

DOI: <https://doi.org/10.32820/2079-1747-2024-33-51-63>  
УДК 621.22.018.8

## **ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ РОБОТИ ОБЛАДНАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ СТАНЦІЙ ТА ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ ШЛЯХОМ ВИКОРИСТАННЯ ШВИДКОДІЮЧИХ ПРЕЦИЗІЙНИХ ТА ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ**

© **Канюк Г.І., Цветкова-Канюк А.О.**

*Українська інженерно-педагогічна академія*

### **Інформація про авторів:**

**Канюк Геннадій Іванович (Kanjuk Gennadii):** ORCID: 0000-0003-1399-9039; Українська інженерно-педагогічна академія, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій, вул. Університетська, 16, м. Харків, 61003, Україна.

**Цветкова-Канюк Анна Олександрівна (Tsvetkova-Kanyuk Anna):** ORCID: 0009-0009-9059-4052; e-mail: [annacvetkovakanuk@gmail.com](mailto:annacvetkovakanuk@gmail.com), Українська інженерно-педагогічна академія, аспірант кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій, вул. Університетська, 16, м. Харків, 61003, Україна.

У статті розглянуто питання створення та удосконалення уніфікованих прецизійних швидкодіючих та енергозберігаючих систем керування обладнанням промислових підприємств. Показано загальний принцип функціонування електрогідравлічних систем стеження та зв'язок між електронним керуючим пристроєм і виконавчим механізмом об'єкта керування. Виконано аналіз існуючих принципів побудови та принципових схемних рішень прецизійних швидкодіючих систем керування та регулювання та тенденцій їхнього перспективного розвитку. Показано, що найефективнішими і найперспективнішими в цьому плані є мехатронні (зокрема електронно-гідравлічні) системи стеження. Розроблено уніфіковану структуру електрогідравлічних систем стеження та загальні принципи взаємодії її окремих структурних елементів (підсистем). Показано принципи енергозберігаючого керування технологічними об'єктами, викладено процедуру створення на їх основі енергозберігаючих систем керування. Намічено шляхи синтезу найбільш ефективного типового варіанта принципової схеми для використання в швидкодіючих прецизійних електрогідравлічних систем. Виконано порівняльний аналіз електричних та електрогідравлічних механізмів: розглянуто їх переваги, недоліки, визначено переважні (переважні) галузі застосування. На основі цього аналізу розроблено досить простий алгоритм попередньої (без детального теоретичного аналізу) оцінки переваги типу приводу для мехатронної системи. Наведено варіанти узагальненої принципової схеми електрогідравлічного перетворювача з розімкнутою (для приводів поступального та поворотного руху) та замкнутою (для приводів обертального руху) циркуляцією. Показано загальну процедуру організації енергозберігаючого автоматичного керування довільним технологічним об'єктом. Уточнено узагальнену функціональну та структурну схеми енергозберігаючої системи керування з використанням еталонної моделі (спостерігача стану) об'єкта керування.

**Ключові слова:** якість систем керування, електрогідравлічний перетворювач, енергозбереження, прецизійне керування, швидкодія.

**Kaniuk G., Tsvetkova-Kaniuk A.** “Improving the quality of operation of the equipment in power plants and industrial enterprises by using fast-acting, precision, and energy-saving control systems”

The article deals with the creation and improvement of unified, precision high-speed, and energy-saving equipment control systems for industrial enterprises. The general principle of operation

of electrohydraulic tracking systems, the connection between the electronic control device, and the executive mechanism of the control object are presented. An analysis of the existing construction principles and schematic solutions of high-precision, high-speed control and regulation systems, as well as the trends of their prospective development, was performed. It is shown that the most effective and promising in this regard are mechatronic (particularly electronic-hydraulic) tracking systems. A unified structure of electrohydraulic tracking systems and the general principles of interaction of its individual structural elements (subsystems) have been developed. The principles of energy-saving control of technological objects are shown, and the procedure for creating energy-saving control systems based on them is outlined. The methods for synthesizing the most effective typical version of the principle scheme for use in high-speed precision electrohydraulic systems are demonstrated. A comparative analysis of electric and electrohydraulic mechanisms was performed: their advantages and disadvantages were considered, and the predominant fields of application were determined. Based on this analysis, a simple algorithm for the preliminary assessment (without detailed theoretical analysis) of the advantage of the type of drive for a mechatronic system has been developed. Variants of the generalized principle diagram of an electrohydraulic converter with open (for translational and rotary motion drives) and closed (for rotary motion drives) circulation are given. The general procedure for organizing energy-saving automatic control of an arbitrary technological object is shown. The generalized functional and structural scheme of the energy-saving control system using the reference model (state observer) of the control object has been clarified.

**Keywords:** quality of control systems, electro-hydraulic converter, energy saving, precision control, speed.

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

Оснoву створення нових енерго- та ресурсозберігаючих технологій складають швидкодіючі прецизійні автоматизовані пристрої та системи, здатні з максимальною швидкістю та точністю виконувати задані, часом досить складні, послідовності технологічних операцій.

У галузі традиційних технологій створення та розвиток мехатронних систем обумовлено постійно зростаючими вимогами до автоматизації промислового виробництва, підвищення його продуктивності та якості продукції, що випускається. У цьому плані мехатронні системи, за рахунок ефективного синтезу механічних та електронних елементів, дозволяють створювати принципово нові механізми, машини та технологічні системи – швидкодіючі, прецизійні, високоінтелектуальні, що дозволяють виконувати складні різноманітні операції без участі людини. Ці фактори зумовлюють інтенсивний прогрес у розвитку мехатронних систем та зростання частки мехатроніки серед інших технологічних методів.

Одна з сучасних тенденцій промислового розвитку ряду розвинених у технологічному відношенні країн полягає у створенні номенклатурних дрібносерійних виробництв. При цьому, для того, щоб зв'язати між собою різнорідні складні машини і мати певні уявлення про стан виробничої системи, що змінюється в часі, необхідна реалізація дуже складних інформаційних функцій. Таким функціям цілком задовольняють мехатронні системи.

Особливий науковий та практичний інтерес становлять мехатронні системи з електрогідравлічними виконавчими механізмами (ЕГВМ). Такі системи, поєднуючи в собі високі питомі енергетичні характеристики електрогідравлічних механізмів з інтелектуальними та інформаційними можливостями керуючої мікропроцесорної електроніки, дозволяють з високою точністю та швидкістю відтворювати керуючі дії, що змінюються за довільними, в т.ч. та заздалегідь невідомим, законам.

Мехатронні пристрої з електрогідравлічними виконавчими механізмами, що стежать, можуть розглядатися як найбільш перспективний в даний час підклас мехатронних систем – електрогідравлічні системи стеження (ЕГСС). При впровадженні таких систем ефективно

вирішуються важливі та актуальні проблеми енерго- та ресурсозбереження у різних галузях техніки.

Основна наукова проблема створення швидкодіючих прецизійних ЕГСС полягає в ефективному синтезі наукових методів та теорій, що належать до об'єктів та процесів різної фізичної природи, – механічних, гідравлічних, електричних, електронних, інформаційних.

