

**СИСТЕМА МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ БАЛАНСУВАННЯ РЕЖИМІВ
ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ З ВІДНОВЛЮВАЛЬНИМИ
ДЖЕРЕЛАМИ ЕНЕРГІЇ З ВИКОРИСТАННЯМ SMART GRID ТЕХНОЛОГІЙ**

(Шифр 21-Д-403)

Робота проводиться на підставі наказу Міністерства освіти і науки України від 29.12.2021р. №1461 та наказу ВНТУ від 01 лютого 2022 р. № 34.

Дата початку роботи: 01.01.2022 р.

Дата закінчення роботи: 31.12.2023 р.

Науковий керівник: д.т.н., проф. Лежнюк П. Д.

Відповідальний виконавець: д.т.н., проф. Комар В.О.

Строки виконання: початок – 01.01.2022, закінчення – 31.12.2022.

Обсяг коштів, виділених на виконання НДР: 351,504 тис. гривень.

ОДЕРЖАНІ НАУКОВО-ПРИКЛАДНІ РЕЗУЛЬТАТИ ВІДПОВІДНО ДО ТЕХНІЧНОГО ЗАВДАННЯ

Заплановані результати	Отримані результати
<p>Розроблення методів і способів оптимізації сумісного використання засобів компенсації нестабільності генерування ФЕС в системі балансування режимів ЕЕС.</p> <p>14 статей (з них 3 у журналах, 3 у збірниках WoS або Scopus), захист дисертації доктора філософії –1, захист 3 магістерські роботи, 2 патенти, монографія.</p> <p>Проміжний звіт</p>	<p>Уточнено метод, алгоритм та програми короткотермінового і погодинного прогнозування генерування ФЕС на наступну добу та інтегрування її в АСК балансування режимів ЕЕС.</p> <p>Досліджено взаємовплив ФЕС на режими електричних мереж енергосистеми для визначення оптимальних засобів балансування в них потужності та електроенергії.</p> <p>Виконано аналіз методів та засобів компенсації нестабільності генерування ФЕС – накопичувачі енергії (гідро електроакумулюючі станції, хімічне акумулювання, водневі технології, біогазові технології та інші способи).</p> <p>Обґрунтовано і сформовано інформаційне забезпечення використання наявних джерел генерування – в першу чергу блоків теплової генерації з регульовальним діапазоном 30-50%, узгодження графіків електроспоживання і генерування ФЕС.</p>

Опубліковані за темою статті в журналах, що індексуються у наукометричній базі Scopus та/або Web of Science Core Collection (WoS)

№	Повні дані про статті з веб-адресою електронної версії; <u>підкреслити</u> прізвища авторів, які належать до списку виконавців	Наукометр. база даних
1	Stepan Kudria, <u>Petr Lezhniuk</u> , Oleksandr Riepin, <u>Olena Rubanenko</u> . Hydrogen Technologies as a Method of Compensation for Inequality of Power Generation by Renewable Energy Sources // <u>Przegląd Elektrotechniczny</u> , ISSN 0033-2097, R. 98 NR 10/2022. DOI: 10.15199/48.2022.10.01	Scopus
2	<u>Petro Lezhniuk</u> , Oleksandr Burykin, Volodymyr Kulyk, <u>Juliya Malogulko</u> , Andriy Polishchu, <u>Artur Sytnyk</u> . Devising a Method for Estimating the Share of Electricity Consumption by a Given Consumer, Which is Provided From Renewable Energy Sources // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, ISSN 1729-3774 5/8, 2022. Pp. 21-30. DOI: 10.15587/1729-4061.2022.265749	Scopus
3	M. Belik and <u>O. Rubanenko</u> , "Optimisation of passive solar systems seasonal operation in conditions of central Europe," Renewable Energy and Power Quality Journal, Article vol. 20, pp. 746-750, 2022. (WoS/Scopus)	Scopus

Опубліковані англomовні статті у матеріалах міжнародних конференцій, що індексуються у наукометричній базі Scopus або WoS

