



Національний університет  
водного господарства  
та природокористування

Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України  
Національний університет водного господарства та  
природокористування  
Кафедра електротехніки і автоматики

**043-30**

**Методичні вказівки і завдання**

до виконання розрахунково-графічної роботи з дисципліни  
„Основи автоматики і автоматизація виробничих процесів”  
студентами за напрямом підготовки 6.060103 „Гідротехніка  
(водні ресурси)” денної форми навчання



водного господарства  
та природокористування

Рекомендовано до друку методичною  
комісією за напрямом «Гідротехніка (водні  
ресурси)»

Протокол № 9 від 24.05.2011 р.

Рівне 2011



Національний університет

водного господарства  
та природокористування

Методичні вказівки і завдання до виконання розрахунково-графічної роботи з дисципліни “Основи автоматики і автоматизація виробничих процесів” студентами за напрямом підготовки 6.060103 „Гідротехніка (водні ресурси)” денної форми навчання / С.К.Матус – Рівне: НУВГП, 2011 – 22 с.

Упорядник: С.К. Матус, ст. викладач

Відповідальний за випуск Б.О. Баховець, професор, завідувач кафедри електротехніки і автоматики.



Національний університет  
водного господарства  
та природокористування

© Матус С.К., 2011 р.

© НУВГП, 2011 р.



## Передмова

Для кращого засвоєння і розуміння теоретичного матеріалу з дисципліни «Основи автоматики і автоматизація виробничих процесів», передбачено виконання розрахунково-графічної роботи студентами денної форми навчання.

Розрахунково-графічна робота складається з однієї задачі. Варіант завдання студенти визначають за останніми цифрами номера (шифру) залікової книжки.

При виконанні РГР студенти засвоюють матеріал, викладений на лекціях, вчать досліджувати та аналізувати автоматизовані системи водорегулювання на меліоративних системах.

Розрахунково-графічна робота виконується у виді пояснювальної записки. Записку оформляють на аркушах формату А4.

При виконанні роботи необхідно дотримуватись таких вимог:

- на титульній сторінці вказують зверху назви навчального закладу, факультету і кафедри;
- повну назву роботи;
- нижче, з правої сторони, потрібно написати “Розрахунково-графічну роботу виконав...” і далі прізвище, ім’я і по батькові, номер залікової книжки;
- прізвище та ініціали викладача;
- внизу сторінки проставляють рік виконання;
- на другій сторінці записують завдання.

В кінці роботи приводять список використаної літератури.

Пояснювальна записка має бути представлена у друкованому або рукописному вигляді.



## Задача

*Мета цього завдання* – навчитись аналізувати роботу лінійних систем автоматичного регулювання і розраховувати їх параметри за умови монотонного перехідного процесу.

*Обсяг завдання :*

- 1.1. скласти опис конструкції і принципу дії системи автоматичного регулювання рівня води;
- 1.2. визначити конструктивні параметри регулятора;
- 1.3. динаміка системи автоматичного регулювання, виведення рівняння, що описує перехідний процес в системі автоматичного регулювання рівня води;
- 1.4. визначити коефіцієнт в'язкого тертя за умови монотонного перехідного процесу, умова стійкості;
- 1.5. побудувати статичну характеристику систем автоматичного регулювання.

*Вихідними даними* для розрахунків є витрата  $Q_2$  і розрахункова глибина нижнього б'єфу  $h_p$ , які приведені в табл.1 і табл.2.

Таблиця 1

<i>Одиниці шифру</i>	<i>0</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>
$Q_2, \text{м}^3/\text{с}$	0,70	0,65	0,60	0,55	0,50	0,45	0,40	0,35	0,30	0,25

Таблиця 2

<i>Десятки шифру</i>	<i>0</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>
$h_p, \text{м}$	0,75	0,8	0,85	0,9	0,95	1,0	1,05	1,1	1,15	1,2



## 1.1. Опис конструкції і принципу дії регулятора

На водовипусках з магістральних каналів використовують, в основному, регулятори прямої дії. З багатьох конструкцій цих регуляторів досить надійним у роботі є циліндричний регулятор.

На рис.1 представлена конструктивна схема трубчастого водовипуску з магістрального каналу, яка забезпечує автоматичне регулювання рівня води у нижньому б'єфі при зміні витрати і рівня води у верхньому б'єфі. Такі системи використовують на водовипусках із магістральних каналів при гідравлічних перепадах не менше 0,7 м і витратах до  $10 \text{ м}^3/\text{с}$ .

Наведена на рис.1 система регулювання складається із об'єкта регулювання – нижнього б'єфу, циліндричного регулятора і вимірювального колодезя, який з'єднаний з нижнім б'єфом.

