

## **ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИМ ОБЛАДНАННЯМ ШЛЯХОМ УДОСКОНАЛЕННЯ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ**

**© Придворов С.С., Близниченко Г.С.**

*Українська інженерно-педагогічна академія*

### **Інформація про авторів:**

**Придворов Сергій Сергійович (Prydvorov Sergii):** ORCID: 0009-0004-5164-4997; spridv@ukr.net, аспірант кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій; Українська інженерно-педагогічна академія, вул. Університетська, 16, м. Харків, 61003, Україна.

**Близниченко Ганна Сергіївна (Blyznychenko Hanna):** ORCID: 0000-0002-3177-7280; mr.sancho2002@gmail.com, аспірантка кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій; Українська інженерно-педагогічна академія, вул. Університетська, 16, м. Харків, 61003, Україна.

У статті наведено принципи математичного моделювання типовою складною системою управління з розподіленими параметрами, а саме автоматизований технологічний комплекс: теплова електростанція-енергоблок-агрегат (парогенератор, турбогенератор та ін). При моделюванні системи організації управління таким комплексом використовувалось спрощене поняття узагальненого об'єкта управління, що характеризується лише невеликою кількістю загальних головних ознак – блокового компонування та однотипністю основного енергообладнання. Визначено, що компроміс між простотою та повнотою математичного опису складних систем досягається багаторівневим ієрархічним уявленням. Аналіз показав, що завдання моделювання розподілених систем може бути виконане у двох постановках: ставиться завдання відображення розподіленої системи та завдання відтворення стану системи, що моделюється, лише в окремих точках технологічного простору. Встановлені фактори, які впливають на обмеження при математичному моделюванні складних систем. Це складність методів, особливості специфіки об'єкта моделювання та потреба у великих інформаційних ресурсах. Показано, що формалізація самих законів оптимального управління у вигляді відповідних алгоритмів, що являють собою математичне рішення задачі управління, є в даний час однією з найскладніших і до кінця невирішених проблем через їх велику розмірність та відсутність універсальних математичних методів рішення. Для складних завдань раціонального управління ефективним прийомом її вирішення є декомпозиція основного завдання, тобто розбиття на ряд простіших складових. При декомпозиції широко використовують евристичні методи, які базуються на результатах досвіду та інтуїції без повного доказу вибору запропонованих дій.

**Ключові слова:** показники якості, електростанція, енергозбереження, математичне моделювання.

***Prydvorov S., Blyznychenko H.*** «Improving the quality of control systems for energy equipment through enhanced mathematical modeling»

The article discusses the principles of mathematical modeling of a typical complex control system with distributed parameters, namely an automated technological complex: a thermal power station-power unit-unit (boiler, turbine generator, etc.). When modeling the control system for such a complex, a simplified concept of a generalized control object was used, characterized only by a small number of common main features - block composition and uniformity of the main power equipment. It is determined that a compromise between simplicity and completeness of

mathematical description of complex systems is achieved through a multi-level hierarchical representation. Analysis has shown that the task of modeling distributed systems can be approached in two formulations: the task of reflecting the distributed system and the task of reproducing the state of the modeled system only at specific points in the technological space. Factors influencing the limitations of mathematical modeling of complex systems are identified. These include the complexity of methods, the specificity of the modeling object, and the need for large information resources. It is shown that formalizing the laws of optimal control in the form of corresponding algorithms, which represent the mathematical solution to the control problem, is currently one of the most difficult and unresolved problems due to their large dimensionality and the absence of universal mathematical solution methods. For challenging tasks of rational control, decomposition of the main task, i.e., breaking it down into a series of simpler components, is an effective approach to its solution. In decomposition, heuristic methods based on experience and intuition without complete proof of the choice of proposed actions are widely used.

**Key words:** quality indicators, power station, energy saving, mathematical modeling.

### **Постановка проблеми та її зв'язок з важливими науковими та практичними завданнями**

Для вирішення того чи іншого завдання управління за допомогою засобів автоматизації вона, перш за все, має бути описана з достатньою точністю математичних залежностей, тобто формалізована. Наразі розроблено математичні методи вирішення низки класів завдань управління, які зумовлюють можливість не суб'єктивного, а наукового підходу до їх формалізації.

При моделюванні об'єкту управління ставиться у відповідність його математична модель - сукупність математичних залежностей, що відбивають ті особливості та властивості об'єкта, які є істотними для досліджуваного процесу управління.