Ця проблема призводить до необхідності розробки на основі існуючих загальних методів та теорій спеціальної системної та конкретизованої теоретичної бази, яка б дозволяла швидко та ефективно, з мінімальними витратами часу та засобів, створювати ЕГСС з високими показниками точності та швидкодії.

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

У зв'язку з важливістю та актуальністю проблеми, розробкам та дослідженням ЕГСС присвячено значну кількість робіт наукових шкіл та колективів як в Україні, так і в зарубіжжі.

Вихідною науковою базою для створення та дослідження ЕГСС слід вважати фундаментальні, універсальні плани роботи в галузі гідравлічних приводів, теорії автоматичного управління, технічної кібернетики. Різноманітними теоретичними та прикладними завданнями у цій галузі займаються наукові школи НТУ «КПІ», Національного авіаційного університету, НТУ «ХПІ», Вінницького національного технічного університету та інші [1-6]. Розроблені системи прецизійного та енергозберігаючого керування впроваджено при керуванні паровими турбінами [7], гідравлічними турбінами [8], компресорними агрегатами доменних печей [9], нагнітальними установками [10], системами низькопотенційних комплексів електростанцій [11] та інше.

Незважаючи на велику кількість різноманітних, цікавих та корисних робіт у цій галузі, в даний час відсутня достатньо систематизована та універсальна теоретична база для створення та дослідження прецизійних швидкодіючих ЕГСС, що ускладнює та уповільнює процеси їх розробки та впровадження. Існуючі методи є або загальні метатеорії, які вимагають конкретизації та наповнення конкретними прикладними методиками, математичними моделями та технічними рішеннями, або спрямовані на вирішення приватних завдань: типове конструкторське проектування, перевірочні розрахунки та параметричну оптимізацію вже існуючих або спроектованих систем. У цьому плані необхідні конкретизовані прикладні теорії та методики, які б охоплювали початкові, ключові та найбільш наукомісткі етапи створення швидкодіючих прецизійних ЕГСС: концептуальне проектування, математичне моделювання, структурний синтез (включаючи синтез ефективних регуляторів), динамічний аналіз, раціональний вибір параметрів.

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

Метою даної є розробка та удосконалення уніфікованих структур прецизійних швидкодіючих та енергозберігаючих систем керування, які можуть використовуватися в енерго- та ресурсозберігаючих технологічних процесах різних галузей промислово-господарського комплексу.

### **Виклад основного матеріалу**

ЕГСС є різновидом або підкласом загального класу мехатронних систем, побудованих на основі синтезу елементів механіки, електроніки та технічної кібернетики, в якій як виконавчий механізм використовується ЕГСП [12].

Основною функцією ЕГСС, як замкнутої системи автоматичного управління, що стежить, є відтворення із заданою точністю вхідного (що задає) впливу, яке, в загальному випадку може змінюватися по довільному, в тому числі наперед невідомому закону.

Одним з основних елементів у структурі ЕГСС є електрогідравлічний привід (ЕГП), що включає джерело гідравлічної енергії, електрогідравлічний підсилювач і виконавчий гідродвигун (рис. 1).

Загальний принцип функціонування ЕГСС наведено на рис. 1. При подачі на вхід системи зовнішнього (що задає) впливу в електронному керуючому пристрої (керуючої ЕОМ) на основі закладених алгоритмів формується керуючий вплив, що забезпечує відтворення впливу з заданою точністю і швидкістю. Ця дія реалізується (відпрацьовується) електрогідравлічним виконавчим механізмом (ЕГП) за допомогою перетворення в електрогідравлічному підсилювачі електричних сигналів керуючого впливу відповідні закони зміни гідравлічних параметрів (витрати і тиску) робочої рідини, що надходить у гідродвигун від джерела гідравлічної енергії. Гідродвигун забезпечує необхідний закон руху об'єкта управління, параметри якого фіксуються чутливими елементами (датчиками).

Зв'язок між електронним керуючим пристроєм (керуючої ЕОМ з відповідним алгоритмічним та програмним забезпеченням), з одного боку, і виконавчим механізмом та об'єктом управління з іншого боку забезпечується за допомогою пристроїв зв'язку з об'єктом (ПЗО), що являють собою апаратні засоби загального інтерфейсу зв'язку з об'єктом та включають ЦАП, АЦП, підсилювачі потужності.

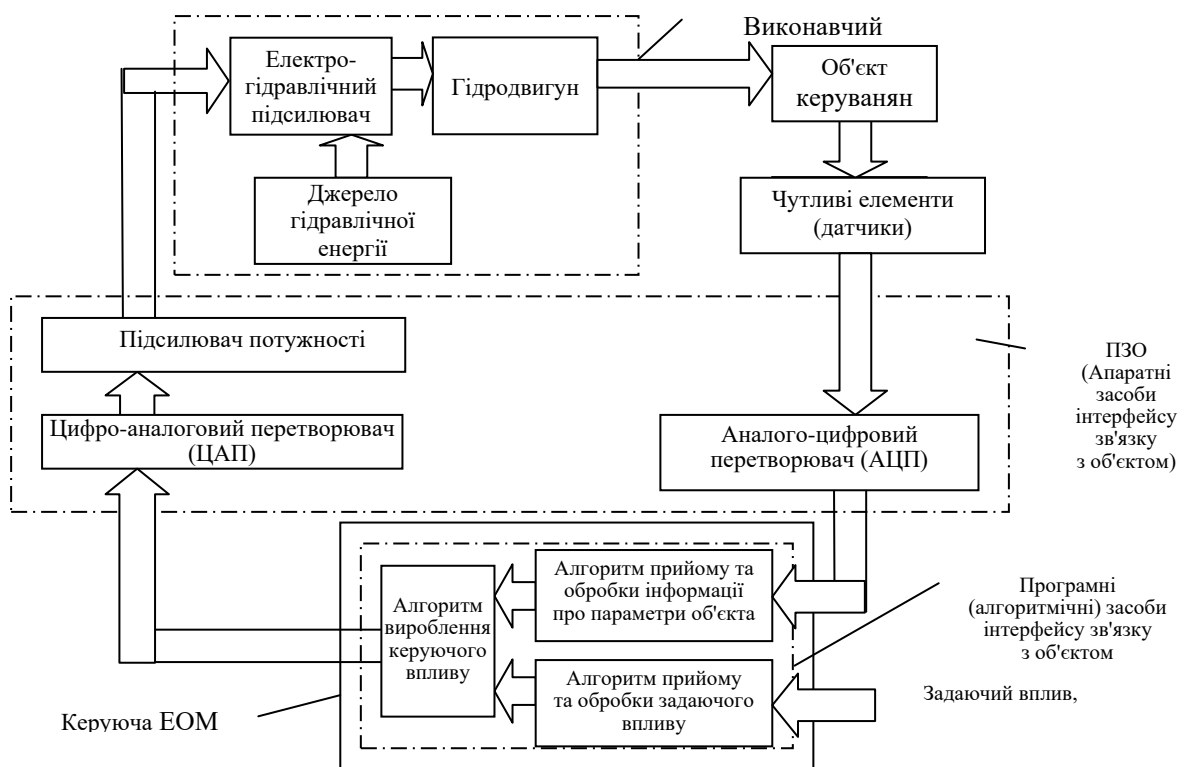


Рис. 1 - Загальна структура ЕГСС

Виконано порівняльний аналіз електричних та електрогідравлічних механізмів: розглянуто їх переваги, недоліки, визначено переважні (переважні) галузі застосування. На основі цього аналізу, а також з урахуванням рекомендацій, наведених у [12], розроблено досить простий алгоритм попередньої (без детального теоретичного аналізу) оцінки переваги типу приводу для мехатронної системи (рис. 2) [13]. Визначальними показниками є значення номінальної потужності  $N_n$  та постійного часу виконавчого механізму  $T_d$ , необхідне значення якої можна оцінити за заданими показниками швидкодії – часу регулювання (часу перебігу перехідного процесу)  $\tau_p$  або смузї пропускання (частоті зрізу)  $\omega_n$ : при аперіодичному