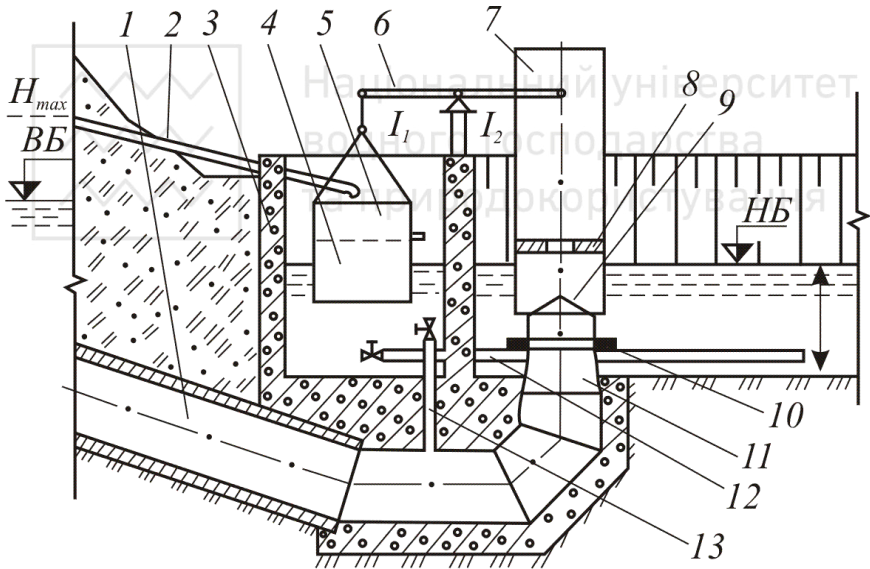


Рис.1. Конструктивна схема системи автоматичного регулювання рівня води.

Рівень води у нижньому б'єфі задається переміщенням поплавка. Цій системі відповідає функціональна схема, яка приведена на рис.2.

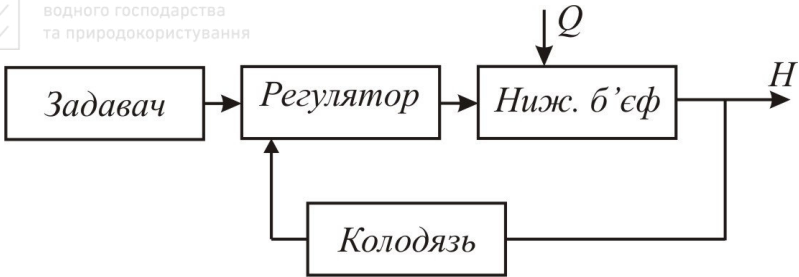


Рис. 2. Функціональна схема

Регульованою величиною в системі є рівень води  $h$ , а збуренням – витрата з нижнього б'єфу  $Q_2$ .

Циліндричний регулятор рівня води складається з трубопроводу 1 з конфузуром 11, запірного металевого циліндра 7, який виконує функцію регулюючого органу, важеля 6 і поплавка 4. У нижній частині циліндра знаходиться діафрагма з центральним отвором 8, яка виконує роль демпфера (гідравлічна диференціююча ланка, яка гасить коливання циліндра). Відбивач у вигляді парасольки 9, який кріпиться за допомогою чотирьох стояків до фланця конфузора, збільшує коефіцієнт витрати регулятора за рахунок зміни напрямку потоку води, що виходить із конфузора. Гумовий ущільнювач 10 забезпечує необхідну герметичність в закритому стані регулятора.

Вимірювальний колодязь 3 сполучений з нижнім б'єфом трубою 12, а з верхнім – трубою 13. На трубі 12 і трубі 13 встановлені вентилі вибору режимів роботи: при відкритому вентилі на трубі 13 і закритому – на трубі 12 регулятор буде закритим, бо рівень води в колодязі зрівняється з рівнем води у верхньому б'єфі; поплавок підніметься, циліндр опуститься і під дією своєї ваги щільно закрий конфузур; при відкритому вентилі на трубі 12 і закритому – на трубі 13 регулятор переводиться на автоматичне регулювання, бо рівні води в колодязі і нижньому б'єфі будуть однаковими.

Зверху поплавка має привантажувальну камеру 5, яка по трубі 2 наповнюється водою, коли рівень води у верхньому б'єфі підніметься до аварійної позначки  $H_{max}$ .

При наповненні камери водою вага поплавка збільшується, що спричиняє повне відкриття регулятора. Внаслідок цього скид води у

нижній б'єф значно збільшиться і не виникає переповнення верхнього б'єфу. Коли рівень води опуститься нижче позначки  $H_{\max}$ , вода із привантажувальної камери поступово витече через невеликий отвір і регулятор перейде на режим автоматичного регулювання рівня води у нижньому б'єфі.

Принцип дії регулятора полягає у зрівноважуванні моментів, що діють на важіль. В усталеному режимі момент від маси поплавка  $m_n$  і виштовхувальної сили  $F_n$  дорівнює моменту від маси циліндра  $m_{\text{ц}}$ :

$$(m_n g - F_n) l_1 = m_{\text{ц}} g l_2, \quad (1)$$

де  $l_1$  і  $l_2$  – плечі важеля.

При зміні втрати води з нижнього б'єфу, наприклад, на  $\Delta Q_2$ , знижується рівень води в ньому і у вимірювальному колодязі, що спричиняє зменшення сили  $F_n$ . Рівність (1) порушується і циліндр почне переміщуватись вгору, збільшуючи подачу води у нижній б'єф. Цей процес буде йти доти, доки не наступить знову рівність моментів (1).