№	Повні дані про статті та тези доповідей з веб-адресою електронної версії; <u>підкреслити</u> прізвища авторів, які належать до списку виконавців	Наукометр. база даних
1	<u>Petro Lezhniuk</u> , <u>Artur Sytnyk</u> , Volodymyr Kulyk, <u>Juliya Malogulko</u> , Andriy Polishchuk. Method of Estimating the Share of Electricity Consumption of a Given Consumer, Which is Provided From Renewable Energy Sources. 2022 IEEE 8 th International Conference on Energy Smart Systems (ESS), Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute. pp. 85–88. (Scopus)	Scopus
2	<u>P. Lezhniuk</u> , M. Belik and O. <u>Rubanenko</u> . Analysis of technical conditions influencing the operation of PV power stations cooperating with controlled power grids, 2022 IEEE 4th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES), 2022, Kremenchuk, Ukraine. (Presented in conference) (Scopus)	Scopus
3	<u>O. Rubanenko</u> , et al., " Design and Control of 11-Level Modular Multilevel Converter with Dual Purpose Inverter for Grid connected Photovoltaic System," in Proceedings in 2022 IEEE 9th International Conference on Energy Smart Systems, ESS 2022, Proceedings, 2022, (Presented in conference)	Scopus

№	Повні дані про статті з веб-адресою електронної версії, або вихідні дані про охоронні документи; <u>підкреслити прізвища авторів, які належать до списку виконавців</u>
1	Кудря С. О., Репкін О. О., Рубаненко О. О., Яценко Л. В., Шинкаренко Л. Я. Етапи розвитку зеленої водневої енергетики України // Відновлювана енергетика. – №1. – 2022. – С. 5–16. https://doi.org/10.36296/1819-8058.2022.1(68)840
2	<u>Лежнюк П. Д., Комар В. О., Добровольська Л. Н., Повстянко К. О.</u> Відносне оцінювання засобів балансування режимів електроенергетичних систем з відновлюваними джерелами енергії // Вісник ВПІ. – № 3. – 2022. – С. 24–30. https://doi.org/10.31649/1997-9266-2022-162-3-24-30
3	Комар В. О., Кудря С. О., Лежнюк П. Д., Гунько І. О. Водневі технології для вирівнювання графіків генерування вітрових електростанцій під час балансування режимів електроенергетичних систем // Відновлювана енергетика. – №3. – 2022. – С.
4	Лежнюк П. Д., Комар В. О., Гунько І. О., Смагло І. І. Оцінювання технічного стану обладнання фотоелектричних станцій програмно-апаратними засобами // Відновлювана енергетика. – №4. – 2022. – С.
5	Лежнюк П. Д., Комар В. О., Повстянко К. О. Відносне оцінювання вартості засобів резервування відновлюваних джерел енергії // Енергетика: економіка, технології, екологія. – №3. – 2022. – с.
6	В. О. Комар, П. Д. Лежнюк, В. О. Лесько, І. О. Гунько, І. І. Смагло. Програмно-апаратний комплекс діагностування технічного стану обладнання фотоелектричних станцій // Вісник НТУ «ХПІ», серія «Енергетика: надійність, та енергоефективність»
7	Петро Лежнюк, Вячеслав Комар, Олена Сікорська. Оптимізація способів компенсації нерівномірності генерування відновлюваних джерел енергії методами теорії подібності // Вісник Кременчуцького національного університету. – №3. – 2022. – с.
8	Петро Лежнюк, Ірина Гунько, Олег Козачук. Втрати потужності та електроенергії в електричних мережах, які викликані відновлюваними джерелами енергії // Технічна електродинаміка. – №6. – 2022. – с.

Опубліковано монографії

№	Повні дані про монографії; <u>підкреслити прізвища авторів, які належать до списку виконавців</u>
1	Petro Lezhniuk, Vyacheslav Komar, Vladyslav Lesko, Volodymyr Netrebskyi, Yuliya Malogulko, Olena Sikorska. «Electricity Consumption and Renewable Energy Sources Generation Schedules Coordination in Electric Networks for Balance Reliability Increasing». (Scopus) Монографія, ВНТУ + ІВЕ НАНУ.
2	Комар В.О., Лежнюк П.Д., Сікорська О.В. «Розосереджене генерування в задачах підвищення енергоефективності розподільних електричних мереж». – Вінниця: ВНТУ, 2021. – 190 с.

