепловою енергією також мінімізуються:

$$B_Q(t) = \sum B_{Qi}(t) = K_{BQ} \rightarrow \min \quad (31)$$

**Висновки.** Отже, рівняння (1)-(31) являють собою математичну модель ГСЕ, що відображає динаміку ГСЕ як відкритої системи, керованої за рахунок наявності параметрів керування  $\alpha_i(t)$  та підбору часток перерозподілу енергії  $k_{ij}(t)$ . З точки зору класифікації модель є нелінійною, описаною неперервними та розривними функціями, чотирьохкритеріальною. В якості критеріїв (15, 16, 17, 18) використано визначені для кінцевого проміжку інтеграли, значення яких мінімізується.

Розв'язання задач такого типу у загальному вигляді невідоме, тому отриману модель слід перевести до виду (дискретизація), прийнятної до використання відомих методів, алгоритмів, програм, що є предметом подальших досліджень.

## Список літератури

1. Плешков П.Г. Підвищення енергоефективності сільськогосподарського виробництва на основі комплексної електроенергетичної системи / П.Г.Плешков, В.П. Солдатенко // Зб. наук. праць УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого. –2008. – Вип. 12 (26). – С. 373-384
2. Плешков П.Г. Підвищення енергоефективності сільськогосподарського виробництва центрального регіону України на основі комплексної електроенергетичної системи / П.Г.Плешков, В.П. Солдатенко // V Міжнародна науково-практична конференція «Нетрадиційні і поновлювані джерела енергії як альтернативні первинним джерелам енергії в регіоні» (2–3 квітня 2009 р.). Збірник наук. статей. – Львів: ЛьВЦНТЕІ, 2009. – С. 51-55.
3. Мхітарян Н.М. Деякі аспекти подальшого розвитку об'єктів альтернативної енергетики / Н.М. Мхітарян, С.О. Кудря, А.Р. Щокін // Відновлювана енергетика. – 2007. – №2(9). – С. 6–13.
4. Кривцов В.С. Неисчерпаемая энергия. Кн. 3. Альтернативная энергетика / В.С. Кривцов, А.М. Олейников, А.И. Яковлев. – Х.: ХАИ, 2006. – 643 с.

**Petro Pleshkov, Prof., Ph.D. tech. sci., Valentin Soldatenko, lecturer, Maxim Kubkin, lecturer**  
*Kirovograd national technical university, Kirovohrad, Ukraine*

### **Mathematical model of hybrid power system**

In the article the mathematical model to develop a hybrid power system, which provides consumers with electric and heat energy from four sources of excess accumulation of partial and cheap energy.

It was proposed block diagram of a hybrid power system in the central part of the grid, renewable battery power or heat. Based on the proposed scheme were drawn up structural equation model mathematical distribution of energy flows, including the cost of energy.

The equations models reflect the dynamics of power management reallocate energy flows through the presence of control parameters  $\alpha_i(t)$  and redistribution of energy recruiting particles  $k_{ij}(t)$ .

**mathematical model wind turbines, solar installation, electricity, thermal energy**

Одержано 29.12.15