Одному об'єкту може відповідати одна, а ціла сукупність математичних моделей, відбивають різноманітні боку його функціонування. Зазвичай вважають, що з цих моделей виділяється з деякої єдиної і всеосяжної математичної моделі об'єкта і всі приватні моделі у тому чи іншій мірою пов'язані друг з одним. Якщо цим взаємозв'язком можна знехтувати чи врахувати її якимось простим способом, перехід до таких простіших моделей, тобто. декомпозиція загальної задачі суттєво спрощує та полегшує вирішення конкретного завдання управління.

Основне при складанні моделі полягає у виділенні найважливіших факторів у реальній системі, які підлягають вивченню в даному конкретному дослідженні. Ці фактори повинні бути відображені в моделі з найбільшою повнотою та деталізацією, а також збігатися з реальними характеристиками з точністю, що визначається вимогами дослідження.

При моделюванні принципово неможливо отримати повний збіг всіх характеристик та особливостей моделі та об'єкта. Однак за допомогою моделей ці характеристики можна отримати значно простіше, швидше та дешевше, ніж на реальній системі. Моделі значно полегшують розуміння системи, дозволяють її розчленовувати на окремі частини, аналізувати та синтезувати абсолютно різні системи одними методами, прогнозувати поведінку систем у реальних умовах. Перевагою моделі є також можливість порівняно простими засобами змінювати її параметри або вводити зовнішні впливи з метою вивчення реакції системи, що в реальних умовах дуже важко і дорого, а іноді просто неможливо (наприклад, при вивченні поведінки системи в аварійних ситуаціях).

### **Аналіз останніх досліджень і публікацій**

Методи математичного моделювання промислових об'єктів, що базуються на відомих на сьогодні відповідних розділах теорії автоматичного управління, стосовно моделювання досить складних теплоенергетичних об'єктів, запропоновані в основних роботах В.А. Демченко [1], А.Х. Горелік [2], М.О. Дуель [3], С.Ф., Артюх [4], а також ряд інших авторів. Показники якості

електростанцій визначені в основній стратегії розвитку енергетики України [4], а також в економічній політиці енергозбереження [6] та зазначено перспективи в цьому напрямі [7]. Математичному моделюванню елементів енергоблоку присвячено велика кількість наукових робіт. Так вирішується задача оптимального розподілу навантаження між енергоблоками [8], розробляються прецизійні [9] та енергозберігаючі системи керування [10]. Досліджуються багатоканальні оптимальні регулятори [11] та автоматизовані системи визначення показників якості обладнання [12], розробляються методи і моделі оптимізації показників якості регулювання [13] та математичне моделювання окремих елементів енергоблоку [1, 14, 15]. Але не зважаючи на велику кількість робіт, бракує загального наукового підходу до опису математичних моделей в складних системах, де використовується принцип декомпозиції та має місце висока ступінь ієрархізації виробничих процесів.

### **Постановка мети та завдання дослідження**

Метою роботи є упорядкування досвіду математичного моделювання складних об'єктів енергетики та подальшого використання в складних ієрархічних системах керування

### **Виклад основного матеріалу**

Найбільш простими математичними моделями об'єкта управління є його детерміновані та статистичні моделі. При цьому не враховуються випадкові зміни параметрів та перехідні процеси. Більш складні детерміновані динамічні і стохастичні моделі, що відбивають вплив на об'єкт значень вхідних впливів у даний, а й у минулі моменти часу і коли процеси в об'єкті чи його частина описуються випадковими функціями часу. У цих випадках для вирішення завдань управління доводиться використовувати складний математичний апарат теорії ймовірностей та математичної статистики.

Типовим прикладом складної системи управління з розподіленими параметрами в теплоенергетиці є автоматизований технологічний комплекс: теплова електростанція-енергоблок-агрегат (парогенератор, турбогенератор та ін). При моделюванні системи організації управління таким комплексом можна скористатися спрощеним поняттям узагальненого об'єкта управління, що характеризується лише невеликою кількістю загальних головних ознак – блокового компонування та однотипністю основного енергообладнання.

Структура розподіленої системи управління узагальненої ТЕС, реалізована з допомогою різних технічних засобів, показано на рис.1.

