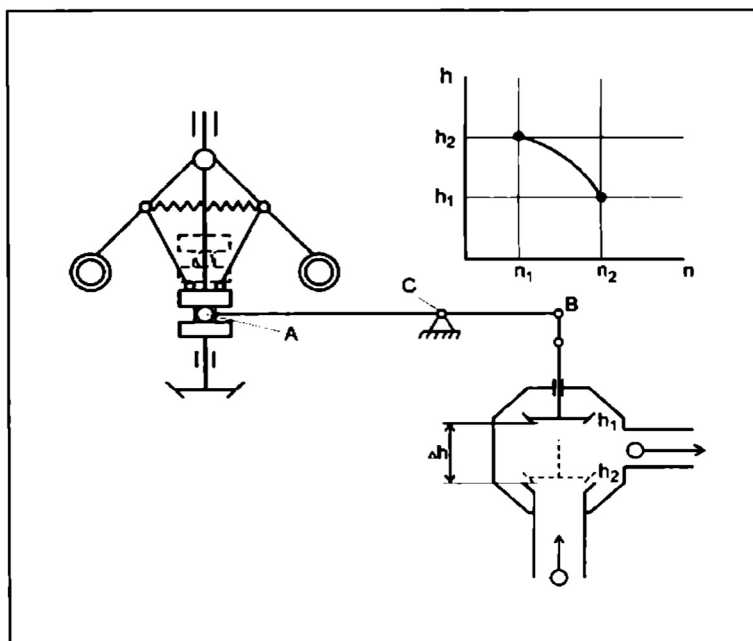


*Головчук А.Ф.*

# Автоматика теплових процесів

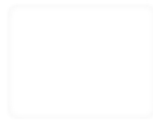


Міністерство освіти і науки України  
Дніпропетровський національний університет  
залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна

А.Ф. Головчук

# **Автоматика теплових процесів**

Навчальний посібник



Дніпропетровськ - 2015

ББК 40.74  
Г – 61  
УДК 621.43

Г – 61. Автоматика теплових процесів: Навчальний посібник / А.Ф. Головчук – Дніпропетровськ, ДНУЗТ, 2015. – 54 с.

У навчальному посібнику розглянуті основи теорії автоматичного регулювання (АР), основні закони регулювання та методи аналізу стійкості систем автоматичного регулювання (САР), автоматичні регулятори теплових процесів, принципи та структурні схеми САР а також системи автоматичного регулювання з контрольно-вимірювальними приладами сучасних енергозберігаючих теплогенераторів конденсаційного типу. Приводиться САР теплових двигунів та енергетичних установок і системи АР теплоенергетичних об'єктів енергетичних станцій.

Навчальний посібник розрахований на студентів і спеціалістів інженерно-технічного напрямку.

Іл. 27. Табл. 1. Бібліогр.: 12 назв

Рецензенти: завідувач кафедри двигунів і теплотехніки Національного транспортного університету, д.т.н., професор Ю.Ф. Гутаревич;

професор кафедри теплотехніки Національного університету біоресурсів і природовикористання України, д.т.н. професор Б.Х. Драганов

© Головчук А.Ф.