## 1.2. Визначення конструктивних параметрів регулятора

Основним конструктивним параметром циліндричного регулятора, який визначає інші конструктивні параметри, є діаметр конфузора

$$d = \sqrt{\frac{4Q_2}{\pi \mu \sqrt{2g(H_{BB} - h_0)}}}, \quad (2)$$

де  $H_{BB} - h_0$  – різниця рівнів верхнього і нижнього б'єфів;  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$  прискорення земного тяжіння.

Експериментально встановлено, що коефіцієнт витрати  $\mu$  залежить від переміщення циліндра  $a_{\text{ц}}$ , висоти установки відбивача у вигляді парасольки  $h_{\text{с}}$  і його центрального кута  $\alpha_{\text{с}}$ . Експериментальним шляхом встановлено, що при  $h_{\text{с}} = 0,35d$  і  $\alpha_{\text{с}} = 125^\circ$



$$\mu = 1,5 \left( \frac{a_u}{d} \right)^{0,73}. \quad (3)$$

Із умови рівнопрохідності потоку води через конфузор і вихід регулятора можемо записати

$$\pi d_u a_u = \frac{\pi d^2}{4}. \quad (4)$$

Діаметр циліндра приймають  $d_u = 1,25d$ . Підставивши  $d_u = 1,25d$  в (4) одержимо  $a_u = 0,2d$ . Для  $a_u = 0,2d$  із формули (3) знаходимо  $\mu = 0,46$ .

Висота циліндра повинна бути такою, щоби максимальний рівень води у верхньому б'єфі не спричиняв піднімання циліндра. Тому його висота

$$h_u = H_{BB} - h_0 + h_p - h_k + c, \quad (5)$$

де  $h_p$  – розрахункова глибина нижнього б'єфу;  $h_k = 0,5$  м - висота конфузора;  $c = 0,2$  м - запас по висоті.

Діаметр циліндра  $d_u = 1,25d$ .

Маса сталевого циліндра з діафрагмою

$$m_u = \gamma_c \delta \pi \left( d_u h_u + \frac{d_u^2}{2} \right), \quad (6)$$

де  $\gamma_c = 7,8 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup> – густина сталі;  $\delta = 3 \cdot 10^{-3}$  м – товщина сталевого листа, з якого виготовляють циліндр і діафрагму.

При розрахунках приймають, що у статичному режимі піднімальна сила поплавка  $F_n = 0,25 m_n g$ . Тоді із умови рівності моментів  $(m_n - 0,25 m_n) l_1 g = m_u l_2 g$  знаходимо масу поплавка

$$m_n = \frac{m_u l_2}{0,75 l_1}. \quad (7)$$

Момент інерції при обертанні системи приймають



$$I = 0,05(m_y + m_n), \text{ кг} \cdot \text{м}^2. \quad (8)$$

Із конструктивних міркувань приймають  $l_2 = 1,5d_y$ . Площу поперечного перерізу поплавка приймають  $S_n = d_y^2$ .

Поплавок виготовляють у вигляді кубу із сталевого листа товщиною 3мм. Його маса дорівнюватиме  $m'_n = 6\gamma_c \delta d_y^2$ . Вона буде меншою розрахункової маси  $m_y$ . Різницю мас  $\Delta m = m_n - m'_n$  створюють загрузкою каміння в поплавок.

### 1.3. Динаміка системи автоматичного регулювання.

Система автоматичного регулювання рівня води у нижньому б'єфі каналу повинна бути не тільки стійкою, але і мати певні показники якості роботи в динамічних режимах. Бажано, щоби перехідний процес в системі був аперіодичним (без затухаючих коливань) і мінімальним за часом. Виходячи із цих умов, необхідно вибрати такі параметри регулятора, які в найбільшій мірі впливають на характер перехідного процесу. А це можна зробити лише на підставі рівняння, яким описується перехідний процес, зумовлений зміною витрати води з нижнього б'єфу. Знайдемо це рівняння.

Нехай до зміни рівня води у нижньому б'єфі ( $t = 0$ ) витрата води з нижнього б'єфа  $Q_{20}$  була рівна витраті регулятора  $Q_{po}$  і рівні води в б'єфах були сталими і відповідно дорівнювали  $H_{BB} = const$  і  $h_0$ . Крім того, приймемо, що рівні води у нижньому б'єфі і в колодязі завжди рівні, тобто будемо нехтувати деяким запізненням, зв'язаним з перетіканням води через з'єднувальну трубу 12.

За цих умов при збільшенні витрати на  $\Delta Q_2$  рівень води зменшиться на

$$\varepsilon = h_0 - h, \quad (9)$$

де  $h$  - миттєве значення рівня води у нижньому б'єфі.

Якщо прийняти, що важіль абсолютно жорсткий, то положення поплавка



$$h_n = h_0 - \frac{l_1}{l_2} a_y = h_0 - k_1 a_y, \quad (10)$$

де  $a_y$  - переміщення циліндра;  $k_1 = l_1 / l_2$ .

В динаміці (перехідний процес)  $h$  і  $h_n$  не відповідають ustalеному режиму із-за інерційності системи і тому виникає динамічна сила на поплавку, яка згідно закону Архімеда дорівнює

$$F_\delta = \gamma S_n (h_n - h) = k_2 (h_n - h), \quad (11)$$

де  $\gamma$  - об'ємна густина рідини;  $S_n$  - площа поплавка;  $k_2 = \gamma S_n$ .