Кожен елемент цієї системи має власний центр (щит) управління, всі разом – систему ешелонів організаційної ієрархії, що склалася: центральний, блоковий і місцевий (агрегатний) щити управління (ЦЩУ, БЩУ і МЩУ). Цю ієрархію формалізують так:

$$S_j = \{S, >\}, \quad (1)$$

де:  $S$  – задане сімейство керованих підсистем  $S_j$ ;  $j \in J$  – кінцева множина значень індексу  $j = \{1, 2, \dots, m\}$ ;  $>$  – впорядковує  $S$  ставлення, таке, що з  $m > m-1$  підсистема (елемент)  $S_m$  має пріоритет стосовно  $S_{m-1}$ .

Наприклад, ЦЩУ має пріоритет стосовно БЩУ у сенсі прийняття рішень з управління.

Ієрархічний принцип організації управління ТЕС сприяє вирішенню конфліктних ситуацій, що виникають при цьому, наприклад:

1. Управління подачею повітря в топку за умовою стабілізації  $O_2$  (у відсотках) за котлом, що задається режимною картою, може відрізнятись від оптимального завдяки мінливості фактичного оптимуму  $O_2$ . Розбіжність чисельних значень критеріїв управління (внутрішньорівневий конфлікт цілей) можна усунути втручанням вищого центру (розпорядженням старшого оператора енергоблоку) або подачею керуючого сигналу загальнооблокової АСУ ТП, що має у складі програмного забезпечення спеціальну прикладну програму з корекції критерію управління в нових умовах роботи.

2. Протиріччя між системами стабілізації теплового навантаження окремого енергоблоку за умовами економії палива та регулювання частоти та потужності станції в цілому, за умовою стабілізації частоти на електричних шинах станції (міжрівневий конфлікт цілей управління).

Названі протиріччя усувають покладанням лише на одну систему (елемент) права прийняття рішення, спрямованого на досягнення глобальної мети управління. У наведеному прикладі таким елементом (центром) є ЦЦУ. Маючи експериментальні або аналітичні залежності, що встановлюють зв'язок між вхідними і вихідними величинами об'єкта управління  $(x_j, y_j)$ , інформаційними і керуючими сигналами підсистем управління  $(z_j, u_j)$ , можна записати ці зв'язки у вигляді простого абстрактного функціоналу:

$$y_j = S_j(x_j, u_j, z_j). \quad (2)$$

Вимоги до складання детермінованих математичних моделей суперечливі. З одного боку, вони мають бути повними, з іншого – досить простими розуміння користувачів. Компроміс між простотою та повнотою математичного опису складних систем досягається багаторівневим ієрархічним уявленням.

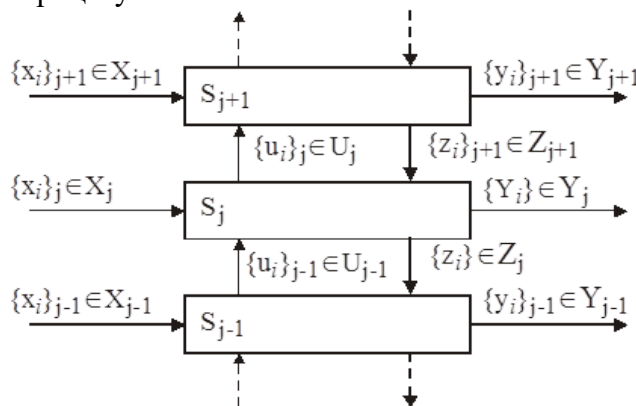
Умови складання незалежних моделей сімейства підсистем  $S$ , що взаємодіють між собою за допомогою інформаційної  $H_j$  та керуючої  $C_j$  функцій, можуть бути записані у формі вхід-вихід:

$$z_{j+1} = H_j(y_j); u_{j-1} = C_j(y_j); \quad (3)$$

Енергоблоки ТЕС, які є її основними структурними елементами, є складними динамічними системами з розподіленими параметрами.

Загальні властивості подібних систем полягають у тому, що технологічні процеси, що протікають в них (наприклад, процес генерації пари в парогенераторі) можна розглядати як одномірні розподілені системи, довільна точка технологічного простору яких може бути задана однією просторовою координатою.