перехідному процесі постійна часу САУ становить приблизно третину загального часу перебігу перехідного процесу [13].

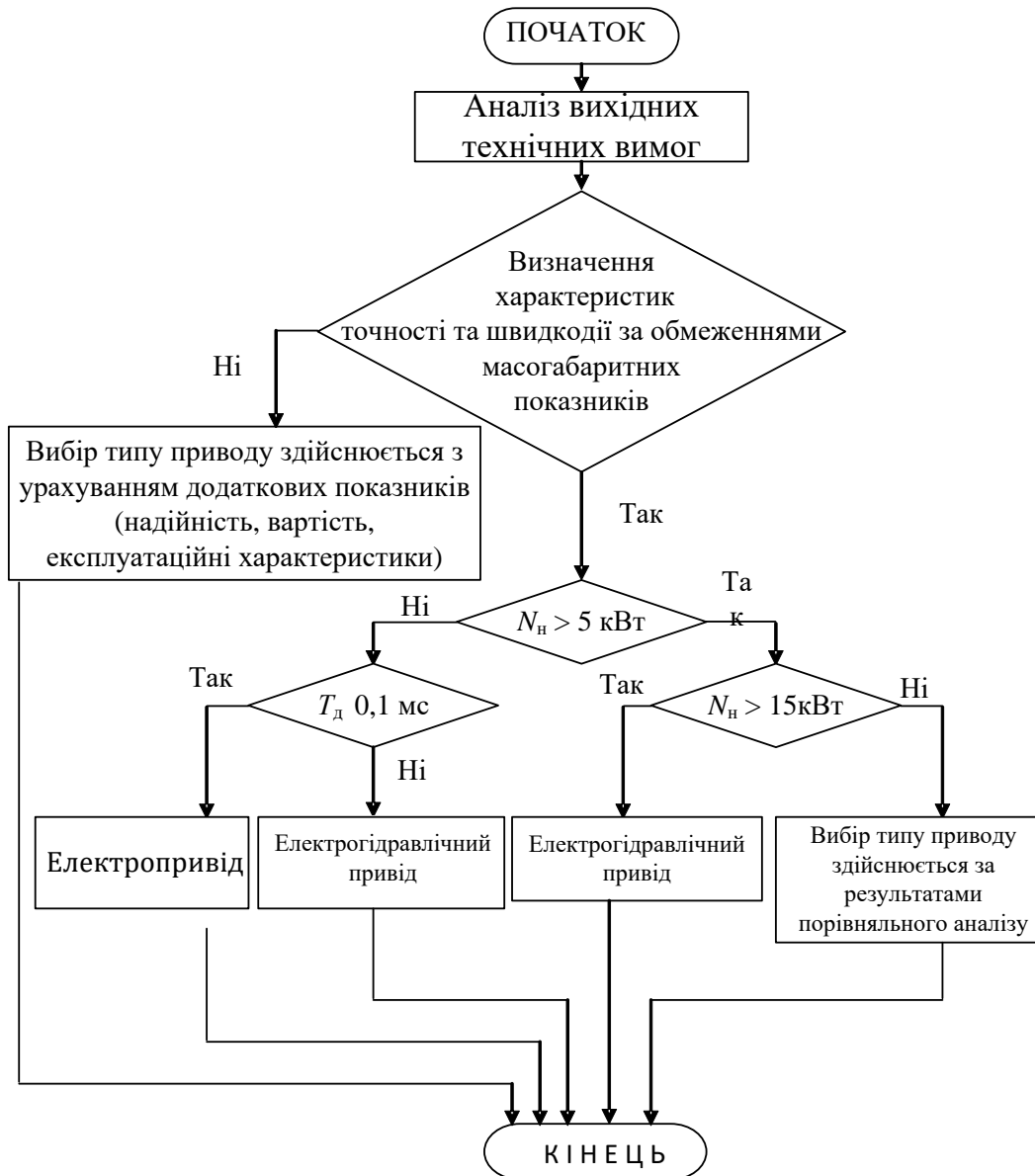


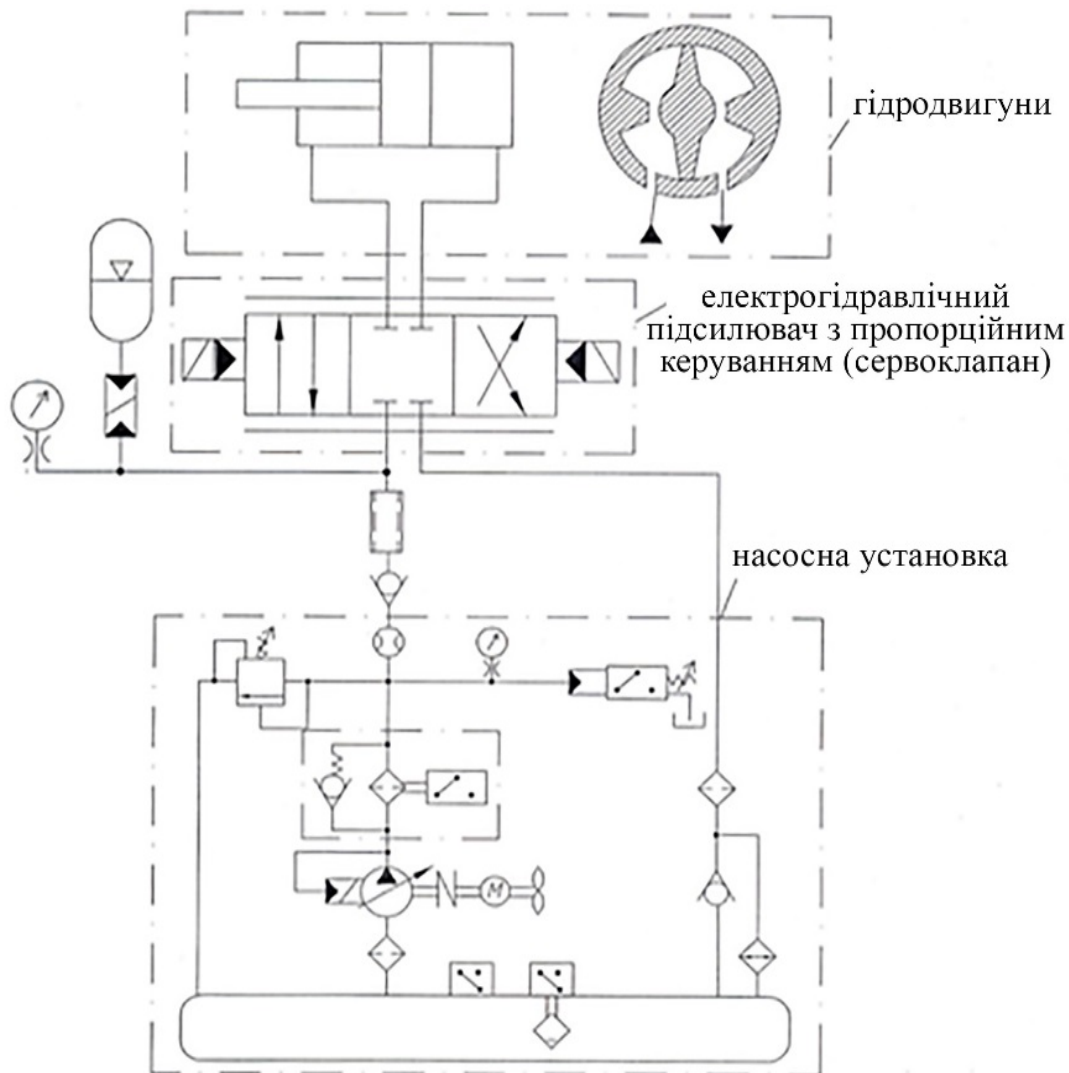
Рис. 2 - Алгоритм попереднього вибору типу приводу