# Зміст

|                                                                                                                            |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Передмова .....                                                                                                            | 5  |
| Основи теорії автоматичного регулювання .....                                                                              | 6  |
| §1. Мета та завдання вивчення дисципліни «Автоматика<br>теплових процесів» .....                                           | 6  |
| §2. Основоположники класичної теорії автоматичного регулювання .....                                                       | 6  |
| §3. Основні поняття та терміни .....                                                                                       | 7  |
| §4. Система автоматичного регулювання. Використання ЕОМ в САР .....                                                        | 7  |
| §5. Об'єкт автоматичного управління (регулювання) .....                                                                    | 8  |
| §6. Регулюючий об'єкт та автоматичний регулятор .....                                                                      | 9  |
| §7. Класифікація автоматичних регуляторів .....                                                                            | 10 |
| 7.1. Регулятор прямої і непрямої дії .....                                                                                 | 10 |
| 7.2. Принципові та структурні схеми системи автоматичного<br>регулювання .....                                             | 11 |
| 7.3. Класифікація автоматичних регуляторів в залежності від<br>чутливого механізму та кількості регульованих режимів ..... | 12 |
| 7.4. Класифікація автоматичних регуляторів в залежності від<br>зворотнього зв'язку .....                                   | 13 |
| §8. Системи автоматичного регулювання прямої і непрямої дії .....                                                          | 14 |
| §9. Процес автоматичного регулювання. Математичний і графічний опис<br>процесу автоматичного регулювання .....             | 16 |
| §10. Стійкі і нестійкі процеси САР .....                                                                                   | 18 |
| §11. Статичні і динамічні характеристики САР .....                                                                         | 20 |
| 11.1. Принципова і функціональна схеми системи автоматичного<br>регулювання теплових двигунів .....                        | 21 |
| §12. Основні закони регулювання .....                                                                                      | 23 |
| 12.1. Релейно-позиційний закон регулювання (Рп-закон) .....                                                                | 23 |
| 12.2. Пропорційний закон регулювання (П-закон) .....                                                                       | 25 |
| 12.3. Інтегральний закон регулювання (І-закон) .....                                                                       | 26 |
| 12.4. Пропорційно-диференційний закон регулювання (ПД-закон) .....                                                         | 26 |
| 12.5. Пропорційно-інтегральний закон регулювання (ПІ-закон) .....                                                          | 27 |
| 12.6. Пропорційно-інтегрально-диференційний закон<br>регулювання (ПІД-закон) .....                                         | 27 |
| §13. Методи аналізу стійкості САР .....                                                                                    | 28 |
| §14. Автоматичні регулятори теплових процесів .....                                                                        | 29 |
| 14.1. Основні елементи промислових автоматичних регуляторів .....                                                          | 29 |
| 14.2. Електричні системи регулювання .....                                                                                 | 31 |
| 14.3. Пневматичні системи регулювання .....                                                                                | 31 |
| 14.4. Гідравлічні системи регулювання .....                                                                                | 31 |
| 14.5. Механічні регулятори частоти обертання .....                                                                         | 32 |
| §15. Системи автоматичного регулювання теплоенергетичних<br>установок електричних станцій .....                            | 35 |
| 15.1. Автоматичне регулювання технологічних процесів .....                                                                 | 35 |

|                                                                                                                                  |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 15.1.1. Системи регулювання потужності теплової електричної станції .....                                                        | 35 |
| 15.1.2. Принципова схема ТЕС. Робота автоматичного регулювання теплового процесу .....                                           | 35 |
| 15.2. Система управління групою теплоенергетичних установок .....                                                                | 37 |
| §16. Практична робота на тему: Система контрольно-вимірювальних приладів і автоматики теплогенераторів конденсаційного типу..... | 38 |
| 16.1. Зміст роботи .....                                                                                                         | 38 |
| 16.2 Сфера застосування та переваги .....                                                                                        | 39 |
| 16.3. Принцип дії конденсаційної техніки .....                                                                                   | 39 |
| 16.4. Технічні характеристики теплогенераторів конденсаційного типу .....                                                        | 40 |
| 16.5. Система автоматичного регулювання та контрольно-вимірювальні прилади .....                                                 | 41 |
| §17. Практична робота на тему: Система автоматичного регулювання тиску системи мащення дизелів типу СМД-60» .....                | 47 |