Підставивши в рівняння (11)  $h = h_0 - \varepsilon$  і  $h_n = h_0 - k_1 a_y$  одержимо

$$F_\delta = k_2 (\varepsilon - k_1 a_y). \quad (12)$$

Сили тертя в шарнірах і поплавка у воді дуже малі і ними можна знехтувати. Рівень води в циліндрі і у верхньому б'єфі в ustalеному режимі однакові, як в сполучених посудинах. При переміщенні циліндра вода перетікає через отвір в діафрагмі і це створює в'язке тертя. Внаслідок цього виникає в динаміці сила

$$F_T = -k_\varepsilon \frac{da_y}{dt} = -k_\varepsilon v_y, \quad (13)$$

де  $k_\varepsilon$  - коефіцієнт в'язкого тертя, який залежить від форми і площі отвору в діафрагмі;  $v_y$  - швидкість руху циліндра (діафрагми).

Рух поплавка і циліндра відносно шарніра є обертовим і він описується рівністю моментів

$$F_\delta l_1 = J \frac{d\omega}{dt} + m_n \frac{dv_n}{dt} l_1 - m_y \frac{dv_y}{dt} l_2 + F_T l_2, \quad (14)$$

де  $J$  - момент інерції системи;  $\omega$  - кутова швидкість;  $v_n$  - швидкість поплавка.



Так як  $v_n = \frac{l_1}{l_2} v_u$  і  $\omega = \frac{v_u}{l_2}$ , то

$$F_\partial = \left( \frac{J}{l_1 l_2} + k_1 m_n - \frac{m_u}{k_1} \right) \frac{dv_n}{dt} - \frac{k_\varepsilon}{k_1} v_u = \frac{1}{k_3} \frac{dv_u}{dt} - k_4 v_u$$

або 
$$\frac{dv_u}{dt} + k_3 k_4 v_u = k_3 F_\partial, \quad (15)$$

де  $k_3 = \left( \frac{J}{l_1 l_2} + k_1 m_n - \frac{m_u}{k_1} \right)^{-1}$ ;  $k_4 = \frac{k_\varepsilon}{k_1}$ .

Швидкість циліндра

$$v_u = \frac{da_u}{dt}. \quad (16)$$

Витрата регулятора  $Q_p$  залежить від діючого напору  $H_{BB} - h$ , площі перерізу конфузора  $S_k$  і коефіцієнта витрати  $\mu$ . Втратами напору у підвідному трубопроводі і конфузурі можна знехтувати, так як вони незначні у порівнянні з  $H_{BB} - h$ . За цих умов

$$Q_p = \mu S_k \sqrt{2g} \sqrt{H_{BB} - h} = \mu S_k \sqrt{2g} \sqrt{H_{BB} - h_0 + \varepsilon}. \quad (17)$$

В системах автоматичного регулювання  $\varepsilon \ll H_{BB} - h_0$  і їм при визначенні  $Q_p$  нехтують. Із-за цієї причини коефіцієнт витрати регулятора приймають сталим ( $\mu = const$ ). Для прийнятих допущень і умови рівно прохідності водного потоку  $S_k = \pi d_u a_u$ , де  $d_u$  - діаметр циліндра, рівняння (17) матиме вигляд:

$$Q_p = \pi d_u \mu a_u \sqrt{2g} \sqrt{H_{BB} - h_0} = k_5 a_u, \quad (18)$$

де  $k_5 = \pi d_u \mu \sqrt{2g} \sqrt{H_{BB} - h_0}$ .



Витрата води з нижнього б'єфа залежить від  $h$ , тобто  $Q_2 = f(h)$ .

При зміні рівня на  $\varepsilon$  зміну витрати можна вважати пропорційною  $\varepsilon$ , тобто рахувати, що

$$\Delta Q_2 = k_6 \varepsilon = k_6 (h_0 - h).$$

Тоді

$$Q_2 = Q_{20} - \Delta Q_2 = Q_{20} - k_6 h_0 + k_6 h = Q'_{20} + k_6 h, \quad (19)$$

де  $k_6$  - коефіцієнт пропорційності, який залежить від форми водовипуску;  $Q'_{20} = Q_{20} - k_6 h_0$ .

Перехідний процес в нижньому б'єфі виникає із-за різниці між витратою регулятора  $Q_p$  і витратою нижнього б'єфу, яка дорівнює

$$\Delta Q = Q_p - Q_2, \quad (20)$$

що зумовлює зміну  $h$ . Для безконечного малого проміжку часу  $dt$  справедлива рівність  $S_{НБ} dh = \Delta Q dt$  або

$$\frac{dh}{dt} = \frac{1}{S_{НБ}} \Delta Q = k_7 \Delta Q, \quad (21)$$

де  $S_{НБ}$  - площа витоку (басейну);  $k_7 = \frac{1}{S_{НБ}}$ .