Аналіз існуючих схемних рішень ЕГП дозволяє синтезувати найбільш ефективний типовий варіант принципової схеми для використання швидкодіючих прецизійних ЕГСС. Таким варіантом представляється одноканальний ЕГП роздільного виконання з об'ємно-дросельним регулюванням швидкості (як дросельний регулятор швидкості використовується пропорційний електрогідравлічний підсилювач (сервоклапан) з електрогідравлічним керуванням від аналогового або дискретного (цифрового) електронного регулятора (зокрема – від широтно-імпульсного) дроселювання потоків робочої рідини як на вході, так і на виході з автономним (обмеженою потужністю) насосно-акумуляторним джерелом живлення постійного тиску (з регульованим аксіально-поршневим насосом, що має електричний вхід), з об'ємним гідродвигуном поступального поворотного або обертального руху, із замкненою (для приводу обертального руху), або розімкнутою (для приводів поступального та поворотного руху) циркуляцією робочої рідини.

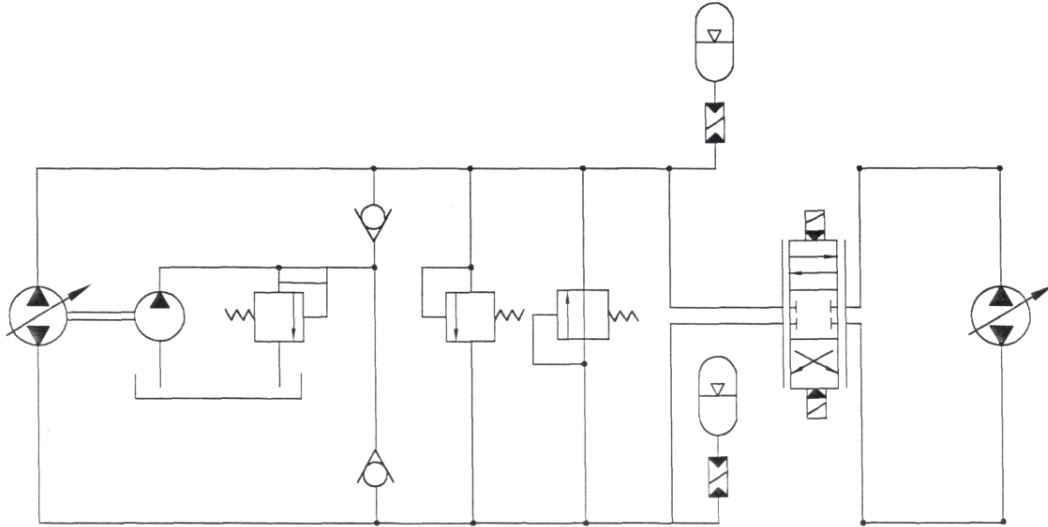
Така схема представляється найбільш універсальною та ефективною: об'ємно-дросельне регулювання, з одного боку, забезпечує три керовані входи (насос, сервоклапан та гідроаккумулятор), що підвищує можливості ефективного керування (дросельне регулювання забезпечує максимальну точність та швидкодію при роботі в найбільш відповідальних режимах, а об'ємне регулювання – енергетичну економічність під час роботи у менш відповідальних режимах). Наявність у системі живлення гідравлічного акумулятора (при цьому може використовуватися гідроаккумулятор з елементом управління процесами зарядки та розрядки) підвищує енергетичну ефективність приводу, може збільшувати його швидкодію (особливо при подоланні короткочасних пікових навантажень), а також згладжувати пульсацію тиску напірної лінії.

Інші типи приводів (струменеві, гідроімпульсні, хвильові) є менш універсальними (можуть застосовуватися для відтворення обмежених режимів руху та навантаження). Доцільність використання таких приводів має аналізуватись у кожному конкретному випадку.

Варіанти узагальненої принципової схеми ЕГП із розімкнутою (для приводів поступального та поворотного руху) та замкнутою (для приводів обертального руху) циркуляцією наведені на рис. 3, 4.



**Рис. 3** - Узагальнена принципова схема ЕГП із розімкнутою циркуляцією робочої рідини (для приводів поступального поворотного руху)