Отримано патенти

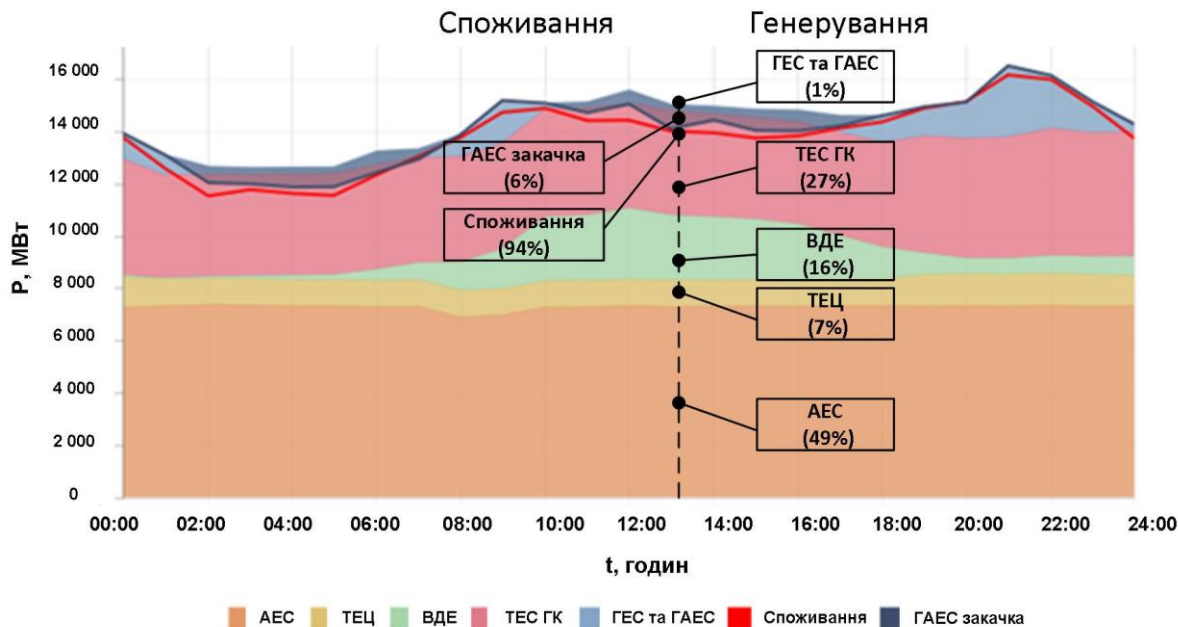
№ з/п	Повні дані про охоронні документи; підкреслити прізвища авторів, зазначених у списку виконавців
1	Пат. України на корисну модель. Україна, МПК H02J 3/24. Спосіб оптимального керування режимами роботи електроенергетичної системи / П. Д. Лежнюк, О. Є. Рубаненко, О. О. Рубаненко, І. О. Гунько; Вінницький національний технічний університет.
2	Пат. України на корисну модель. Україна, МПК H02B 1/00. Спосіб оптимального керування режимами розподільних електричних мереж з розосередженим генеруванням / П. Д. Лежнюк, І. І. Смагло, О. Є. Рубаненко, Вінницький національний технічний університет. – №; заявл.; Бюл. № .
3	Пат. України на корисну модель. Україна, МПК H02B 1/00. Спосіб оптимального керування режимами розподільних електричних мереж з розосередженим генеруванням / П. Д. Лежнюк, І. І. Смагло, О. Є. Рубаненко, Вінницький національний технічний університет. – №; заявл.; Бюл. № .

Дисертації на здобуття наукового ступеня доктора та кандидата наук

№	Повні дані про дисертації
1	Прокопенко І. О. «Оптимальне керування фотоелектричними станціями в електричних мережах енергосистеми», дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 141 – електроенергетика, електротехніка та електромеханіка. Подана до захисту в спеціалізованій вченій раді ВНТУ, науковий керівник д.т.н. Лежнюк П. Д.
2	Ситник А. В. «Моделі та методи визначення обсягів гарантованого покриття навантаження споживачів енергії з відновлювальних джерел живлення», дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 141 – електроенергетика, електротехніка та електромеханіка. Кафедральним семінаром рекомендована до захисту в спеціалізованій вченій раді ВНТУ, науковий керівник д.т.н. Лежнюк П. Д.

Участь в конференціях

1. XXIII Міжнародна НПК «Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті», Київ, 19–20.05.2022 р.
2. Міжнародна НПК «Инновации в науке и технике», Бишкек, 20–21.04.2022 р.
3. 2022 IEEE 4th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES), 2022, Kremenchuk, Ukraine.
4. 2022 IEEE 3rd KhPI Week on Advanced Technology, Kharkiv, Ukraine, 3–7.10.2022.
5. XVI Міжнародна НПК «Контроль і управління в складних системах, КУСС-2022», Вінниця, ВНТУ, 15–17.11.2022 р.