Отже, перехідний процес в системі автоматичного регулювання рівня води буде описуватись системою рівнянь (22)

$$\begin{aligned} \varepsilon &= h_0 - h; \\ F_{\ddot{a}} &= k_2 (\varepsilon - k_1 a_{\ddot{o}}); \\ \frac{dv_{\ddot{o}}}{dt} + k_3 \frac{k_{\hat{a}}}{k_1} v_{\ddot{o}} &= k_3 F_g; \\ \frac{da_{\ddot{o}}}{dt} &= v_{\ddot{o}}; \\ Q_p &= k_5 a_{\ddot{o}}; \end{aligned} \quad (22)$$



$$\Delta Q = Q_p - Q_2;$$

$$\frac{dh}{dt} = k_7 \Delta Q;$$

$$Q_2 = Q'_{20} + k_6 h,$$

Щоб визначити рівняння, яким буде описуватись зміна будь якої із змінних, що входять в систему рівнянь (22), необхідно розв'язати цю систему відносно даної змінної.

Розв'яжемо систему рівнянь (22) відносно  $h$ , тобто визначимо рівняння, яким буде описуватись зміна води у нижньому б'єфі. Для цього, підставивши в (10) значення  $F_0$  із рівняння (9), одержимо

$$\frac{dv_u}{dt} + k_3 k_4 v_u = k_2 k_3 (\varepsilon - k_1 a_u).$$

В одержане рівняння підставимо  $v_u = \frac{a_u}{dt}$  і  $\frac{dv_u}{dt} = \frac{d^2 a_u}{dt^2}$  і одержимо

$$\frac{d^2 a_u}{dt^2} + k_3 k_4 \frac{da_u}{dt} + k_1 k_2 k_3 a_u = k_2 k_3 \varepsilon. \quad (23)$$

Тепер потрібно визначити  $a_u$  через  $h$  із рівнянь (12), (13) і (14).  
Із (12)

$$a_u = \frac{Q_p}{k_5} = \frac{1}{k_5} (Q_2 + \Delta Q) = \frac{1}{k_5 k_7} \frac{dh}{dt} + \frac{Q_2}{k_5}. \quad (24)$$

Підставивши в (23)  $a_u$  із (24),  $\frac{da_u}{dt} = \frac{1}{k_5 k_7} \frac{d^2 h}{dt^2} + \frac{1}{k_5} \frac{dQ_2}{dt}$ ,

$$\frac{d^2 a_u}{dt^2} = \frac{1}{k_5 k_7} \frac{d^3 h}{dt^3} + \frac{1}{k_5} \frac{d^2 Q_2}{dt^2} \text{ і } \varepsilon = h_0 - h, \text{ одержимо}$$



$$\frac{d^3 h}{dt^3} + k_3 \frac{k_6}{k_1} \frac{d^2 h}{dt^2} + k_1 k_2 k_3 \frac{dh}{dt} + k_2 k_3 k_5 k_7 h = k_2 k_3 k_5 k_7 h_0 - k_7 \left( \frac{d^2 Q_2}{dt^2} + k_3 \frac{k_6}{k_1} \frac{dQ_2}{dt} + k_1 k_2 k_3 Q_2 \right). \quad (25)$$

Рівняння (25) описує зміну рівня води в системі автоматичного регулювання при зміні витрати. В цьому рівнянні всі коефіцієнти відомі, крім коефіцієнта в'язкого тертя  $k_6$ .

#### 1.4. Визначення коефіцієнта в'язкого тертя.

Його величина повинна бути такою, яка забезпечували би умову стійкості і аперіодичний (монотонний) перехідний процес.

Диференційному рівнянню (25) відповідає характеристичне рівняння

$$a_0 p^3 + a_1 p^2 + a_2 p + a_3 = 0,$$

де  $a_0 = 1$ ;  $a_1 = \frac{k_3 k_6}{k_1}$ ;  $a_2 = k_1 k_2 k_3$  і  $a_3 = k_2 k_3 k_5 k_7$ .

Відомо, що система регулювання, яка описується диференціальним рівнянням 3-го порядку, буде стійкою тоді, коли всі коефіцієнти лівої частини рівняння (25) будуть додатними числами і визначник

$$\Delta = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 & 0 \\ a_0 & a_2 & 0 \\ 0 & a_1 & a_3 \end{vmatrix} > 0, \quad (26)$$

де  $a_0$ ,  $a_1$  і  $a_2$  - коефіцієнти при третій, другій і першій похідних.

Розкривши визначник (26) і підставивши в нього коефіцієнти із (25), матимемо

$$\frac{k_3 k_6}{k_1} \cdot k_1 k_2 k_3 - k_2 k_3 k_5 k_7 > 0. \quad (27)$$



$$k_6 > \frac{k_5 k_7}{k_3}. \quad (28)$$

Виконання умови (28) забезпечує стійкість системи регулювання рівня води у нижньому б'єфі (басейні), але не визначає характеру перехідного процесу.

