

А.Л. Сіманенков, С.О. Рожков

АНАЛІЗ ВИКОРИСТАННЯ ПІДД²Д³-РЕГУЛЯТОРІВ В СУДНОВИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВКАХ

Анотація. Представлений аналіз ефективності застосування систем автоматичного регулювання (САР) з багато-параметричним регулятором та з регулятором і компенсатором суднової енергетичної установки (СЕУ). Встановлено, що САР з багато-параметричним регулятором має кращі показники регулювання порівняно з системою регулювання, яка включає регулятор та компенсатор.

Ключові слова: багато-параметричний регулятор, система автоматичного регулювання, САР з регулятором та компенсатором.

Аналіз проблеми

В суднових енергетичних установках (СЕУ) передача теплоти частіше за все відбувається у трубчатих або пластинчатих теплообмінних апаратах [1, 2]. Для таких апаратів характерно, що теплова ємність зі сторони потоку який нагрівається та зі сторони гріючого агента розподілена рівномірно упродовж всієї довжини теплообмінника.

Парові підігрівачі палива належать до більш простих теплообмінників. Їх динамічні характеристики дозволяють виконувати достатньо загальний аналіз динаміки систем регулювання [1, 2, 4]. Рівняння динаміки у протиточних теплообмінниках типу «рідина – рідина» та «повітря – рідина» мають доволі складний вид, оскільки їх параметри розподілені та взаємозв'язані.

Для отримання частотних характеристик навіть розімкненої системи потрібно провести дуже ємнісні розрахунки. У випадку багатоходових теплообмінників або таких, де відбувається різка зміна швидкостей чи інших фізичних властивостей потоку, динамічні характеристики визначаються лише за допомогою спеціалізованих комп'ютерних алгоритмів. Проте можна відзначити, що аналітичний опис динаміки теплообмінних апаратів супроводжується складними розрахунками, але процес автоматичного регулювання представляє

собою доволі просту процедуру, за виключенням випадків, коли необхідно отримати високу точність регулювання. Такі задачі властиві, наприклад, при регулюванні в'язкості палива суднових двигунів внутрішнього згорання (СДВЗ) з електронним керуванням упорскування типу RT-flex [1, 2, 4, 16].

В суднових системах підготовки палива широко застосовують автоматичні системи управління (АСУ), які реалізовані з використанням ПІ, ПІД-регуляторів, де необхідно враховувати відомі співвідношення в'язкості та температури палива [3, 6 - 8]. Використання графоаналітичних методів розрахунку налаштувань ПІД-регуляторів та якість перехідних процесів, зазвичай, оцінюється лінійним інтегральним критерієм. Але таке оцінювання може бути використане лише для монотонних та знакопостійних процесів. Обмеження на запас стійкості САР у такому випадку може гарантувати затухаючі перехідні процеси, де оцінювання процесу, з достатньою точністю, виконується на основі лінійного інтегрального критерію. Проте, це не виключає використання його коливальної характеристики, а задача знаходження мінімального лінійного інтегрального критерію вирішується аналітично.

Використання модульного або квадратичного інтегрального критерію якості перехідних процесів з обмеженням запасу стійкості буває надлишковим. При цьому існують випадки, коли потрібно реалізувати високу точність ідентифікації об'єкта управління (предикатор Смітта) [4, 5]. Тому обмеження на запас стійкості повинно бути задано явно або отримано з підінтегральної функції.

В САР на практиці здебільшого використовуються ПІД-регулятори, що формують регулюючий вплив в залежності від зміни величини, що підлягає регулюванню [5, 8, 10]. Величина та час регулюючого впливу залежать від зміни регульованої величини, інтегралу та похідної від неї. Передавальна функція ПІД-регулятора має наступний вигляд:

$$R(s) = k_p \cdot \left(1 + \frac{1}{T_i \cdot s} + T_d \cdot s \right). \quad (1)$$

В наш час спеціалістами з автоматичного керування продовжуються чисельні спроби заміни конвенційних ПІД-регуляторів на формально бездоганні, засновані на найновіших досягненнях теорії автоматичного керування, регулятори. Причиною безуспішності цих

спроб є припущення про можливість зображення об'єкту регулювання системами звичайних диференціальних рівнянь [6, 7]. На практиці, реальні об'єкти частіше за все мають запізнення у передачі регулюючих впливів, що робить їх лише частково спостережуваними та у звичайних умовах роботи вони піддаються випадковим збуренням, серед яких можуть бути неконтрольовані. Отже величина, що регулюється є також випадковим процесом. А отже, і величина помилки управління оцінюється або за довгий період у середньому, або величиною короточасних викидів викликаних ступеневою формою реалізації збурень. Оскільки для нелінійних систем не доведено, що ступенева форма збурень є найбільш важкою, то можна поставити під сумнів твердження про працездатність запропонованих регуляторів.