**Рис. 4** - Узагальнена принципова схема ЕГП із замкнутою циркуляцією робочої рідини (для приводу обертального руху)

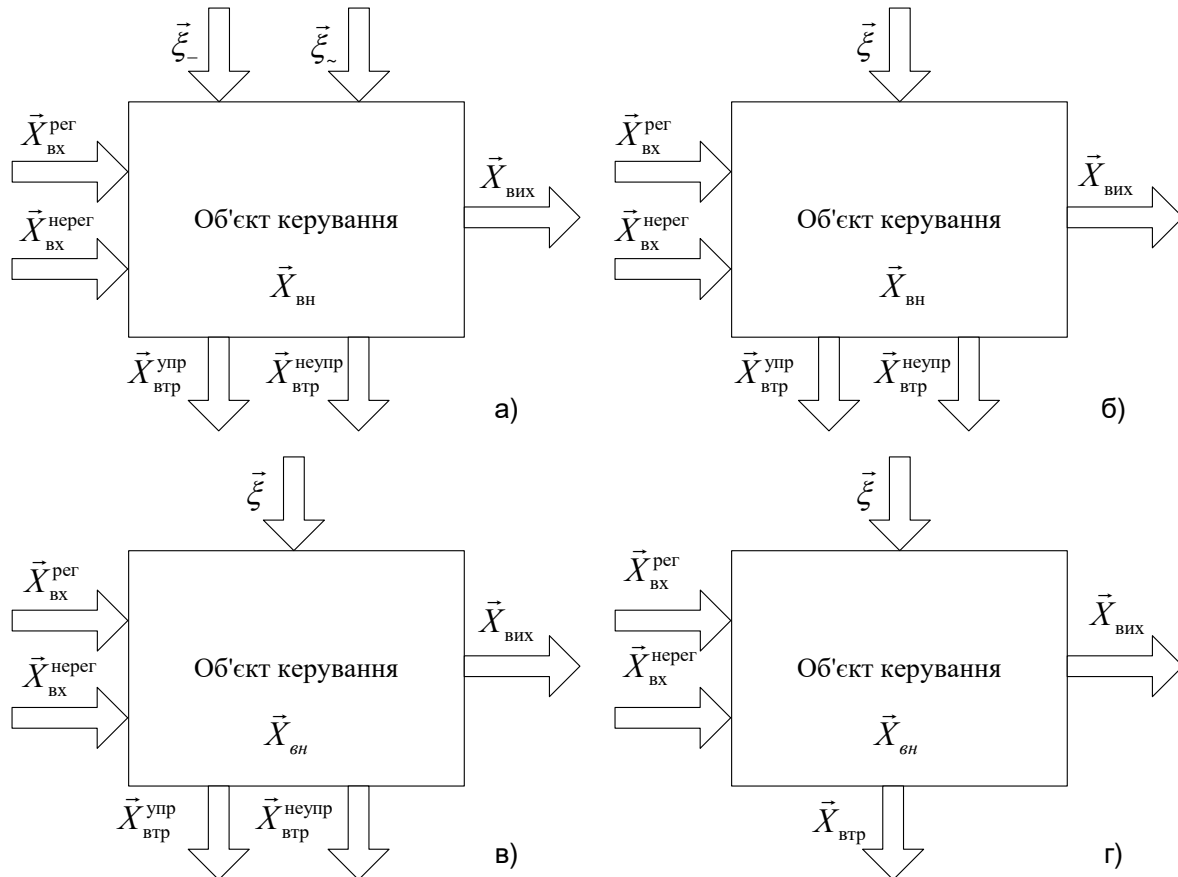
Допоміжні гідравлічні пристрої (баки, кондиціонери робочої рідини, фільтри, клапани, апаратура контролю та діагностики) повинні забезпечувати надійну роботу приводу.

Гідроприводи поворотного руху потребують, як правило, індивідуальної розробки. Багато швидкодіючих прецизійних електрогідравлічних системах автоматичного регулювання потрібні неповноповоротні технологічні переміщення без додаткових передавальних механізмів (наявність таких механізмів зменшує жорсткість зв'язку двигуна з робочим органом і, як наслідок, істотно знижує точність і швидкодію системи). Проблеми створення високодинамічних та надійних неповноповоротних гідродвигунів пов'язані з конструктивними та технологічними особливостями моментних гідроциліндрів (проблеми міцності, точності виготовлення сполучених деталей, опор, ущільнень тощо).

При створенні енергозберігаючих систем керування, будь-який технологічний об'єкт може бути охарактеризований наступним набором векторів:

- вектор вихідних (визначальних, контрольованих) параметрів  $\vec{X}_{\text{вих}}$  ;
- вектор вхідних регульованих параметрів  $\vec{X}_{\text{вх}}^{\text{рег}}$  ;
- вектор нерегульованих вхідних параметрів  $\vec{X}_{\text{вх}}^{\text{нерег}}$  ;
- вектор внутрішніх параметрів  $\vec{X}_{\text{вн}}$  ;
- вектор зовнішніх збурювальних впливів, що мають постійно-періодичний характер  $\vec{\xi}_{\text{п}}$  ;
- вектор зовнішніх випадкових збурювальних впливів  $\vec{\xi}_{\text{в}}$  ;
- вектор параметрів, що визначають керовані втрати енергії  $\vec{X}_{\text{втр}}^{\text{упр}}$  ;
- вектор параметрів, що визначають некеровані втрати енергії  $\vec{X}_{\text{втр}}^{\text{неупр}}$  .

Побудова математичних моделей складних об'єктів та функціональних взаємозв'язків полягає у виявленні та відображенні всіх основних найбільш суттєвих факторів та співвідношень. Не слід без необхідності перевантажувати моделі другорядними та малозначними параметрами та впливами, а забезпечення необхідної точності моделей може бути досягнуто шляхом використання математичних методів наближення функцій та апроксимації експериментальних характеристик.



**Рис. 5** - Узагальнена векторна структурна схема довільного технологічного об'єкта в залежності від ступеня спрощення

Для спрощення процесу моделювання (на шкоду точності), вектор втрат і зовнішніх збурень можуть бути об'єднані, тобто:

$$\vec{X}_{втр} = \vec{X}_{втр}^{упр} + \vec{X}_{втр}^{неупр} ;$$

$$\vec{\xi} = \vec{\xi}_- + \vec{\xi}_+ ,$$

тоді структурна схема спрощується, як показано на рис. 5. б).

З іншого боку, спрощення призводять до втрати цінної інформації, правильне використання якої може сприяти підвищенню рівня енергоефективності об'єкта, визначення резервів енергозбереження, своєчасної діагностики змін характеристик об'єкта, визначення необхідності ремонту та ін.

Так, наприклад, некеровані втрати енергії в технологічному об'єкті (рис. 6) не залежать від вхідних регульованих параметрів:  $\vec{X}_{втр}^{неупр} = f(\vec{X}_{вх}^{рег}) = const$ , але можуть залежати від вихідних:  $\vec{X}_{втр}^{неупр} = f(\vec{X}_{вих}) \neq const$ , тобто. залежати опосередковано від вхідних регульованих. Поряд з цим мають місце втрати, незалежні ні від вхідних та внутрішніх регульованих, ні від вихідних параметрів:  $\vec{X}_{втр}^{неупр} = f(\vec{X}_{вих}; \vec{X}_{вх}^{рег}; \vec{X}_{вн}) = const$ .

Величина керованих втрат  $\vec{X}_{втр}^{упр}$  визначає діапазон можливого енергозбереження, який можна реалізувати в процесі управління (верхня заштрихована область на рис. 6.), а також



визначає загальну та поточну ефективність САУ об'єкта та ступінь його керованості  $K_y = \bar{X}_{\text{втр}}^{\text{упр}} / \bar{X}_{\text{втр}}$ .

У той же час величина некерованих втрат  $\bar{X}_{\text{втр}}^{\text{неупр}}$  характеризує технічний стан устаткування (діагностика) і входить у визначення ступеня керованості об'єкта  $K_y = \bar{X}_{\text{втр}}^{\text{упр}} / (\bar{X}_{\text{втр}}^{\text{неупр}} + \bar{X}_{\text{втр}}^{\text{упр}})$ .

