

АНАЛІЗ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ РІВНЯ ЗА ВИКОРИСТАННЯ ЧАСТОТНО-КЕРОВАНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА НАСОСА

© Місюренко В. О., Семенюк М. Б., 2017

Проаналізовано систему автоматичного регулювання (САР) рівня рідини у резервуарі за використання частотно-керованого асинхронного електропривода насосного агрегату. Обґрунтовано доцільність та умови використання П- та ПІ- регулятора. Надано рекомендації щодо налаштування параметрів регуляторів. Наведено результати досліджень САР рівня, які виконано комп'ютерним симулюванням у середовищі Matlab-Simulink

Ключові слова: система автоматичного регулювання рівня, частотно-керований електропривод, П-регулятор, ПІ-регулятор, математичне моделювання.

The article presents an analysis of automatic adjustment system of level liquid in the tank in case the use of frequency-controlled asynchronous electric pump unit. It is proved expediency and conditions of use P- and PI- regulator. The recommendations of settings regulators have given. These results of automatic adjustment control system of level are obtained by computer simulation using Matlab-Simulink.

Keywords: automatic adjustment control of liquid level, frequency-controlled electric drive, P-regulator, PI regulator, mathematical modeling.

Постановка задачі

Регулювання рівня в резервуарі є поширеною задачею в системах водоподачі та водовідведення. Як приклад назвемо акумулюючі резервуари на насосних станціях першого підйому, водонапірні вежі, приймальні резервуари насосних каналізаційних станцій тощо.

Функціональну схему резервуара заповнення/випорожнення води наведено на рис. 1.

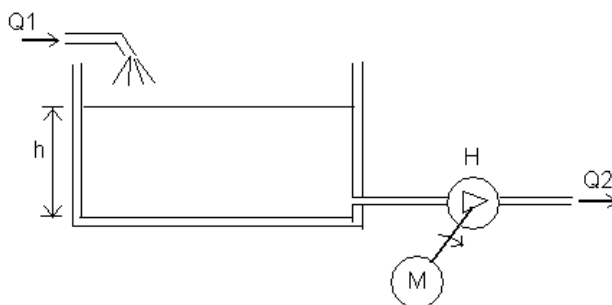


Рис. 1. Функціональна схема резервуара заповнення/випорожнення води

Вода в резервуар Q1 може надходити самотією (приклад приймальних резервуарів станцій відведення стічних вод) або за допомогою регульованих чи нерегульованих насосів. Випорожнення резервуара здійснюється за допомогою регульованого насоса.

Задачею керування є підтримання рівня води у резервуарі на певному рівні h , що зумовлено як технологічними вимогами, так і економічними чинниками. Підтримання заданого рівня води h

можливо лише для випадку однакового надходження та видалення води, тобто $Q_1 = Q_2$. Водночас надходження води є нерівномірним (визначається природними або технологічними чинниками). Тому зміну подачі Q_1 будемо розглядати як збурення системи. У цих умовах для підтримання незмінного рівня води в резервуарі необхідно регулювати відповідним чином продуктивність Q_2 насоса Н. Цю задачу повинна виконувати система автоматичного регулювання рівня (САР рівня).

Відомо, що енергоефективним способом регулювання продуктивності насоса є зміна швидкості його робочого колеса [1, 2]. Оскільки насоси приводяться в рух електродвигунами змінного струму, то для регулювання швидкості робочого колеса насоса застосовують частотний спосіб регулювання швидкості привідного двигуна за використання перетворювача частоти. На ринку України присутні перетворювачі частоти, адаптовані до задач регулювання турбомашин (насоси, вентилятори). Вони мають у своєму складі програмно реалізований ПД-регулятор з широкими можливостями налаштування до конкретної задачі. Це надає можливість створити досконалу систему автоматичного регулювання (стабілізації) рівня води у резервуарі із мінімальним використанням зовнішніх пристроїв регулювання. Як приклад можна назвати перетворювачі частоти серії Altivar Process 600 виробництва Schneider-Electric та перетворювачі частоти серії VLT AQUA від компанії Danfoss.

Основною задачею при впровадженні таких систем є задача синтезу регулятора рівня, тобто визначення структури та параметрів регулятора. В теоретичному плані задачу регулювання рівня та синтезу регулятора широко висвітлено в літературі, наприклад, в [3–7]. Однак, у цих публікаціях не враховано таких особливостей роботи перетворювача частоти, як обмеження вихідного сигналу регулятора (обмеження min/max частоти), обмеження вихідного струму перетворювача частоти і, як наслідок, фізичне обмеження прискорення/сповільнення швидкості насоса, особливості роботи перетворювача частоти в режимі гальмування (сповільнення швидкості).