## Умовні позначення

САР – система автоматичного регулювання;  
ЕОМ – електронно-обчислювальна машина;  
А – автоматика;  
АР – автоматичний регулятор;  
САУ – система автоматичного управління;  
АФХ – амплітудно-фазова характеристика;  
ДВЗ – двигун внутрішнього згоряння;  
ТЕУ – теплоенергетична установка;  
РО – регулюючий об'єкт;  
ПНВТ – паливний насос високого тиску;  
ТЕС – теплова електрична станція;  
РОП – редуційно-охолоджуючий пристрій;  
ККД – коефіцієнт корисної дії;  
ТГа – теплогенератор;  
ЄС – Європейський союз;  
КВП – контрольно-вимірювальні прилади;  
БАК – блок автоматичного керування;  
ГВП – гаряче водопостачання;  
КК – котловий контролер;  
ВАР – верхній аварійний рівень;  
НАР – нижній аварійний рівень;  
НРР – нижній робочий рівень;  
ВРР – верхній робочий рівень;  
 $n$  – частота обертання,  $[\text{хв}^{-1}]$ ;  
 $n_{\text{ном}}$  – номінальні оберти машини,  $[\text{хв}^{-1}]$ ;  
 $n_{\text{х/х}}$  – частота обертання холостого ходу,  $[\text{хв}^{-1}]$ ;  
 $t$  – час,  $[\text{хв}]$ ;  
 $P$  – тиск,  $[\text{МПа}]$ ;

$P_m$  – тиск масла, [МПа];  
 $h$  – рівень (води), [м];  
 $Q$  – продуктивність, [л/хв];  
 $S$  – проміжне значення регулюючої величини, [мм];  
 $\delta$  – ступінь нерівномірності регулятора;  
 $\alpha$  – коефіцієнт надлишку повітря;  
 $N_c$  – ефективна потужність, [кВт];  
 $N_i$  – індикаторна потужність, [кВт];  
 $N_m$  – потужність механічних втрат, [кВт];  
 $h_n$  – положення рейки (дозатора), [мм];  
 $M_k$  – крутний момент, [Н·м];  
 $X_p$  – положення регулюючого органу, [мм];  
 $X_{відх}$  – відхилення регулюючої величини, [мм];  
 $K_p$  – коефіцієнт пропорційності;  
 $T_n$  – постійна по часу;  
 $P_u$  – підтримуюча сила регулятора, [Н];  
 $E$  – відновлююча сила регулятора, [Н];  
 $T_p$  – сила сухого тертя в регуляторі, [Н];  
 $z$  – координата муфти регулятора, [мм];  
 $n_n$  – частота обертання вала насоса, [с<sup>-1</sup>];  
 $z_{з.д.}$  – задаюча дія регулятора, [мм];  
 $a_{u1}, a_{u2}$  – постійні коефіцієнти апроксимації;  
 $t_{пп}$  – температура перегріву пари, [°C];  
 $H_k$  – рівень конденсату, [мм];  
 $U$  – напруга, [В].

# Передмова

Автоматизація виробничих процесів, теплоенергетичних систем, транспорту та сільськогосподарського виробництва є одним із самих прогресивних напрямків розвитку науки і техніки сьогодення.

Ефективність виробництва, темпи науково-технічного прогресу, раціональне використання паливних ресурсів в більшій мірі залежать від стану паливно-енергетичного комплексу України. Важливими складовими цього комплексу є тепло- та електроенергетика, а також теплові двигуни та енергетичні установки.

Автоматичне управління та регулювання широко використовується сьогодні в усіх галузях промисловості та сільському господарстві.

У своїй діяльності кожному інженеру будь-якої спеціальності приходится приймати участь у проектуванні, розрахунках, дослідженні систем автоматичного регулювання (САР) або експлуатувати машини, які обладнані такими автоматичними пристроями.

У цьому навчальному посібнику розглянуті основні питання теорії автоматичного регулювання, основні закони регулювання та оцінка стійкості САР, автоматичні регулятори теплових процесів, а також системи автоматичного регулювання теплоенергетичних установок електричних станцій, які необхідні спеціалістам з автоматизації виробничих процесів і промислових установок.