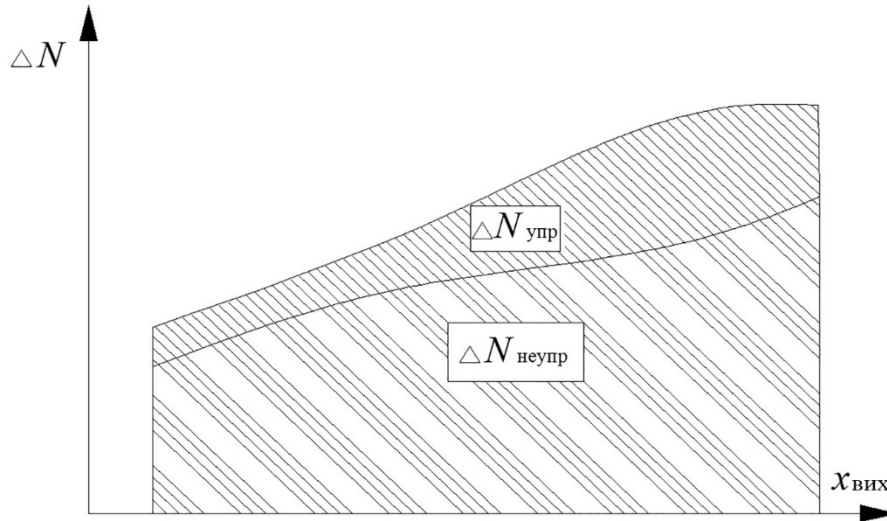


Рис. 6 - Керовані та некеровані втрати енергії

Визначення внутрішніх параметрів  $\bar{X}_{\text{вн}}$  також сприяє отриманню повнішої інформації та раціональному використанню як потенціал зовнішнього регулювання, а й внутрішнього потенціалу керованого об'єкта.

Загальна процедура організації енергозберігаючого автоматичного керування об'єктом може бути представлена таким чином:

1. Аналітичні функціональні взаємозв'язки між параметрами (математичні моделі) можуть бути представлені в наступному вигляді:

- загальна (початкова) модель

$$F(\bar{X}_{\text{вх}}^{\text{рег}}; \bar{X}_{\text{вх}}^{\text{нерег}}; \bar{X}_{\text{вн}}; \bar{X}_{\text{втр}}^{\text{упр}}; \bar{X}_{\text{втр}}^{\text{неупр}}; \bar{X}_{\text{вих}}; \bar{\xi}_-; \bar{\xi}_+) = 0,$$

або  $F(\bar{X}_{\text{вх}}^{\text{рег}}; \bar{X}_{\text{вн}}; \bar{X}_{\text{втр}}^{\text{р}}; \bar{X}_{\text{вих}}; \bar{\xi}) = 0$  – для спрощеної схеми

- модель (функція) керування (вектор вихідних параметрів)

$$\bar{X}_{\text{вих}} = f_{\text{вих}}(\bar{X}_{\text{вх}}^{\text{рег}}; \bar{X}_{\text{вх}}^{\text{нерег}}; \bar{X}_{\text{вн}}; \bar{X}_{\text{втр}}^{\text{упр}}; \bar{X}_{\text{втр}}^{\text{неупр}}; \bar{\xi}_-; \bar{\xi}_+),$$

або  $\bar{X}_{\text{вих}} = f_{\text{вих}}(\bar{X}_{\text{вх}}^{\text{рег}}; \bar{X}_{\text{вх}}^{\text{нерег}}; \bar{X}_{\text{вн}}; \bar{X}_{\text{втр}}; \bar{\xi})$  – для спрощеної схеми

- модель керованих енергетичних втрат

$$\bar{X}_{\text{втр}}^{\text{упр}} = f_{\text{втр}}(\bar{X}_{\text{вх}}^{\text{рег}}; \bar{X}_{\text{вх}}^{\text{нерег}}; \bar{X}_{\text{вн}}; \bar{X}_{\text{втр}}^{\text{неупр}}; \bar{\xi}_-; \bar{\xi}_+)$$

- модель некерованих енергетичних втрат

$$\vec{X}_{\text{втр}}^{\text{неупр}} = f_{\text{втр}} \left( \vec{X}_{\text{вх}}^{\text{рег}}; \vec{X}_{\text{вх}}^{\text{нерег}}; \vec{X}_{\text{вн}}; \vec{X}_{\text{втр}}^{\text{неупр}}; \vec{\xi}_-; \vec{\xi}_\sim \right)$$

- модель загальних енергетичних втрат

$$\vec{X}_{\text{втр}} = f_{\text{втр}} \left( \vec{X}_{\text{вх}}^{\text{рег}}; \vec{X}_{\text{вх}}^{\text{нерег}}; \vec{X}_{\text{вн}}; \vec{\xi}_-; \vec{\xi}_\sim \right),$$

або  $\vec{X}_{\text{втр}} = f_{\text{втр}} \left( \vec{X}_{\text{вх}}^{\text{рег}}; \vec{X}_{\text{вх}}^{\text{нерег}}; \vec{X}_{\text{вн}}; \vec{\xi} \right)$  – для спрощеної схеми

- модель керуючого впливу

$$\vec{X}_{\text{вх}}^{\text{рег}} = f_{\text{упр}} \left( \vec{X}_{\text{вих}}; \vec{X}_{\text{вх}}^{\text{нерег}}; \vec{X}_{\text{вн}}; \vec{X}_{\text{втр}}^{\text{упр}}; \vec{X}_{\text{втр}}^{\text{неупр}}; \vec{\xi}_-; \vec{\xi}_\sim \right),$$

або  $\vec{X}_{\text{вх}}^{\text{рег}} = f_{\text{упр}} \left( \vec{X}_{\text{вих}}; \vec{X}_{\text{вх}}^{\text{нерег}}; \vec{X}_{\text{вн}}; \vec{X}_{\text{втр}}; \vec{\xi} \right)$  – для спрощеної схеми

2. Мінімізація функції (функціоналу) енергетичних втрат:

$$\Phi = \min \left\{ \vec{X}_{\text{втр}}^{\text{упр}} + \vec{X}_{\text{втр}}^{\text{неупр}} \right\}, \text{ або } \Phi = \min \left\{ \vec{X}_{\text{втр}} \right\}$$

в якому, як аргументи, використовуються вектори регульованих вхідних впливів і внутрішніх регульованих параметрів:

$$\vec{X}_{\text{втр}} = f_{\text{втр}} \left( \vec{X}_{\text{вх}}^{\text{рег}}; \vec{X}_{\text{вн}} \right), \text{ або } \vec{X}_{\text{втр}} = f_{\text{втр}} \left( \vec{X}_{\text{вх}}^{\text{рег}} \right)$$

при заданих значеннях вектора вихідних параметрів:

$$\vec{X}_{\text{вих}} = \vec{X}_{\text{вих}}^{\text{зад}},$$

та заданих обмеження на інші параметри:

$$\vec{X}_{\text{вн}} = \left[ \vec{X}_{\text{вн}} \right];$$

$$\vec{X}_{\text{вх}}^{\text{нерег}} = \left[ \vec{X}_{\text{вх}}^{\text{нерег}} \right].$$

Мінімізація функціоналів  $\Phi = \min \left\{ \vec{X}_{\text{втр}}^{\text{упр}} = f_{\text{втр}} \left( \vec{X}_{\text{вн}} \right) \right\}$  і  $\Phi = \min \left\{ \vec{X}_{\text{втр}}^{\text{неупр}} = f_{\text{втр}} \left( \vec{X}_{\text{вн}} \right) \right\}$

здійснюється шляхом покращення конструктивних характеристик об'єкта, модернізації (реновації) його основних вузлів, використання сучасних матеріалів та технічних рішень та ін.