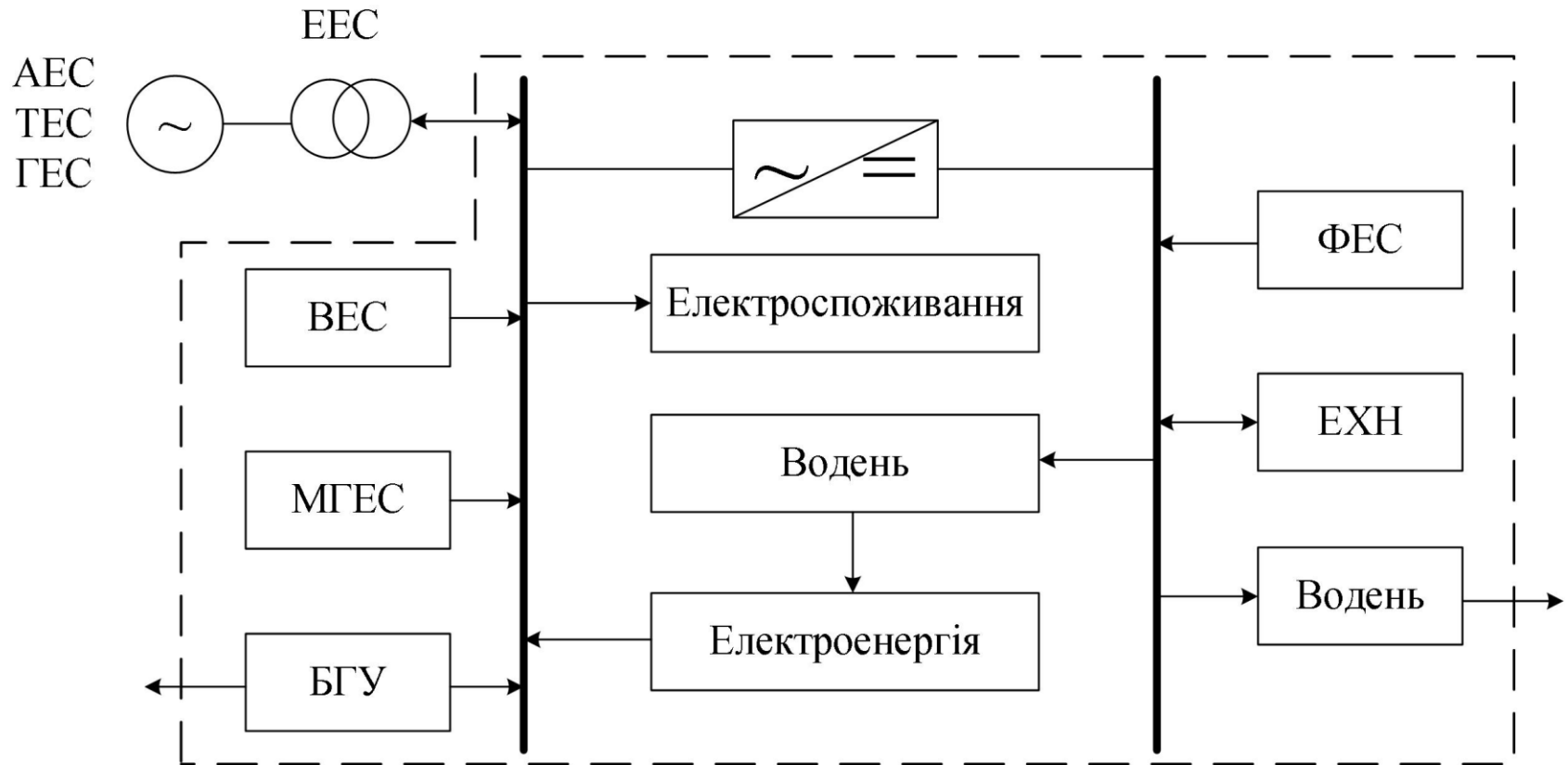
Для того, щоб не обмежувати генерування ВДЕ, прийшлося використати ГАЕС в насосному режимі. Інакше, необхідно було б зупинити один блок 1000 МВт АЕС. В енергосистемі необхідно розвивати засоби резервування генерування ВДЕ для успішного вирішення задачі балансування режимів в ЕЕС. Завдання полягає тільки в тому, що серед можливих засобів необхідно вибрати ті, які є найбільш технічно ефективними та оптимальними щодо витрат.