При написанні цього навчального посібника автор використовував як літературні джерела, так і матеріали власних досліджень.



# Основи теорії автоматичного регулювання

## §1. Мета та завдання вивчення дисципліни

Мета вивчення дисципліни – це ознайомлення студентів з основами теорії автоматичного керування (регулювання та управління), що дає можливість застосовувати ці знання в розрахунках різноманітних процесів, а також при вирішенні інших задач використання теплотехнічних об'єктів.

Ефективність застосування САР або систем автоматичного управління (САУ) визначається економічною доцільністю та технологічною необхідністю, забезпеченням техніки безпеки або здоров'я обслуговуючого персоналу, підвищенням продуктивності та якості продукції.

Бувають приклади невпровадження САР чи САУ через підвищення вартості машини чи її САР, але в кожному випадку потрібно дивитися на перспективу та враховувати вище перераховані критерії ефективності застосування цих систем.

Особливу увагу впровадження САР необхідно уділяти у випадках, коли це пов'язано з технічною безпекою та з охороною довкілля і забрудненням повітря, води та ґрунту.

Завдання вивчення дисципліни згідно з кваліфікаційною характеристикою у галузі знань з енергетики та енергетичного машинобудування студент повинен:

- знати необхідність застосування САУ (САР) для забезпечення роботи складних теплоенергетичних об'єктів, склад САУ (САР), призначення і принципальні схеми основних елементів та їх характеристики;

- вміти оцінювати стійкість САР за допомогою критеріїв стійкості;

- мати уяву про конкретні приклади використання САУ (САР) для підтримання параметрів теплоенергетичних об'єктів.

## §2. Основоположники класичної теорії автоматичного регулювання

Сучасна теорія автоматики, яка тісно пов'язана з технічною кібернетикою та ЕОМ отримала свій розвиток на базі теорії автоматичного регулювання.

Вперше у 1765 році автоматичний регулятор було встановлено на паровій машині російським механіком Повзуновим І.І. на Барнаульському заводі для забезпечення заданого рівня води у паровому котлі.

Через 20 років Джеймс Уатт використав на своїй машині регулятор для забезпечення постійної частоти обертання. А тому такий спосіб регулювання заснований двома винахідниками називається принципом Повзунова-Уатта.

Застосування АР швидкості на парових поршневих машинах вимагало від вчених розробки теорії її функціонування.

У 1877 році професором Петербурзького технічного інституту Вишнеградським І.А. була опублікована робота « О регуляторах прямого действия ». Він вперше проаналізував характеристики машини і регулятора та показав, що машина і регулятор при роботі створюють одну систему.

Праці Вишнеградського І.А. зробили великий вплив на подальші розробки САР і САУ, а тому його вважають основоположником класичної теорії Автоматичного регулювання.

У 1938-1939 роках у роботах Михайлова А.В. були приведені нові критерії стійкості САР.

Великий вклад в розробку основ теорії автоматичного регулювання зробили Попов Є.П., Боголюбов Н.Н., Крутов В.І., Долганов К.Є., Андрусенко П.И., Грунауер А.А. та інші.

### **§3. Основні поняття та терміни**

До основних понять та термінів відносяться:

- САР, САУ.
- Об'єкт регулювання ( паровий котел, турбіна, ДВЗ) та автономні регулятори (механічні, гідравлічні, пневматичні та комбіновані).
- Параметри регулювання (n,p,h,Q).
- Функціональні та принципові схеми елементів та систем (САР і САУ).
- Усталений та неусталений (стаціонарні та динамічні) режими роботи теплоенергетичних установок.
- Поняття про перехідні процеси та інше.

До основних понять слід також віднести такі поняття:

- часткова автоматизація процесу виробництва енергії (теплової, електричної, механічної, атомної та інші).
- комплексна механізація (особливо у сільському господарстві).
- повна автоматизація управління виробничими процесами (атомні і теплові станції). За оператором залишаються лише функції загального контролю за якістю виробництва енергії і профілактичні перевірки системи автоматизації теплових процесів.