3. Визначення функціональних співвідношень для вектора регульованих вхідних параметрів, що забезпечують мінімальні значення втрат на всіх основних режимах роботи (при різних значеннях вектора вихідних параметрів  $\vec{X}_{\text{вих}}$ )

$$\vec{X}_{\text{вх}}^{\text{рег}} = f_{\text{упр}} \left[ \vec{X}_{\text{вих}}^{\text{зад}}; \vec{X}_{\text{вх}}^{\text{нерег}}; \vec{X}_{\text{вн}}; \min \left\{ \vec{X}_{\text{втр}}^{\text{упр}}; \vec{X}_{\text{втр}}^{\text{неупр}} \right\}; \vec{\xi}_-; \vec{\xi}_\sim \right],$$

або  $\vec{X}_{\text{вх}}^{\text{рег}} = f_{\text{упр}} \left[ \vec{X}_{\text{вих}}^{\text{зад}}; \vec{X}_{\text{вх}}^{\text{нерег}}; \vec{X}_{\text{вн}}; \min \left\{ \vec{X}_{\text{втр}} \right\}; \vec{\xi} \right]$  – для спрощеної схеми.

4. Дослідження впливу варіацій параметрів, що допускають цілеспрямовану зміну ( $\vec{X}_{вх}^{нерег}$ ,  $\vec{X}_{вн}$ ) на функцію енергетичних втрат.

5. Побудова функціональних (рис. 7) та структурних (рис. 8) схем САУ, які забезпечують технічну реалізацію програми енергозберігаючого управління.

При цьому є досить ефективним використання в структурі САУ еталонної моделі (спостерігач стану) об'єкта (рис. 7.).



Рис. 7 - Узагальнена функціональна схема енергозберігаючої САУ із спостерігачем стану

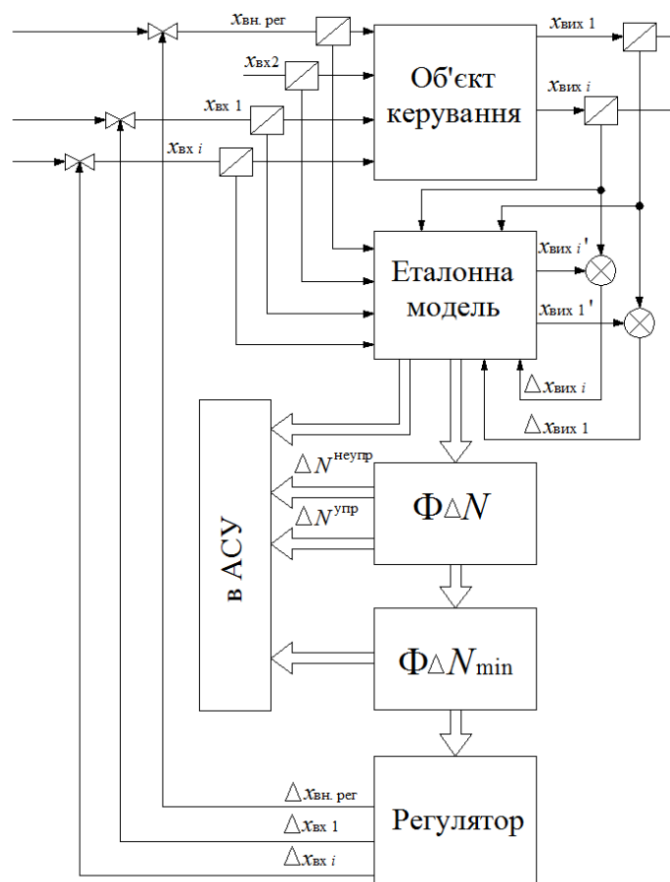


Рис. 8 - Структурна схема енергозберігаючої САУ із спостерігачем стану

**Висновки:**

1. Виконано аналіз існуючих принципів побудови та принципових схемних рішень прецизійних швидкодіючих САУ та САР та тенденцій їх перспективного розвитку. Показано, що найбільш ефективними та перспективними у цьому плані є мехатронні (зокрема – електронно-гідравлічні) слідкуючі системи.

2. Розроблено уніфіковану структуру ЕГСС та загальні принципи взаємодії її окремих структурних елементів (підсистем).

3. Проблема створення інформаційного забезпечення ЕГСС полягає, головним чином, у синтезі ефективних алгоритмів управління електрогідравлічними виконавчими механізмами, що забезпечують необхідну якість регулювання робочих процесів (швидкість, точність, стійкість, діапазон регулювання, енергетичну ефективність тощо). Ця проблема може бути вирішена шляхом розвитку та вдосконалення методів загальної прикладної теорії оптимального управління динамічними системами та їх адаптацією до конкретних особливостей використовуваних ЕДІМ.

4. Набули подальшого розвитку принципи енергозберігаючого управління технологічними об'єктами, викладено процедуру створення на їх основі енергозберігаючих САУ.

5. Уточнено узагальнену функціональну та структурну схеми енергозберігаючої САУ з використанням еталонної моделі (спостерігача стану) об'єкта управління.

**Список використаних джерел:**

1. Рогачов А. І. Енергозберігаюче управління нестационарними режимами технологічних процесів : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.13.07 / А. І. Рогачів. – Харків, 2008. – 36 с.

2. Дуель М. О. Автоматизовані системи управління технологічними процесами енергоблоків теплових електростанцій (розробка, дослідження, впровадження) : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.13.07 / М. О. Дуель. – Харків, 1998. – 36 с.

3. Горелік О. Х. Удосконалення системи автоматизованого управління енергоблоків атомних та теплових електростанцій для підвищення їх експлуатаційної надійності : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.13.07 / О. Х. Пальник. – Харків, 2007. – 36 с.

4. Рюмшин М. О. Синтез, розробка та впровадження автоматизованих систем управління технологічними процесами металургійного та прокатного виробництва : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.13.07 / М. О. Рюмшин. – Харків, 2007. – 36 с.

5. Северін В. П. Моделі і методи оптимізації показників якості систем автоматичного управління енергоблоком атомної електростанції : автореф. дис. ... д-ра техн. н. : 05.13.07 / В. П. Северин. – Харків, 2007. – 35 с.

6. Канюк Г. І. Моделі і методи структурного і параметричного синтезу прецизійних електрогідравлічних слідкуючих систем автоматизованих випробувальних стендів : дис. ... д-ра техн. наук : 05.13.07 / Г. І. Канюк. – Харків, 2009. – 35 с.