Як показують результати проведених авторами досліджень, а також досвід, набутий ними при впровадженні САР рівня, нехтування такими особливостями призводить до негативних наслідків та потребує суттєвого корегування параметрів регулятора під час виконання пусконаладжувальних робіт.

У статті викладено результати досліджень, метою яких було:

- обґрунтувати доцільність та умови застосування структури П- та ПІ-регулятора рівня;
- показати суттєвий вплив обмеження вихідного сигналу регулятора на роботу системи.

Структурна схема САР рівня

Структурну схему САР рівня можна подати лінеаризованою структурною схемою, наведеною на рис. 2.

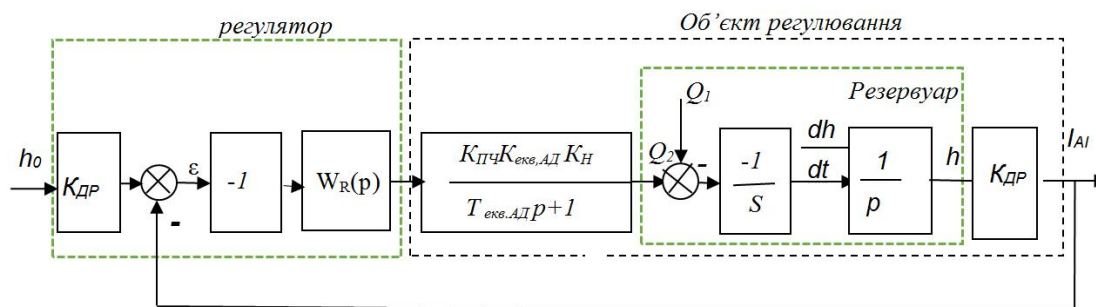


Рис. 2. Лінеаризована структурна схема САР рівня

Резервуар як об'єкт регулювання рівня можна подати таким рівнянням, записаним в операторному вигляді:

$$h(p) = -\frac{1}{p} \frac{Q_2 - Q_1}{S}, \quad (1)$$

де p – оператор Лапласа; S – площа резервуара.

Відцентрові насоси розвивають подачу, котра є пропорційною до швидкості обертання колеса насоса (за умови незмінності гідравлічного опору гідромережі) [1,2]. За частотного керування АД його швидкість обертання пропорційна (з точністю до ковзання) до частоти струму

живлення, отже подача насоса пропорційна до частоти, де коефіцієнт пропорційності являє собою передатний коефіцієнт насоса:

$$K_H(p) = \frac{\Delta Q}{\Delta \omega} = \frac{Q_{50}}{\omega_0}, \quad (2)$$

де Q_{50} – подача, котру забезпечує насос за швидкості обертання ω_0 , що відповідає номінальній частоті 50Гц.

Перетворювач частоти ПЧ є складною дискретною системою з цифровим керуванням. Враховуючи той факт, що інвертор ПЧ працює з високою частотою ШІМ (2,5–16 кГц), котра знаходиться поза смугою пропускання електромеханічної системи, можна прийняти ПЧ як безінерційний неперервний елемент САР з передатним коефіцієнтом $K_{ПЧ}$:

$$K_{ПЧ} = \frac{f}{I_{AI}}, \quad (3)$$

де I_{AI} – струм аналогового входу ПЧ, f – вихідна частота перетворювача частоти.

Як правило, для частотного керування асинхронними двигунами насосів використовують так званий скалярний квадратичний закон керування [2, 10]. За скалярного керування асинхронний двигун можна зобразити такою структурною схемою (рис. 3).