### **§4. Система автоматичного регулювання.**

#### **Використання ЕОМ в САР**

В залежності від умов експлуатації до теплоенергетичної машини ставляться вимоги, які можуть відповідати лише при наявності АР різного призначення.

Наприклад, турбіна чи дизель, які приводять генератор перемінного струму повинні при будь-якому навантаженні включення споживачів підтриму-

вати постійну частоту обертання ротора генератора для забезпечення незмінної частоти струму ( 50 Гц ). Теплоенергетична машина, автоматичний регулятор постійно взаємодіють між собою в процесі роботи для підтримання на заданому рівні її навантаження.

У цьому випадку сукупність взаємозв'язаних турбін чи двигуна з регулятором називають системою автоматичного регулювання ( САР ).

Електронно-обчислювальна техніка збільшила можливість використання САР в народному господарстві. В простих випадках оператор завдяки ЕОМ може швидко провести техніко-економічний аналіз нової ситуації і швидко внести необхідні корективи у технологічні процеси. Крім цього ЕОМ автоматично сприймає всю технічну інформацію, що полегшує роботу оператора.

У більш складних САУ чи САР електронно-обчислювальна машина безпосередньо включається в ланку автоматичного управління і сама не тільки переробляє отриману інформацію, але вводить керуючу дію до виконавчого механізму регулюючого об'єкту.

Сучасна комп'ютерна техніка сприймає, оброблює і передає керуючу дію і в перехідних процесах теплоенергетичних машинах, при цьому електроніка дозволяє оптимізувати регулювання, тому що в ході самого перехідного процесу будуть відпрацьовуватися необхідні коректуючі дії на енергетичну машину.

## §5. Об'єкт автоматичного управління (регулювання)

Система автоматичного регулювання складається із двох груп.

До першої групи відносяться **регулюючий об'єкт** - теплова машина чи установка, для роботи якої на заданому режимі потрібно застосовувати регулюючі дії ( оператора чи регулятора ). Від джерела живлення (енергії) поступає енергія чи маса (води, пару, пального та інше), яка в регулюючому об'єкті (паровій машині, теплоелектричній станції, ДВЗ, турбіні) перетворюється і у необхідному виді подається до споживача. Подачу енергії чи маси до об'єкту регулювання можна змінити перестановкою регулюючого органу (РО), (рис.1).

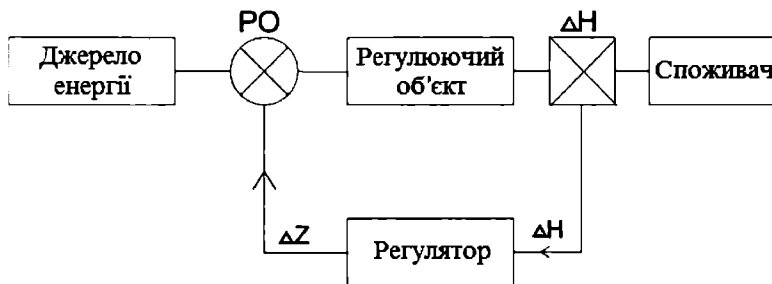


Рис.1. Система автоматичного регулювання

Для автоматизації цього процесу до регулюючого органу необхідно приєднати додатковий пристрій, який називається автоматичним регулятором.

Таким чином до другої групи САР відноситься **автоматичний регулятор**.

## §6. Регулюючий об'єкт та автоматичний регулятор

Всі елементи які складають САР можна розділити на дві групи, до першої групи входить об'єкт регулювання (двигун, турбіна та інші теплоенергетичні установки). Регулюючими об'єктами називають теплоенергетичні машини або установки для забезпечення роботи яких в заданому режимі застосовують автоматичний регулятор. Від системи живлення до регулюючого об'єкта поступає енергія або маса робочого тіла (паливного), яка в регулюючому об'єкті перетворюється і у необхідному виді поступає до споживача.