Характерною особливістю таких розподілених процесів є те, що їх стан можна визначати двома різними способами: або розглядати зміну параметрів процесу в часі у фіксованих точках технологічного простору, або розглядати зміну параметрів уздовж просторової осі процесу в окремі фіксовані моменти часу. У першому випадку стан процесу визначається звичайними часовими сигналами, що надходять з окремих точок технологічного простору. У другому випадку стан процесу визначається функцією зміни параметрів уздовж просторової осі процесу в даний момент часу, яка названа просторовим сигналом розподіленого процесу.



**Рис. 1** – Структура багаторівневої ієрархічної системи

$S_j$  - підсистема, сімейство математичних моделей;  $j = (1 < j < m)$  – міжсистемні індекси;  $\{x_i\}_j \in X_j$ ,  $\{y_i\}_j \in Y_j$ ,  $\{z_i\}_j \in Z_j$ ,  $\{u_i\}_j \in U_j$  – підмножина вхідних, вихідних, інформаційних та керуючих сигналів;  $i (i = 1, 2, \dots, g, k, l, n, \dots)$  – кінцева множина внутрішньосистемних індексів.

Стан таких систем у випадку визначається диференціальними рівняннями у приватних похідних і відповідно двовимірними передатними функціями і частотними характеристиками. Для дослідження властивостей таких систем у просторовій ділянці можуть бути використані просторові передавальні функції та частотні характеристики, що є відповідно зображеннями Лапласа та Фур'є просторових сигналів для фіксованих моментів часу при імпульсному (по відношенню до просторової координати) дії.

Просторові передавальні функції та амплітудно-фазові характеристики визначають властивості розподіленої системи у просторовій області та дозволяють як якісно, так і кількісно оцінити розподіленість системи у просторі.

Завдання моделювання розподілених систем може бути виконане у двох постановках. У першому, більш загальному випадку ставиться завдання відображення розподіленої системи. Такі моделі названі просторовими. У просторових моделях інформацію про стан моделі системи отримують у вигляді дискретної тимчасової послідовності просторових сигналів.

У другому, окремому випадку ставиться завдання відтворення стану моделюється системи лише в окремих точках технологічного простору. Такі моделі названі структурними.

Відтворення як структурних, так і просторових моделей за допомогою засобів обчислювальної техніки може виконуватися завданням оператора, що встановлює відповідність між функціями зміни вихідних та вхідних параметрів системи, що моделюється, і алгоритму відтворення цього оператора. Таким оператором зазвичай є система диференціальних рівнянь, що описує стан процесу, що моделюється.

Інший спосіб моделювання систем – завдання функціоналу, що визначає значення параметрів системи на виході в залежності від функції зміни вхідних величин та алгоритму відтворення такого функціоналу. У загальному випадку моделювання нелінійних систем як таке функціональне співвідношення може бути прийнятий функціональний ряд Вольтера, який для лінійних систем вироджується в інтеграл згортки.

При відтворенні в цифрових обчислювальних машинах просторових лінійних моделей ядром функціоналу є просторова імпульсна характеристика розподіленої системи, що моделюється. Необхідно відзначити, що незважаючи на наявність потужного математичного апарату, його практичне використання поки що є обмеженим у технічних системах автоматичного управління. Це зумовлено, переважно, такими причинами:

- наявні методи через свою складність мало доступні для інженерного проектування;
- специфіка об'єктів управління та технічних процесів не дозволяє вирішувати поставлені завдання математичного моделювання лише на основі зазначених вище загальних методів, а потребує додаткових теоретичних та експериментальних досліджень;
- використання складних та багатовимірних методів в АСУ ТП енергетичних об'єктів та технологічних процесів потребує великих ресурсів інформаційного та програмно-технічного забезпечення.

Ці обставини зумовили пошук спрощених способів математичного моделювання для можливості їх практичної реалізації в АСУ ТП як на рівні ЕС, так і на загальноблочному та агрегатному рівнях керування.

У тих випадках, коли може бути прийнято припущення про об'єкт як систему із зосередженими параметрами, перехідні процеси зазвичай описуються звичайними диференціальними рівняннями.

Формалізація мети управління полягає у виведенні та дослідженні особливостей математичної залежності між критерієм управління (показником якості управління) та параметрами математичної моделі. У задачах оптимального керування шукається екстремум критерію керування. Часто метою управління лише виконання заданих обмежень на вихідні величини (параметри), тобто. забезпечення нормального функціонування об'єкта.