Перехідний процес в стійкій системі може бути монотонним або у вигляді затухаючих коливань і це залежить від коренів рівняння

(25) і збурення. Якщо збурення  $Q_2 = const$ , то  $\frac{dQ_2}{dt} = 0$ ,  $\frac{d^2Q_2}{dt^2} = 0$  і рівняння (25) зводиться до вигляду

$$\frac{d^3h}{dt^3} + k_3 k_4 \frac{d^2h}{dt^2} + k_1 k_2 k_3 \frac{dh}{dt} + k_2 k_3 k_5 k_7 h = k_2 k_3 k_7 - (k_5 h_0 - k_1 Q_2). \quad (29)$$

Знайти корені рівняння третього порядку можна за формулами Кардана, але це довга процедура. Краще використати діаграму Вишнеградського (рис.3), на якій показані області монотонних і коливально-затухаючих перехідних процесів. Коефіцієнти  $A_1$  і  $A_2$  зв'язані з коефіцієнтами рівняння (29) залежностями

$$A_1 = \frac{k_1 k_2 k_3}{\sqrt[3]{(k_2 k_3 k_5 k_7)^2}}; \quad (30)$$

$$A_2 = \frac{k_3 k_6}{k_1 \sqrt[3]{k_2 k_3 k_5 k_7}}. \quad (31)$$

Із теорії автоматичного регулювання відомо, що перехідний процес буде монотонним, якщо коефіцієнти  $A_1$  і  $A_2$  будуть знаходитись в області, обмеженій кривими 1 і 2. Тому за формулою (30) вираховуємо коефіцієнт  $A_1$ , який не залежить від коефіцієнта в'язкого тертя  $k_6$ . Якщо його значення не попаде у вказану область, тобто буде меншим 3, то приймемо  $A_1 = 3$ . Підставивши в (30)  $A_1 = 3$ , вираховуємо коефіцієнт  $k_2$ , який залежить тільки від площі

поперечного перерізу поплавка. За визначеним  $k_2$  вирахуємо нову площу поперечного перерізу поплавка.

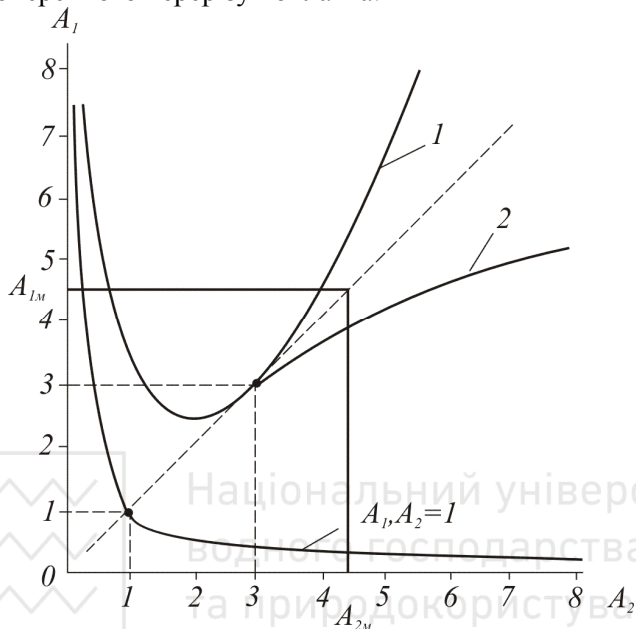


Рис 3. Діаграма Вишнеградського

Прийнявши  $A_2 = A_1$ , визначимо коефіцієнт в'язкого тертя

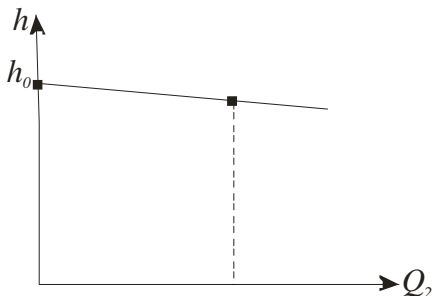
$$k_6 = \frac{k_1 A_1}{k_3} \sqrt[3]{k_2 k_3 k_5 k_7}. \quad (32)$$

Отже, для знайденого за формулою (32) коефіцієнта  $k_6$  перехідний процес в системі автоматичного регулювання буде мати монотонний вид.

## 1.5. Усталений режим в системі автоматичного регулювання.

Рівняння (29) описує перехідний процес в системі автоматичного регулювання рівня води. В усталеному режимі всі похідні дорівнюють

нулю і рівняння статичної характеристики матиме вигляд:



$$h = \frac{k_2 k_3 k_7 (k_5 h_0 - k_1 Q_2)}{k_2 k_3 k_5 k_7} = h_0 - \frac{k_1}{k_5} Q_2. \quad (33)$$

Рис.4. Статична характеристика системи

За рівнянням (33) будують статичну характеристику системи автоматичного регулювання  $h = f(Q_2)$  (рис. 4).

**Приклад.** Визначити параметри циліндричного регулятора прямої дії за такими вихідними даними: розрахункова витрата  $Q_{2p} = 0,15 \text{ м}^3/\text{с}$ ; перепад рівнів води в б'єфах  $H_{BB} - h_0 = 0,8 \text{ м}$ ; розрахункова глибина нижнього б'єфу  $h_{p.o} = 1,2 \text{ м}$ ; відношення плеч важелів  $l_1/l_2 = 1,5$ ; регульована площа нижнього б'єфу  $S_{HB} = 15 \text{ м}^2$ .

Розрахунки параметрів регулятора доцільно проводити у такій послідовності.