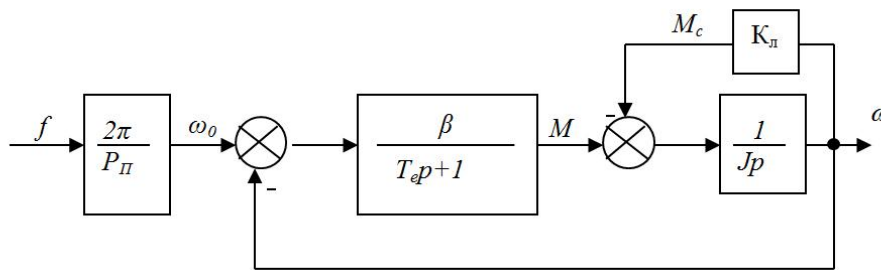


Рис.3. Структурна схема АД за використання скалярного закону частотного керування

Для насосів характерною є квадратична залежність моменту статичного навантаження від швидкості обертання: $M_C = K\omega^2$. За невеликих змін швидкості навколо номінального значення ω_H цю залежність можна лінеаризувати, тобто прийняти, що $M_C = K_A\omega$, де: $K_A = 2M_{CH}/\omega_H$.

На основі вищенаведеної структурної схеми можна отримати передатну функцію асинхронного двигуна, котра набуває такого остаточного вигляду:

$$W_{AD}(p) = \frac{\omega(p)}{f(p)} = \frac{K_{AD}}{(T_e p + 1)(T_m p + 1)}, \quad (4)$$

де $T_e = \frac{1}{\omega_{0H} S_{кр}}$ – електромагнітна стала ротора АД; $T_m = \frac{J}{K_L}$ – механічна стала часу приводу,

$K_{AD} = \frac{2\pi\beta}{p_\pi K_L}$ – передатний коефіцієнт АД, $\beta = \frac{2M_{кр}}{\omega_{0H} S_{кр}}$ – параметр, який характеризує жорсткість

робочої ділянки механічної характеристики АД; p_π – кількість пар полюсів АД.

Зазвичай $T_e \ll T_m$, тому можна знехтувати у виразі (4) добутком $T_e T_m$ як величиною другого порядку малості порівняно з сумою $T_e + T_m$. У такому випадку формула (4) спрощується і набуває такого вигляду:

$$W_{AD}(p) = \frac{K_{екв.АД}}{(T_{екв.АД} p + 1)}, \quad (5)$$

де $K_{екв.АД} = \frac{K_{AD}}{1 + \frac{\beta}{K_L}}$ – еквівалентний передатний коефіцієнт двигуна; $T_{екв.АД} = \frac{T_m + T_e}{1 + \frac{\beta}{K_L}}$ –

еквівалентна стала часу двигуна.

Аналіз похибок стабілізації САР рівня

Передатні функції похибок системи відносно задавальної дії h_0 та збурювальної дії Q_1 можна знайти на основі структурної схеми САР рівня (рис.2)[9]:

- передатна функція похибки за задавальною дією $h_0(p)$:

$$E_h(p) = \frac{h(p)}{h_0(p)} = \frac{K_{ДР}}{1 + W_R(p) \frac{K_{\Sigma} K_{ДР}}{p(T_{екв.АД}p + 1)}}. \quad (6)$$

- передатна функція похибки за збурювальною дією $Q_1(p)$:

$$E_{Q_1}(p) = \frac{h(p)}{Q_1(p)} = \frac{\frac{1}{pS}}{1 + W_R(p) \frac{K_{\Sigma} K_{ДР}}{p(T_{екв.АД}p + 1)}}, \quad (7)$$

$$\text{де } K_{\Sigma} = \frac{K_{екв.АД} K_{ПЧ} K_H}{S}.$$

Знайдемо усталені значення похибок регулювання рівня, якщо спостерігається стрибкоподібна зміна задавальної та/або збурювальної дії для випадку використання регулятора пропорційної дії з передатним коефіцієнтом K_R .

Усталене значення похибки за задавальною дією $h_0 \times 1(t)$:

$$\varepsilon_{h_0}(t) = \varepsilon_{h_0}(p) = \lim_{p \rightarrow 0} E_{h_0}(p) = \frac{K_{ДР}}{1 + \frac{K_{\Sigma} K_{ДР} K_R}{p(T_{екв.АД}p + 1)}} p \frac{h_0}{p} = 0. \quad (8)$$

Усталене значення похибки за збурювальною дією $Q_1 \times 1(t)$:

$$\varepsilon_{Q_1}(t) = \varepsilon_{Q_1}(p) = \lim_{p \rightarrow 0} E_{Q_1}(p) = \frac{\frac{1}{pS}}{1 + \frac{K_{\Sigma} K_{ДР} K_R}{p(T_{екв.АД}p + 1)}} p \frac{Q_1}{p} = \frac{1}{SK_{\Sigma} K_{ДР} K_R} Q_1. \quad (9)$$

Отже, констатуємо, що САР рівня за використання П-регулятора є астатичною системою за задавальною дією та статичною системою за збурювальною дією.