Формалізація самих законів оптимального управління у вигляді відповідних алгоритмів, що являють собою математично суворе рішення задачі управління, є в даний час

однією з найскладніших і до кінця невіршених проблем через їхню велику розмірність та відсутність універсальних математичних методів рішення.

Для порівняно простих випадків оптимального управління можливе безпосереднє вирішення завдань для всієї системи, що розглядається як єдине ціле, із загальним критерієм управління. У цьому обчислюються значення всіх параметрів системи, відповідних оптимальному рішенню, і завдання зводиться підтримки цих заданих значенні параметрів, тобто. до порівняно нескладних схем автоматичної стабілізації, програмного чи стежить регулювання. Слід наголосити, що подібний підхід до розв'язання задачі оптимального управління є нині найпоширенішим.

Для важких завдань раціонального управління ефективним прийомом за її вирішенні є декомпозиція основний завдання, тобто її розбиття на ряд простіших складових. При декомпозиції широко використовують евристичні методи, що базуються на результатах досвіду та інтуїції без повного доказу вибору запропонованих дій.

Зазвичай при цьому слідує ієрархічності існуючих систем управління, що природно склалася. Це дозволяє уявити вихідне завдання як комплекс набагато більш простих завдань, які певним чином розташовані по сходах ієрархії з властивими подібним системам особливостями: спрощення видів зв'язку між змінними принаймні переміщення по ієрархії знизу вгору, зменшення при цьому необхідної для управління інформації та «скородії» керуючих дій і т.д.

Істотне спрощення багатьох завдань досягається також завдяки зменшенню інтервалів часу, у яких вирішуються завдання управління.

При декомпозиції завдань управління відбувається як декомпозиція цілей управління, і виникнення їх ієрархії. Управління кожним із елементів складного об'єкта за приватним критерієм вимагає ув'язування не тільки із загальним критерієм управління, а й із приватними критеріями всіх інших елементів. Пріоритет критерію, очевидно, повинен бути тим вищим, чим вищий ступінь управління стосовно аналізованої. Практично це досягається шляхом завдання верхнім щаблем нижньої додаткових обмежень.

Після формалізації приватних завдань управління може бути розглянута можливість їх подальшого спрощення (наприклад, заміна нелінійної динамічної моделі лінійної щодо малої флуктуації параметрів у динамічних процесах; заміна динамічної моделі статичної при обліку впливу динаміки об'єкта у вигляді «перешкоди» тощо).

Вибір конкретних математичних методів на вирішення підготовленої в такий спосіб тієї чи іншої завдання управління залежить від особливостей і характеристик досліджуваної системи, а й від обмежень, накладених на процес управління конструкцією технологічного устаткування й режимами його експлуатації.

Дотримуючись залежності (2) стосовно кожного енергоблоку ЕС кінцеві множини вхідних впливів  $x=\{x_i\}X$  є зміною витрати води, палива, повітря і т.д. До безлічі вихідних впливів (сигналів)  $y=\{y_i\}Y$  відносять зміни електричної потужності, продуктивності парогенераторів та турбогенераторів, а також параметри, що характеризують стан енергоносіїв на виході блоку (тиск, температура, ентальпія та ін.).

Для окремих моделей «відповідним» рівнем математичної абстракції будуть рівняння матеріального та енергетичного балансів, за якими розраховуються ТЕП енергоблоків та станції в цілому, а також диференціальні рівняння (передавальні функції, комплексні частотні характеристики та ін.), що описують перехідні процеси в парогенераторах та турбінах. На основі цих рівнянь визначається вид керуючих впливів для досягнення оптимальних значень ТЕП у стаціонарному та перехідних режимах.

Перед складанням математичних моделей ЕС необхідно визначити канали передачі регулюючих, керуючих та впливів, що обурюють, для кожного об'єкта управління. При цьому технологічний об'єкт управління (ТОУ) розглядається у вигляді самостійної ланки складної системи та визначається як сукупність технологічного обладнання та реалізованого на ньому технологічного процесу виробництва.