1. Діаметр конфузора

$$d = \sqrt{\frac{4Q_{2p}}{\pi\mu\sqrt{2g(H_{BB} - h_0)}}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,15}{3,14 \cdot 0,46\sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 0,8}}} = 0,44 \text{ м}.$$

2. Діаметр циліндра із конструктивних міркувань приймають рівним

$$d_y = 1,25d = 1,25 \cdot 0,44 = 0,55 \text{ м}.$$



3. Щоби рівень води у верхньому б'єфі не спричиняв виштовхування циліндра, його висота повинна дорівнювати

$$h_y = (H_{BG} - h_0) + h_{p.o} - h_k + c = 0,8 + 1,2 - 0,5 + 0,8 = 2,3 \text{ м.}$$

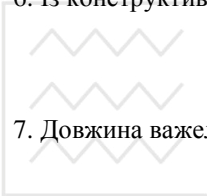
4. Маса сталевого циліндра з діафрагмою, виготовленого із листової сталі товщиною  $\delta = 3$  мм,

$$m_y = \pi \delta \gamma_c d_y \left( h_y + \frac{d_y}{2} \right) = 3,14 \cdot 3 \cdot 10^{-3} \cdot 7,8 \cdot 10^3 \cdot 0,55 (2,3 + 0,5 \cdot 0,55) = 115,6 \text{ кг.}$$

5. Маса поплавка розрахункова

$$m_n = m_y \frac{l_2}{0,75 l_1} = 115,6 \frac{1}{0,75 \cdot 1,5} = 102,8 \text{ кг.}$$

6. Із конструктивних міркувань приймають



$$l_2 = 1,5 d_y = 1,5 \cdot 0,55 = 0,83 \text{ м.}$$

7. Довжина важеля

$$l_1 = 1,5 l_2 = 1,5 \cdot 0,83 = 1,28 \text{ м.}$$

8. Площу поперечного перерізу поплавка приймають

$$S_n = d_y^2 = 0,55^2 = 0,30 \text{ м}^2.$$

9. Поплавки виготовляють із сталюого листа товщиною  $\delta = 3$  мм у вигляді куба. Тому його маса

$$m_n' = 6 \gamma \delta S_n = 6 \cdot 7,8 \cdot 10^3 \cdot 3 \cdot 10^{-3} \cdot 0,30 = 42,5 \text{ кг.}$$

10. Оскільки маса поплавка менша за розрахункову, то поплавок довантажують камінням масою

$$\Delta m_k = m_n - m_n' = 102,8 - 42,5 = 60,3 \text{ кг.}$$

Отже, всі конструктивні параметри циліндричного регулятора відомі, окрім отвору в діафрагмі, який визначає коефіцієнт в'язкого тертя. Його визначають із умови стійкості системи автоматичного регулювання і монотонного перехідного процесу. А для цього необхідно скласти

рівняння, якими будуть описуватись перехідні процеси у всіх ланках системи автоматичного регулювання.

11. Складемо рівняння, якими будуть визначатись перехідні процеси в ланках:

- зменшення рівня води у нижньому б'єфі при збільшенні витрати на  $\Delta Q$

$$\varepsilon = h - h_0 - h - 1,2$$

де  $h$  - рівень води в перехідному процесі;  $h_0 = 1,2$  - початковий рівень;

динамічна сила, яка при цьому діє на поплавок

$$F_d = k_2(\varepsilon - k_1 a_y) = 2944(\varepsilon - 1,5 a_y) ;$$

де  $k_2 = \gamma g S_n = 9,81 \cdot 1000 \cdot 0,3 = 2944 \text{ кг} / \text{с}^2$ ;  $k_1 = 1,5$ ;  $a_y$  - переміщення циліндра;

сила  $F_g$  через важелі  $l_1$  і  $l_2$  зумовлює переміщення циліндра, яке описується диференціальним рівнянням першого порядку

$$\frac{dv_y}{dt} + \frac{k_3 k_g}{k_1} v = k_3 F_g \quad \text{або} \quad \frac{dv_y}{dt} + 0,0087 k_g v = 0,0013 F_g ;$$

$$\text{де } k_3 = \left( \frac{I}{l_1 l_2} + k_1 m_n - \frac{m_y}{k_1} \right)^{-1} = \left( \frac{10,9}{1,28 \cdot 0,83} + 1,5 \cdot 102,8 - \frac{115,6}{1,5} \right)^{-1} = 0,0013 \text{ кг};$$

$k_g$  - коефіцієнт в'язкого тертя;  $I$  - момент інерції при обертанні поплавка і циліндра, який приймають рівним

$$I = 0,05(m_n + m_y) = 0,05(102,8 + 115,6) \cdot 10,9 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 ;$$

швидкість переміщення циліндра

$$v = \frac{da_y}{dt} ;$$

переміщення циліндра на величину  $a_y$  призводить до збільшення витрати регулятора

$$Q_p = k_5 a_y = 3,11 a_y ,$$

$$\text{де } k_5 = \pi d_y \sqrt{2g(H_{BB} - h_0)} = 3,14 \cdot 0,46 \cdot 0,55 \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 0,8} = 3,11 \text{ м}^2 / \text{с};$$