7. Прецизійні системи автоматичного регулювання турбогенераторних установок / Г. І. Канюк, А. Ю. Мезеря, О. М. Близниченко, В. Є. Мельников, І. А. Бабенко // *Енергозбереження, енергетика, энергоаудит.* – 2014. – № 11. – С. 12–27.

8. Improving the quality of electric energy at hydrogenerator units by upgrading control system / G. Kanjuk, A. Mezerya, V. Melnikov, N. Antonenko, A. Chebotarev // *Східно-Європейський журнал передових технологій.* – 2018. – № 6/2. – С. 70–78.

9. Оптимальное энергосберегающее автоматизированное управление турбокомпрессорными агрегатами / Г. И. Канюк, А. Ю. Мезеря, Е. Н. Близниченко, М. А. Попов. – Харьков : Мадрид, 2014. – 144 с.

10. Energy Efficient Control by the Group of Oil Pumping Stations Operation / G. I. Kaniuk, A. Yu. Mezerya, V. N. Kniazeva, T. N. Fursova, E. N. Blyznychenko // *Problemele energeticii regionale.* – 2021. – no 4. – Pp. 13–22.

11. Підвищення ефективності роботи систем низькопотенційного комплексу електростанцій шляхом оптимального керування витратою циркуляційної води / Г. І. Канюк, А. Ю. Мезеря, А. М. Чеботарьов, Г. С. Близниченко // *Електромеханічні і енергозберігаючі системи.* – 2020. – Вип. 4. – С. 34–39.

12. Канюк Г. І. Перспективи використання електронно-гідравлічних пристроїв у сучасних енерго- та ресурсозберігаючих енергетичних системах / Г. І. Канюк // *Вісник Харківського державного політехнічного університету.* – 1999. – № 44. – С. 39–40.

13. До вибору типу виконавчого механізму для мехатронних систем / Г. І. Канюк, О. М. Шуванов, Є. М. Близниченко, М. В. Логвінов // *Вісник національного технічного університету "ХПІ".* – 2002. – Т. 2, № 7. – С. 120–125.

**References:**

1. Rohachov, AI 2008, 'Enerhozberihaiuche upravlinnia nestatsionarnymy rezhymamy tekhnolohichnykh protsesiv' [*Energy-saving control of non-stationary modes of technological processes*], Doct.tekhn.n. abstract, Kharkiv.
2. Duel, MO 1998, 'Avtomatyzyvani systemy upravlinnia tekhnolohichnymy protsesamy enerhoblokiv teplovykh elektrostantsii (rozrobka, doslidzhennia, vprovadzhennia)' [*Automated control systems for the technological processes of power units in thermal power plants*], Doct.tekhn.n. abstract, Kharkiv.
3. Horielik, OX 2007, 'Udoskonalennia systemy avtomatyzyvanoho upravlinnia enerhoblokiv atomnykh ta teplovykh elektrostantsii dlia pidvyshchennia ix ekspluatashchynoi nadiinosti' [*Improvement of the automated control system for power units of nuclear and thermal power plants to enhance their operational reliability*], Doct.tekhn.n. abstract, Kharkiv.
4. Riumshyn, MO 2007, 'Syntez, rozrobka ta vprovadzhennia avtomatyzyvanykh system upravlinnia tekhnolohichnymy protsesamy metalurhiinoho ta prokatnoho vyrobnytstva' [*Synthesis, development, and implementation of automated control systems for the technological processes of metallurgical and rolling production*], Doct.tekhn.n. abstract, Kharkiv.
5. Severin, VP 2007, 'Modeli i metody optymizatsii pokaznykiv yakosti system avtomatychnoho upravlinnia enerhoblokom atomnoi elektrostantsii' [*Models and methods for optimizing the quality indicators of automatic control systems for nuclear power plant units*], Doct.tekhn.n. abstract, Kharkiv.
6. Kaniuk, HI 2009, 'Modeli i metody strukturnoho i parametrychnoho syntezu pretsyziinykh elektrohivaylichnykh sledkuiuchykh system avtomatyzyvanykh vyprobuvalnykh stendiv' [*Models and methods for structural and parametric synthesis of precision electrohydraulic tracking systems of automated test stands*], Doct.tekhn.n. thesis, Kharkiv.
7. Kaniuk, HI, Mezeria, AYu, Blyznychenko, OM, Melnykov, VYe & Babenko, IA 2014, 'Pretsyziini systemy avtomatychnoho rehulivannia turbogeneratornykh ustanovok' [*Precision automatic control systems for turbogenerator plants*], *Enerhozberezhennia, enerhetyka, enerhoaudit*, no 11, Pp. 12-27.
8. Kaniuk, HI, Mezeria, AYu, Melnykov, VYe, Antonenko, N & Chebotarev, A 2018, 'Improving the quality of electric energy at hydrogenerator units by upgrading control system' *Skhidno-Yevropeyskyi zhurnalпередovykh tekhnolohii*, no 6/2, Pp. 70-78.
9. Kaniuk, HI, Mezeria, AYu, Blyznychenko, OM & Popov, MA 2014, *Optymalnoe enerhosberehaiushchee avtomatyzyrovannoe upravlyenie turbokompresornymu ahrehatamy* [*Optimal energy-saving automated control of turbocompressor units*], Madryd, Kharkov.
10. Kaniuk, GI, Mezeria, AYu, Kniazeva, VN, Fursova, TN & Blyznychenko, EN 2021, 'Energy Efficient Control by the Group of Oil Pumping Stations Operation', *Problemele energeticii regionale*, no 4. Pp. 13-22.
11. Kaniuk, HI, Mezeria, AYu, Chebotarov, AM & Blyznychenko, HS 2020, 'Pidvyshchennia efektyvnosti roboty system nyzkopotentsiinoho kompleksu elektrostantsii shliakhom optymynalnoho keruvannia vytratoi tsyrkuliatsiinoi vody' [*Improving the efficiency of low-voltage power station complexes through optimal control of circulating water flow*], *Elektromekhanichni i enerhozberihaiuchi systemy*, iss. 4, Pp. 34-39.
12. Kaniuk, HI 1999, 'Perspektyvy vykorystannia elektronno-hivaylichnykh prystroiv u suchasnykh enerho- ta resursozberihaiuchykh enerhetychnykh systemakh' [*Perspectives of using electro-hydraulic devices in modern energy- and resource-saving power systems*], *Visnyk Kharkivskoho derzhavnoho politekhnichnoho universytetu*, no 44, Pp. 39-40.
13. Kaniuk, HI, Shuvanov, OM, Blyznychenko, YeM & Lohvinov, MV 2002, 'Do vyboru typu vykonavchoho mekhanizmu dlia mekhatronnykh system' [*Choosing the type of actuator for mechatronic systems*], *Visnyk natsionalnoho tekhnichnoho universytetu "KhPI"*, Vol. 2, no 7, Pp. 120-125.

Стаття надійшла до редакції 28 травня 2024 року.