Як об'єкт управління, який характеризує технологічний процес на ТЕС загалом, зазвичай вибирають стандартний енергоблок. У цьому випадку технологічний процес можна представити у вигляді двох послідовних процесів: у парогенераторі та турбогенераторі. Для укрупнених моделей ТЕС подальша деталізація процесів є недоцільною. З іншого боку, представлення математичної моделі ТЕС у вигляді сімейства незалежних моделей двох вертикально підпорядкованих підсистем - електростанції та енергоблоку відповідно до визначення стратифікації складних систем буде неправомірним. Так як зовнішні збурення з боку енергосистеми, які надходять на ТЕС по двох каналах вхідних впливів - частоті та потужності, впливають через загальні шини електростанції на основні вихідні величини ТЕС та енергоблоку одночасно. Це змушує представляти модель ТЕС як сімейства однорівневих моделей енергоблоку з єдиним технологічним процесом, що з двох послідовних процесів.

При математичному описі технологічних процесів ТЕС використовуються моделі статички, що описують стани, що встановилися, і моделі динаміки, що описують перехідні режими. Ці моделі можуть бути побудовані аналітичним та експериментальним методом або в результаті їх спільного використання. Крім того, модель статички може бути отримана з моделі динаміки, як її окремий випадок: з перехідної характеристики при  $t \rightarrow \infty$ ; з передавальної функції при  $s \rightarrow \infty$ ; з частотної характеристики при  $\omega \rightarrow \infty$ .

Математичні моделі статички об'єктів ТЕС можуть бути представлені кількома видами. Перший вид моделей визначає зв'язок між будь-яким входом  $x_i$  і відповідним йому виходом  $y_i$  в режимі роботи енергоблоку, що встановився. Моделі складаються у формі рівнянь алгебри, таблиць або графічних залежностей:

$$y_i = f(x_i). \quad (4)$$

Для лінеаризованих систем:

$$y_i = k_i \cdot x_i. \quad (5)$$

Для нелінійних систем, до яких належать всі промислові об'єкти при зміні вхідних сигналів у широкому діапазоні значень, складається додаткове сімейство моделей статички, які визначають зв'язок між значеннями  $k_i$  та навантаженням об'єкта, що змінюється від мінімального до номінального значень:

$$y_i = f(l_i), \quad (6)$$

де:  $l_i = N_{\phi} / N_o$  ( $N_{\phi}$  - фактична,  $N_o$  - номінальне навантаження).

Моделі динаміки промислових об'єктів, що використовуються в завданнях управління, найчастіше складаються із застосуванням способів декомпозиції складних систем та методів структурного аналізу, які дозволяють уявити складні системи у вигляді з'єднання простіших ланок.

### **Висновки**

При створенні нових АСУ ТП енергоблоків, електростанцій та енергосистем слід виходити не тільки зі структури організаційного управління, що склалася. Необхідно передусім дотримуватись системного підходу до проблеми автоматизованого управління загалом і до основного завдання, яке система має вирішувати. Для цього використовуються категорії математичної страти, дерева цілей, шару прийняття рішень та організаційної ланки (центру) управління. У зв'язку з тим, що центри верхнього рівня мають справу з укрупненими підсистемами, проблема прийняття рішення розглядається тут як складніша, а математичні моделі верхніх страт завжди мають більше невизначеностей порівняно з нижніми. Наприклад, на верхньому рівні управління ЕС виникає необхідність урахування додаткових джерел зовнішніх збурень (додаткових невизначеностей) каналами міжсистемних зв'язків та інших факторів. Для важких завдань раціонального управління ефективним прийомом за її вирішенні

є декомпозиція основний завдання, тобто її розбиття на ряд простіших складових. При декомпозиції широко використовують евристичні методи, що базуються на результатах досвіду та інтуїції без повного доказу вибору запропонованих дій.