зміна витрати  $\Delta Q = Q_p - Q_2$  зумовить зміну рівня, яка буде описуватись рівнянням



$$\frac{dh}{dt} = \frac{1}{S_{НБ}} \Delta Q \quad \text{або} \quad \frac{dh}{dt} = 0,67 \Delta Q;$$

Рішивши отриману систему рівнянь у загальному вигляді відносно  $h$ , одержимо

$$\frac{d^3 h}{dt^3} + \frac{k_g}{k_1} \frac{d^2 h}{dt^2} + k_1 k_2 k_3 \frac{dh}{dt} + k_2 k_3 k_5 k_7 h = k_2 k_3 k_5 k_7 h_0 - k_7 \left( \frac{d^2 Q_2}{dt^2} + \frac{k_3 k_g}{k_1} \frac{dQ_2}{dt} + k_1 k_2 k_3 Q_2 \right) \text{ або}$$
$$\frac{d^3 h}{dt^3} + 0,0687 k_g \frac{d^2 h}{dt^2} + 57,4 \frac{dh}{dt} + 79,7 h = 79,7 h_0 - 0,67 \left( \frac{d^2 Q_2}{dt^2} + 0,0087 k_g \frac{dQ_2}{dt} + 57,4 Q_2 \right).$$

Із умови стійкості коефіцієнт в'язкого тертя

$$k_g > \frac{k_5 k_7}{k_3} = \frac{3,11 \cdot 0,67}{0,013} = 160 \text{ кг/с.}$$

Отже, система автоматичного регулювання рівня води у нижньому б'єфі буде стійкою, якщо  $k_g$  буде більшим за 160,3 кг/с. А щоби перехідний процес в ній був монотонним, то згідно діаграми Вишнеградського коефіцієнти  $A_1$  і  $A_2$  повинні бути більшими трьох.

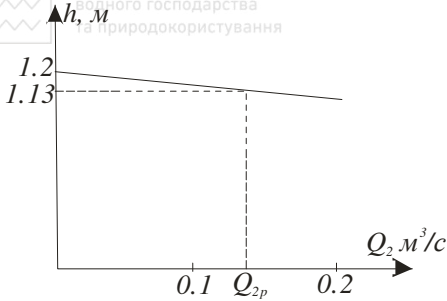
Коефіцієнт

$$A_1 = \frac{k_1 k_2 k_3}{\sqrt[3]{(k_2 k_3 k_5 k_7)^2}} = \frac{1,5 \cdot 2944 \cdot 0,013}{\sqrt[3]{(2944 \cdot 0,013 \cdot 3,11 \cdot 0,67)^2}} = 3,1.$$

Прийнявши  $A_1 = A_2$ , одержимо

$$k_g = \frac{k_1}{k_3} A_1 \sqrt[3]{k_2 k_3 k_5 k_7} = \frac{1,5}{0,013} \cdot 3,1 \cdot \sqrt[3]{2944 \cdot 0,013 \cdot 3,11 \cdot 0,67} = 1538 \text{ кг/с.}$$

Якщо діаметр отвору в діафрагмі зробити таким, щоби  $k_g = 1538$  кг/с, то перехідний процес буде монотонним.



Статична характеристика системи регулювання

$$h = h_0 - \frac{k_1}{k_5} Q_2 = 1,2 - \frac{1,5}{3,11} Q_2 = 1,2 - 0,48 Q_2 \quad (34)$$

Рис. 4. Статична характеристика системи

За цим рівнянням на рис. 4 побудована статична характеристика, із якої видно, що точність регулювання в ustalеному режимі складе 0,07 м або 5,8%.

Із рівняння (34) слідує, що для збільшення точності регулювання рівня води потрібно збільшити коефіцієнт  $k_5$ , який при заданій витраті  $Q_2$  залежить від різниці рівнів води у верхньому і нижньому б'єфах. Так при

$H_{BB} - h_0 = 0,8 \text{ м}$  і  $Q_{2p} = 0,15 \text{ м}^3 / \text{с}$  точність складає 5,8%, а при  $H_{BB} - h_0 = 1,6 \text{ м}$  і  $Q_{2p} = 0,15 \text{ м}^3 / \text{с}$   $k_5 = 3,14 \cdot 0,46 \cdot 0,55 \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 1,6} = 4,4 \text{ м}^2 / \text{с}$  і точність регулювання дорівнюватиме

$$\Delta h = h_0 - (h_0 - \frac{k_1}{k_5} Q_{2p}) = \frac{k_1}{k_5} Q_{2p} = \frac{1,5}{4,4} \cdot 0,15 = 0,05 \text{ м}$$

або

$$\frac{\Delta h}{h_0} \cdot 100 = \frac{0,05}{1,2} \cdot 100 = 4,3\%$$

Отже, зі збільшенням перепаду рівнів в б'єфах точність автоматичного регулювання рівня води у нижньому б'єфі збільшується.



## Література:

1. Баховец Б.А. Основы автоматике и автоматизация производственных процессов в гидромелиорации: [учеб. пособ.] / Б.А. Баховец, Я.В. Ткачук. – Л. : Выща шк. Изд-во при Львов. ун-те, 1989. – 336 с.
2. Бочаров С.Ю. Автоматизация водорегулирующих комплексов: [монография] / С.Ю. Бочаров. – Ровно. : РДТУ, 2000. – 110 с.