Баланс електроенергії в ОЕС України в частині генерування формується різними електростанціями:

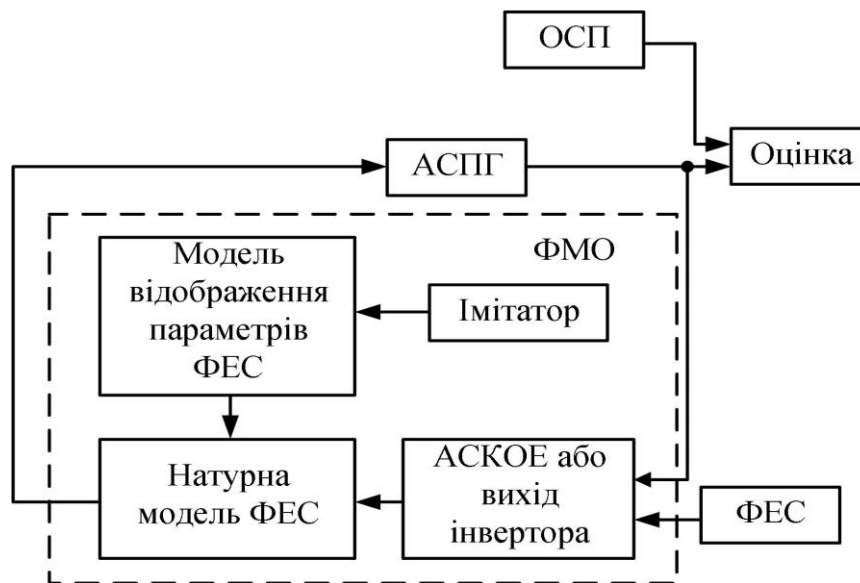
$$P_{AEC}(t) + P_{TEC}(t) + P_{ГЕС}(t) \pm P_{ГАЕС}(t) + P_{ВДЕ}(t) \pm P_{рез}(t) - P_n(t) - \Delta P(t) = 0, \quad (1)$$

де $P_{AEC}(t)$ – потужність атомних електростанцій (АЕС), $P_{TEC}(t)$ – потужність теплових електростанцій (ТЕС) і теплоелектроцентралей (ТЕЦ), $P_{ГЕС}(t)$ – потужність гідроелектростанцій, $P_{ГАЕС}(t)$ – потужність гідроакумулюючих електростанцій (ГАЕС), $P_{ВДЕ}(t)$ – потужність ВДЕ, $P_{рез}(t)$ – потужність засобів і шляхів резервування електроенергії під час балансування, $P_n(t)$ – навантаження трансформаторних підстанцій (ТП), $\Delta P(t)$ – технологічні витрати в електричних мережах.

Баланс електроенергії в локальній електричній системі



Натурно-імітаційне моделювання генерування ФЕС в процесі балансування режимів ЕЕС



Натурно-імітаційної моделі (НІМ) перевірки і настроювання автоматичної системи прогнозування генерування АСПГ ФЕС містить у собі функціональну модель об'єкта (ФМО), яка у сукупності з АСПГ ФЕС утворює замкнуту систему. Це дозволяє при досить точному моделюванні об'єкта керування досягти максимальної вірогідності випробування АСПГ ФЕС, оскільки в системі випробування можливе відтворення довільного режиму об'єкта в допустимій області існування. Поряд з достоїнствами необхідно відмітити певну складність при реалізації структури, що позначається насамперед у необхідності не тільки інформаційної, але і фізичної сумісності моделі й АСПГ. Оцінка правильності функціонування АСПГ у даній структурі передбачається шляхом порівняння виходів АСПГ з даними контролю режимів реального об'єкта.

Натурно-імітаційне моделювання генерування ФЕС в процесі балансування режимів ЕЕС

Математичну постановку задачі організації імітатора ФМО можна сформулювати в такий спосіб. Задано залежність (функція)

$$y = f(t), \quad (1)$$

де f і, відповідно, y – в загальному випадку n -мірний вектор, $f = [f_1, f_2, \dots, f_n]^T$; незалежна змінна t , що представляє собою час, заданий на деякому кінцевому проміжку $t \in [t_0, t_k]$.