Кількість енергії або маси, яка подається або відбирається від об'єкта змінюється шляхом перестановки регулюючого органу (рейки, акселератора, заслінка подачі газу, води, пару та інше). Розглянемо систему автоматичного регулювання рівня рідини в резервуарі (рис.2). Регулюючим об'єктом в системі є резервуар з водою.

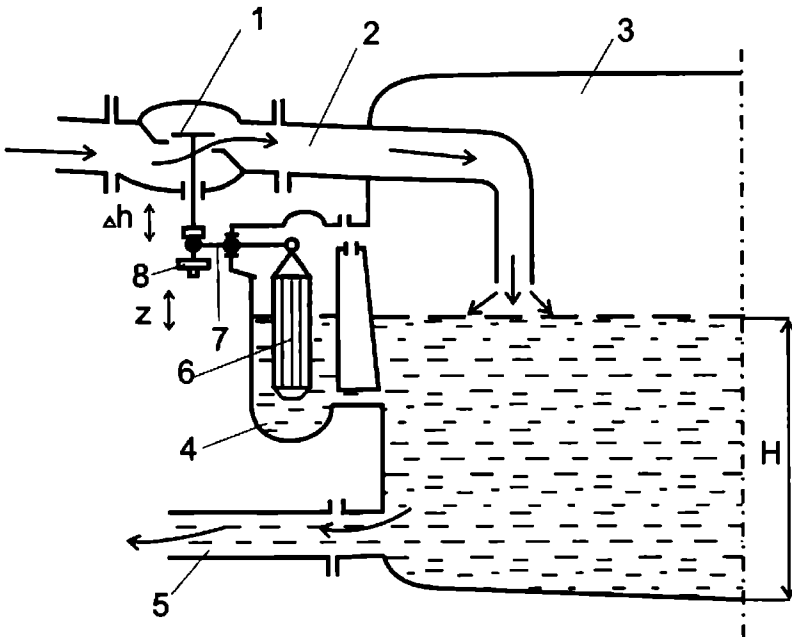


Рис.2. Регулювання рівня рідини в резервуарі:

1 - клапан; 2 - вхідний патрубок; 3 - резервуар; 4 - автоматичний регулятор; 5 - вихідний патрубок; 6 - поплавок; 7 - двуплечий важіль; 8 - гвинт регулювальний.

Для процесу регулювання необхідно, щоб регулятор своєчасно змінював координату  $\Delta h$  в залежності від рівня рідини  $H$  в резервуарі 3 і передавав регулюючу дію  $\Delta h$  на об'єкт. При цьому АР повинен включати чутливий елемент, який сприймає відхилення регулюючої координати рівня рідини  $H$ . Задане значення  $H$  встановлюється задатчиком необхідного параметра гвинтом 8. Виконавчий орган, діє на регулюючий об'єкт – клапан 1 і таким чином регулюється подача води в залежності від рівня рідини  $H$  (рис.2).

## §7. Класифікація автоматичних регуляторів

Автоматичний регулятор виконує завдання, яке визначається задаючим елементом (важіль, педаль, колесо, заслінка). Завдяки дії задаючого і чутливого елементу регулятор виробляє регулюючу дію, яка через виконавчий елемент і регулюючий орган діє на об'єкт регулювання. При роботі системи регулювання чутливий механізм постійно виконує вимірювання регулюючої величини, а регулятор може діяти на виконавчий механізм постійно або мати перервний характер дій. В залежності від характеру регулюючої дії на об'єкт регулювання або залежно від конструкції регулятора вони поділяються на регулятори прямої і непрямої дії.

### 7.1. Регулятор прямої і непрямої дії

У регуляторах прямої дії перестановка регулюючого органу об'єкту регулювання виконується за рахунок енергії чутливого механізму.