Для ліквідації статичної похибки системи від збурювальної дії необхідно вводити в регулятор інтегральну дію, тобто необхідно використовувати регулятор типу ПІ.

Аналіз динаміки САР рівня

Досліджували динаміку САР рівня комп'ютерним симулюванням у середовищі Matlab–Simulink. Для математичного моделювання використано такі розрахункові параметри: площа резервуара $S=20 \text{ м}^2$; передатний коефіцієнт насоса $K_H=2,48 \times 10^{-4} \text{ м}^3$; жорсткість механічної характеристики асинхронного двигуна $\beta = 20,7 \text{ Нм} \cdot \text{с/рад}$; передатний коефіцієнт двигуна $K_{АД}=68,4$; еквівалентний передатний коефіцієнт асинхронного двигуна $K_{екв.АД}=3,01$; електромагнітна стала асинхронного двигуна $T_e=0,048 \text{ с}$; механічна стала часу асинхронного двигуна $T_m=0,11 \text{ с}$; еквівалентна стала часу асинхронного двигуна $T_{екв.АД} = 0,007 \text{ с}$; передатний коефіцієнт перетворювача частоти $K_{ПЧ}= 3,123 \text{ Гц/мА}$, передатний коефіцієнт давача рівня $K_{ДР}=2,67 \text{ мА/м}$.

Метою моделювання було оцінити:

- вплив параметрів та структури П-, ПІ- регулятора на статику та динаміку САР рівня;
- вплив обмеження вихідного сигналу регулятора на поведінку системи.

Результати дослідження динаміки САР рівня за стрибкоподібною зміною завдання приросту рівня Δh_z від 0,5 до 1,0 м, з використанням П та ПІ-регуляторів наведено на рис. 4, 5.

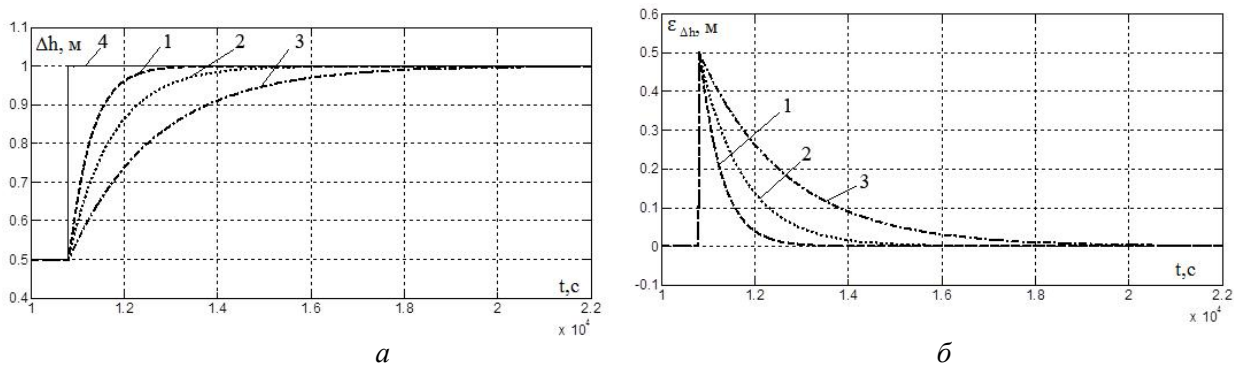


Рис. 4. Приріст рівня води Δh (а) та похибка приросту рівня води $\epsilon_{\Delta h}$ (б) у резервуарі у випадку зміни завдання приросту рівня Δh_3 та використання П-регулятора з такими параметрами: $K_n=20$ (крива 1), $K_n=10$ (крива 2), $K_n=5$ (крива 3)