Процес відтворення функції (3) організовується при дотриманні деяких умов: повинна бути забезпечена необхідна точність моделювання, задана, наприклад, у виді значення

$$\varepsilon = \left| \max y(t) - \bar{y}(t) \right|, \quad t_0 \leq t \leq t_k. \quad (2)$$

Функціональна модель ФЕС має такі ж перетворюючі властивості, як і сам об'єкт, що моделюється. ФМО ФЕС побудована з визначеним набором структур і описана у виді рівняння

$$\mathbf{Y} = F(\mathbf{y}, \mathbf{x}, \mathbf{u}, t) \quad (3)$$

де \mathbf{y} – n -мірний вектор вихідних координат $y_i(t)$, $i = \overline{1, n}$; \mathbf{x} – r -мірний вектор впливів, що збурюють $x_i(t)$, $i = \overline{1, r}$; \mathbf{u} – m -мірний вектор керуючих впливів $u_i(t)$, $i = \overline{1, m}$; відомі області значень змінних: $y \in Y$, $x \in X$, $u \in U$.

Якщо натурна модель обрана, то її рівняння відоме і має вигляд

$$\mathbf{Z} = \Phi(\mathbf{z}, \mathbf{v}, \mathbf{x}, t), \quad (4)$$

де $\mathbf{z} \in \mathbf{Z}$ – координати стану, тобто моделюючі змінні системи; $\mathbf{v} \in \mathbf{V}$ – керуючі змінні; $\mathbf{x} \in \mathbf{X}$ – натурні зовнішні впливи (ті ж перемінні, котрі входять у рівняння об'єкта, що моделюється, оскільки об'єкт і модель призначені для роботи в одному і тому ж зов

Визначальними критеріями подібності є функціонали від похибки моделювання $\varepsilon = y - z$.

Натурно-імітаційне моделювання генерування ФЕС в процесі балансування режимів ЕЕС

Різні структури моделюючих систем можуть бути отримані в залежності від виду заданих рівнянь еталонної моделі, прийнятого методу керування (по збурюванню, по відхиленню, програмний метод), виду закону керування. Організацію деяких структур систем моделювання розглянемо на прикладі лінійного об'єкта, описуваного лінійним, у загальному випадку матричним, рівнянням виду

$$\mathbf{Y} = \mathbf{F}\mathbf{y} + \mathbf{u}, \quad (5)$$

де вектор вихідних координат \mathbf{y} і вектор вхідних впливів \mathbf{u} , що мають однакову розмірність n ; \mathbf{F} – матриця операторів розмірності $n \times n$.

Структура моделюючої системи, що реалізують функціональну модель об'єкта описується рівнянням

$$\mathbf{Z} = \mathbf{\Phi}\mathbf{z} + \mathbf{v}, \quad (6)$$

де компоненти \mathbf{z} , \mathbf{v} і $\mathbf{\Phi}$ аналогічні компонентам рівняння (5) і мають таку ж розмірність.

Подібність моделі та об'єкта забезпечується введенням у моделюючу систему керуючого сигналу \mathbf{u} з умовою

$$\mathbf{Z} = \mathbf{Y}. \quad (7)$$

Оскільки умова (7) рівносильна рівності,

$$\mathbf{F}\mathbf{y} + \mathbf{u} = \mathbf{\Phi}\mathbf{z} + \mathbf{v}, \quad (8)$$

то для керуючого впливу в моделюючій системі справедливий вираз

$$\mathbf{v} = \mathbf{F}\mathbf{y} - \mathbf{\Phi}\mathbf{z} + \mathbf{u} \quad (9)$$

і дане керування приводить до спостереження координат \mathbf{z} за поведженням змінних \mathbf{y} . Керування здійснюється з використанням регіональних диспетчерських центрів, які координуються операторами системи передавання і розподілу. При натурно-імітаційному моделюванні складна система балансуєючих груп ФЕС може розбиватися на підсистеми. В цьому випадку імітаційна модель розробляється для окремих підсистем, інші підсистеми не моделюються і для них здійснюється натурний експеримент. В якості підсистеми може бути окрема ФЕС або група ФЕС, об'єднаних якоюсь ознакою (наприклад, територіально, коли для групи ФЕС характерні однакові метеопараметри).

Дякую за увагу!