**Список використаних джерел:**

1. Демченко В. А. Автоматизація та моделювання технологічних процесів АЕС та ТЕС / В. А. Демченко. – Одеса : Астропринт, 2001. – 308 с.
2. Горелік А. Х. Автоматизовані системи управління технологічними процесами ТЕС та АЕС / А. Х. Горелік. – Харків : НТУ "ХПІ", 2004. – 236 с.
3. Дуель М. А. Автоматизовані системи керування енергоблоками теплових та атомних електростанцій / М. А. Дуель. – Харків : ПП "КіК", 2006. – 420 с.
4. Артюх С. Ф. Автоматизовані системи керування технологічними процесами в енергетиці / С. Ф. Артюх, М. А. Дуель, І. Г. Шелепов. – Харків : Знання, 2001. – 416 с.
5. Нова енергетична стратегія України до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність» [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/doccatalog/document?id=244996332> (дата звернення 23.11.23)
6. Оцінка енергетичної політики України в порівнянні з кращими європейськими практиками реалізації політики у сфері енергоефективності та відновлюваної енергетики [Електронний ресурс] / Д. Вайс, В. Каленборн, Г. Брандл та ін.; за ред. Д. Вайса. – Київ, 2014. – Режим доступу : [http://journal.esco.co.ua/esco/2015\\_3\\_4/log/art45.pdf](http://journal.esco.co.ua/esco/2015_3_4/log/art45.pdf). (дата звернення 23.11.23)
7. Халатов А. А. Енергетика України: сучасний стан та найближчі перспективи / А. А. Халатов // Вісник НАН України. – 2016. – № 6. – С. 53–61.
8. Анализ методов и моделей оптимального распределения нагрузок между энергогенерирующими объектами / А. В. Ефимов, Т. В. Потанина, Д. И. Кухтин, В. Л. Каверцев, Т. А. Гаркуша // Вестник НТУ «ХПИ». Серия «Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование». – 2015. – № 16. – С. 117–123.
9. Канюк Г. И. Прецизионные системы автоматического регулирования гидротурбины / Г. И. Канюк, А. Ю. Мезеря, В. Е. Мельников // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія "Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування". – 2015. – № 17(1126). – С. 91–96.
10. Модель энергосберегающего управления низкопотенциальным комплексом электростанций по оптимуму расхода циркуляционной воды / Г. И. Канюк, А. Ю. Мезеря, А. Р. Фокина, И. А. Бабенко // Молодой Вчений. – 2015. – №6(21), ч.1. – С. 27–31.
11. Куценко А. С. Уточнение параметров нелинейных оптимальных регуляторов каналов многоканальных систем при последовательном синтезе / А. С. Куценко, Т. Б. Никитина // Вестник НТУ «ХПИ». Серия: Системный анализ, управление и информационные технологии. – Харьков, 2005. – Вып. 59. – С. 17–25.
12. Любчик Л. М. Коррекция автоматизированного расчета технико-экономических показателей энергоблока / Л. М. Любчик, Г. Л. Гринберг // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Тем. вип.: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. – Харків : НТУ «ХПІ», 2006. – Вып. 19.
13. Северин В. П. Моделі і методи оптимізації показників якості систем автоматичного управління енергоблоку атомної електростанції : автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.13.07 / В. П. Северин. – Харків, 2007. – 35 с.
14. Северин В. П. Математическое моделирование парогенератора атомного энергоблока / В. П. Северин, Е. Н. Никулина // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків : НТУ «ХПІ», 2006. – № 19. – С. 145–150.
15. Интеллектуальный анализ при комплексном моделировании для повышения надежности работы энергетического оборудования / В. А. Арсирий, С. Г. Антошук, Е. А. Арсирий, В. И. Кравченко. // Радиоелектронні і комп'ютерні системи. – 2012. – № 6(58). – С. 89–94.

**Reference:**

1. Demchenko, VA 2001, *Avtomatyzatsiia ta modeliuvannia tekhnolohichnykh protsesiv AES ta TES [Automation and modeling of technological processes at NPPs and TPPs]*, Astroprynt, Odessa.
2. Horelik, AK 2004, *Avtomatyzovani systemy upravlinnia tekhnolohichnymy protsesamy TES ta AES [Automated control systems for technological processes at TPPs and NPPs]*, NTU "KhPI", Kharkiv.
3. Duel, MA 2006, *Avtomatyzovani systemy keruvannia enerhoblokamy teplovykh ta atomnykh elektrostantsii [Automated control systems for power units of both thermal and nuclear power plants]*, PP "KiK", Kharkiv.
4. Artiukh, SF, Duel, MA, Shelepov, IH 2001, *Avtomatyzovani systemy keruvannia tekhnolohichnymy protsesamy v enerhetytsi [Automated control systems for technological processes in the energy sector]*, Znannia, Kharkiv.
5. Kabinet Ministriv Ukrainy 2017, *Nova enerhetychna stratehiia Ukrainy do 2035 roku: «Bezpeka, enerhoefektyvnist, konkurentospromozh-nist» [The new energy strategy of Ukraine until 2035 "Security, Energy Efficiency, Competitiveness"]*, viewed 23 November 2023 <<http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/doccatalog/document?id=244996332>>