На рис.3 показано регулятор прямої дії, який служить для підтримки постійної швидкості обертання ротора турбіни.

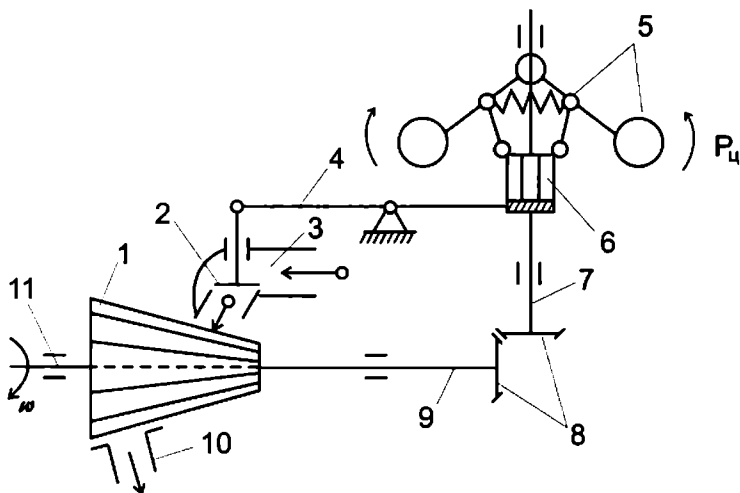


Рис.3. Регулятор прямої дії:

## Список рекомендованої літератури

1. Плетньов Г.П. Автоматичне регулювання та захист теплосилових установок енергетичних станцій. – М.:Енергія, 1970. – 408с.
2. Основи теорії автоматичного регулювання. Крутов В.І., Спориш І.П., Юношев В.Д. – М.:Машинобудування, 1969. – 360с.
3. Основи теорії автоматичного регулювання. В.І. Крутов, Ф.І. Данилов, П.К. Кузник та ін. – М.:Машинобудування, 1984. – 368с.
4. Крутов В.І. Двигун внутрішнього згоряння як об'єкт регулювання. - М.:Машинобудування, 1978. -472с.
5. Герасимов С.Г. Теоретичні основи автоматичного регулювання теплових процесів. – М.:Вища школа, 1967. – 207с.
6. Головчук А.Ф. Автоматичне регулювання тракторних та комбайнових двигунів. – Умань, 2001. – 64с.
7. Головчук А.Ф. Поліпшення паливної економічності та зниження димності дизелів шляхом вдосконалення системи автоматичного регулювання. – Харків, 2012. – 472с.
8. Головчук А.Ф., Лихвенко С.П. Мобільні енергетичні засоби: Навч. посіб.: У 2 кн. / А.Ф. Головчук, С.П. Лихвенко. – К.:Грамота, 2010. Кн.1: Автотракторні двигуни та електрообладнання/ А.Ф. Головчук, С.П. Лихвенко. – К.:Грамота, 2010. – 288с.
9. Головчук А.Ф. Експлуатація та ремонт сільськогосподарської техніки»: Підручник: У 3 кн. / А.Ф. Головчук, В.Ф. Орлов, О.П. Строков. За ред. А.Ф. Головчука. – К.:Грамота, 2003, 2009. Кн.1: Трактори / А.Ф. Головчук, В.Ф. Орлов, О.П. Строков. – К.:Грамота, 2009. – 336с.
10. Головчук А.Ф. Дослідження регуляторів швидкості автотракторних та комбайнових дизелів. – Двигунобудування, 1984, №8, с. 27 – 29.
11. Попович М.Г., Ковальчук А.В., Теорія автоматичного регулювання, Підручник, Київ. – Либідь, 2007, – 656с.
12. Технічні паспорти теплогенераторів конденсаційного типу та інших теплосилових установок з описом автоматики з контрольно-вимірювальними приладами.