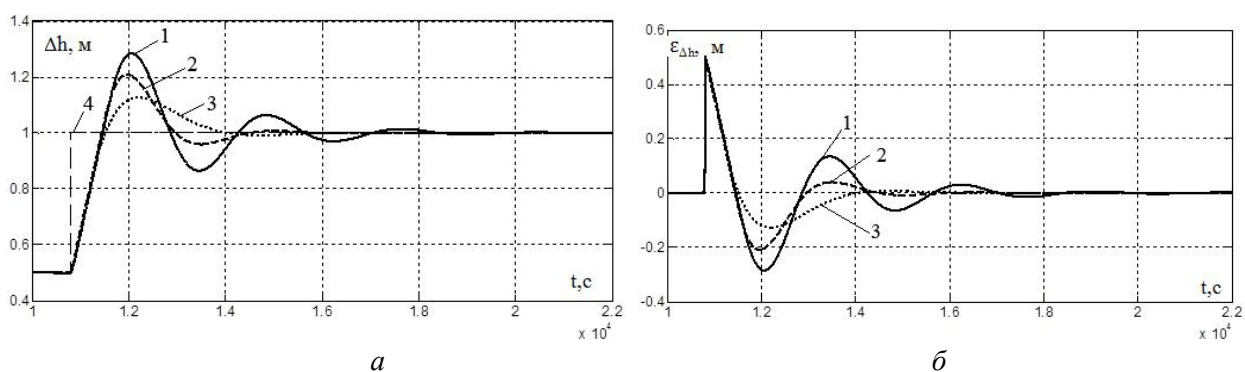


Рис. 5. Приріст рівня води Δh (а) та похибка приросту рівня води $\epsilon_{\Delta h}$ (б) у резервуарі у випадку зміни завдання приросту рівня Δh_3 та використання ПІ-регулятора з такими параметрами: $K_{ni}=10, T_{ni}=20\text{c}$ (крива 1); $K_{ni}=20, T_{ni}=20\text{c}$ (крива 2), $K_{ni}=20, T_{ni}=40\text{c}$ (крива 3)

Результати дослідження режиму САР рівня, за якого стрибкоподібно змінюється приріст подачі води у резервуар Q_1 (5% від номінального значення продуктивності насоса), наведено на рис.6. Завдання приросту рівня Δh_3 при цьому дорівнює нулеві.

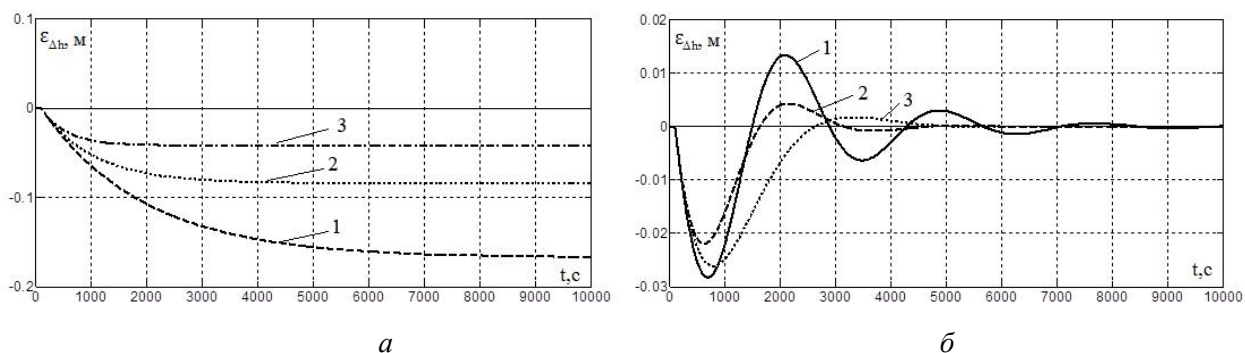


Рис. 6. Похибка приросту рівня води $\epsilon_{\Delta h}$ у резервуарі у випадку зміни приросту подачі води у резервуар Q_1 та використання П-регулятора (а) з такими параметрами: $K_n=5$ (крива 1), $K_n=10$ (крива 2), $K_n=20$ (крива 3); ПІ-регулятора (б) з такими параметрами: $K_{ni}=10, T_{ni}=20\text{ c}$ (крива 1), $K_{ni}=20, T_{ni}=20\text{ c}$ (крива 2), $K_{ni}=20, T_{ni}=40\text{ c}$ (крива 3)

На рис. 7 наведено результати дослідження САР рівня у випадку стрибкоподібного накиду номінального збурення (подачі води Q_1 у резервуар).