6. Vais, D, Kalenborn, V, Brandl, H 2014 *Otsinka enerhetychnoi polityky Ukrainy v porivnianni z krashchymy yevropeiskymy praktykamy realizatsii po-lityky u sferi enerhoefektyvnosti ta vidnovliuvanoi enerhetyky [The assessment of Ukraine's energy policy compared to the best European practices in implementing policies related to energy efficiency and renewable energy sources]*, viewed 23 November 2023 <[http://journal.esco.co.ua/esco/2015\\_3\\_4/log/art45.pdf](http://journal.esco.co.ua/esco/2015_3_4/log/art45.pdf)>.
7. Khalatov, AA 2016 'Enerhetyka Ukrainy: suchasnyi stan ta naiblyzhchi perspektyvy' [*Energy sector in Ukraine: current state and near-term perspectives*], *Visnyk NAN Ukrainy*, no 6, Pp. 53-61.
8. Efymov, AV, Potanyna, TV, Kukhtyn, DY, Kavertsev, VL & Harkusha, TA 2015, 'Analyz metodov y modelei optymalnoho raspredeleniya nahruzok mezhdru enerhohenergyru-yushchymy ob'ektamy' [*Analysis of methods and models for optimal load distribution among energy-generating facilities*], *Vestnyk NTU «KhPY»: Seryia «Enerhetycheskie y teplotekhnicheskiye protsessy y oborudovanye»*, no 16, Pp. 117-123.
9. Kaniuk, HI, Mezeria, AYU & Melnykov, VE 2015, 'Pretsyzionnie systemy avtomatycheskoho rehulyrovannya hydroturbyni' [*Precision automatic regulation systems for hydro turbines*], *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu "KhPI". Seriya "Enerhetychni ta teplotekh-nichni protsesy y ustakuvannia"*, no 17(1126), Pp. 91-96.
10. Kaniuk, HI, Mezeria, AYU, Fokyna, AR & Babenko, YA 2015, 'Model enerhosberehaiushcheho upravleniya nyzkopotentsyalnim kompleksom elektrostantsyi po optymumu raskhoda tsyrkvodi' [*Model of energy-saving control for a low-potential complex of power stations optimizing water circulation*], *Molodyi Vchenyi*, no 6(21), ch. 1, Pp. 27-31.
11. Kutsenko, AS & Nykytyna, TB 2005, 'Utochnenye parametrov nelyneinikh optymalnikh rehulyatorov kanalov mnohokanalnikh system pry posledovatelnom synteze' [*Refinement of parameters for nonlinear optimal controllers of channels in multi-channel systems through sequential synthesis*], *Vestnyk NTU «KhPY». Systemnyi analiz, upravlenye y informatsionnie tekhnolohyy*, Iss. 59, Pp. 17-25.
12. Liubchuk, LM & Hrynberh, HL 2006, 'Korrektsiya avtomatyzirovannoho rascheta tekhniko-ekonomycheskykh pokazatelei enerho-bloka' [*Correction of automated calculation of technical and economic indicators of a power unit*], *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «Kharkivskiy politekhnichnyi instytut». Tematychnyi vypusk: Systemnyi analiz, upravlinnia ta informatsiini tekhnolohii*, Iss 19.
13. Severyn, VP 2007, 'Modeli i metody optymizatsii pokaznykiv yakosti system avtomatychnoho upravlinnia enerho-bloku atomnoi elektrostantsii' [*Models and methods for optimizing the quality indicators of automatic control systems for a nuclear power plant's power unit*], *Doct.tekhn.n. abstract*, Kharkiv.
14. Severyn, VP, Nykulyna, EN 2006, 'Matematycheskoe modelirovanye paroheneratora atomnoho enerhobloka' [*Mathematical modeling of the steam generator of a nuclear power unit*], *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «Kharkivskiy politekhnichnyi instytut»*, no 19, Pp. 145-150.
15. Arsyryi, VA, Antoshchuk, EA, Arsyryi, EA & Kravchenko, VY 2012, 'Yntellektualnii analiz pry kompleksnom modelirovannyi dlia povisheniya nadezhnosti raboti enerhetycheskoho oborudovannya' [*Intelligent analysis in comprehensive modeling to enhance the reliability of energy equipment operation*], *Radioelektronni i kompiuterni systemy*, no 6(58), Pp. 89-94.

Стаття надійшла до редакції 27 листопада 2023 року.