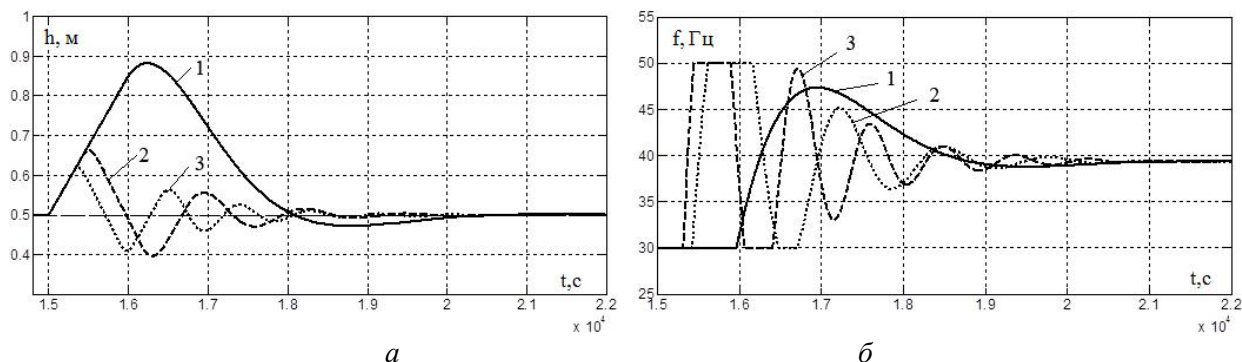


Рис. 7. Рівень води h в резервуарі (а) та частота вихідної напруги перетворювача частоти (б) у випадку зміни подачі води у резервуар Q_1 та використання ПІ-регулятора з такими параметрами: $K_{pi}=20$, $T_{pi}=40$ с (крива 1); $K_{pi}=20$, $T_{pi}=4$ с (крива 2); $K_{pi}=20$, $T_{pi}=2$ с (крива 3)

Висновки

1. Резервуар, наведений на рис.1, є статично нестійкою системою. Як ланка САР він являє собою чистий інтегратор, тому реалізувати задачу стабілізації рівня можна лише за використання замкненої САР із зворотним зв'язком за рівнем.
2. Для реалізації функції регулювання можна використати як П-регулятор, так і ПІ-регулятор. В одному і другому випадку отримуємо астатичну систему відносно задавальної дії. Однак відносно збурювальної дії за використання П-регулятора отримуємо усталену статичну похибку. Застосування ПІ- регулятора ліквідує цю похибку (рис.6).
3. З погляду динаміки (стійкість системи, мала чутливість до варіації параметрів системи, відсутність перерегулювання) перевагу слід віддати ПІ- регулятору. Збільшення коефіцієнта підсилення регулятора зменшує статичну похибку та скорочує час перехідного процесу. Однак, за суттєвого збільшення цього коефіцієнта виникає загроза коливності перехідного процесу і навіть появи автоколивань через вплив малих сталих часу, котрими у цьому дослідженні нехтували.

1. Энергоэффективность: преимущества применения частотно-регулируемого привода в насосных, вентиляционных и компрессорных установках, Техническая коллекция Шнейдер-Электрик, вып. – 2009. – № 27.– 33 с. 2. Лезнев Б. С. Энергосбережение и регулируемый привод в насосных и воздуходувных установках.- М.: Энергоатомиздат, 2006. – 360 с. 3. Денисенко В. ПИД – регуляторы: принцип построения и модификации. Ч. 1 // Современные технологии автоматизации. – 2006. – № 4 – С. 66–74. 4. Денисенко В. ПИД – регуляторы: принцип построения и модификации. Ч. 2 // Современные технологии автоматизации. – 2007. – № 1. – С. 78–88. 5. Денисенко В. ПИД – регуляторы: вопросы реализации. Ч. 1 // Современные технологии автоматизации. – 2007. – № 4. – С. 86–97. 6. Денисенко В. ПИД – регуляторы: вопросы реализации. Ч. 2 // Современные технологии автоматизации. – 2008. – № 1. – С. 86–97. 7. Полищук А. В. Настройка ПИД регулятора систем автоматического регулирования объектов теплоэнергетического оборудования // Сборник научных трудов SWorld. Материалы международной научно-практической конференции «Современные направления теоретических и прикладных исследований 2012». Одесса –2012. – № 1 (Т. 5). – С. 17–2. 8. Туні регуляторів. Методика налаштування регуляторів. Інструкція. – Електронний ресурс: http://www.microl.ua,-TN-010_Pid_Tuning,Rev.1.02, 28.12.2011. 9. Попов Е. П. Теория линейных систем автоматического регулирования и управления: учеб. пособ. для вузов. – 2-е изд. – М.: Наука, 1989. – 304 с. 10. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи / за ред. М. Г. Поповича та Лозинського О. Ю. – К.: Либідь, 2005. – 680 с.