Реальні об'єкти автоматизації з великими транспортними запізненнями τ у лінійному наближенні описуються функціями виду:

$$W_0(s) = \tilde{W}_0(s) \cdot e^{-\tau \cdot s}, \quad (2)$$

де

$$\tilde{W}_0(s) = \frac{K_0}{(T_1s + 1) \cdot (T_2s + 1) \cdot \dots \cdot (T_n s + 1)}.$$

Передавальна функція багато-параметричного регулятора (3) з похідними різного порядку дає змогу покращити показник якості регулювання САР з великим транспортним запізненням [8, 9].

$$W_{pM}(s) = K_p^m \cdot \left(1 + \frac{1}{T_u s} + T_{d1} s + T_{d2}^2 s^2 + T_{d3}^3 s^3 \right), \quad (3)$$

де K_p^m - коефіцієнт передачі;

T_u - постійна часту інтегрування;

T_{d1} , T_{d2} , T_{d3} - постійні часу диференціювання.

Аналіз останніх публікацій

Найбільш відомими роботами з питання регулювання об'єктів з транспортним запізнюванням є роботи у яких пропонується використання предікатору Сміта. В інших роботах запропоновано можливість компенсації транспортного запізнювання за допомогою компенсатора з передавальною функцією $W_k(s) = e^{\tau \cdot s}$, який включено у систему перед регулятором [10 - 12].

Фізична реалізація такого компенсатору може бути представлена у вигляді розкладання у ступеневий ряд Лорана різної кількості членів (4):

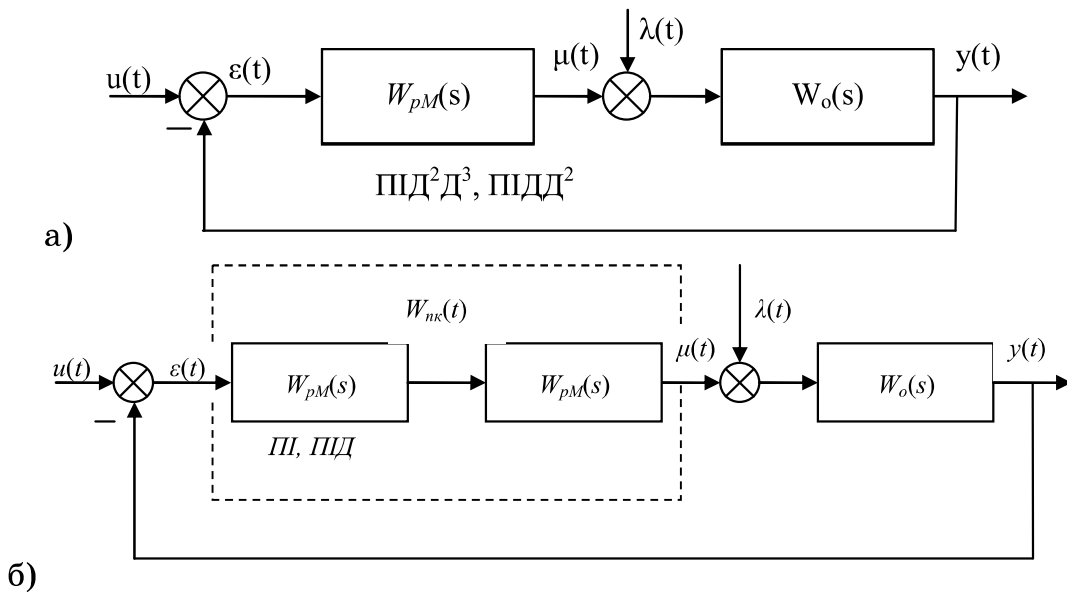
$$W_k^\varepsilon(s) = 1 + \frac{\tau s}{1!} + \frac{\tau^2 s^2}{2!} + \frac{\tau^3 s^3}{3!} + \dots \quad (4)$$

Слід зазначити, що передавальна функція з компенсатором та послідовно з'єднаним ПІД-регулятором буде мати вигляд ПІД²Д³-регулятора:

$$W_{нк}(s) = \left(K_p + \frac{K_u}{s} + K_d s \right) \cdot (1 + K_1 s + K_2 s^2) \quad , \quad (5)$$

де K_p , K_u , K_d - параметри налаштування ПІД-регулятора;
 K_1 , K_2 - параметри налаштування компенсатора.

На рис.1 показано структурні схеми САР з багато-параметричним регулятором та з компенсатором і регулятором.



Риунок 1 - Структурні схеми САР:

а) з багато-параметричним регулятором;

б) з компенсатором та регулятором

Виконав перетворення та визначив співвідношення між передавальними функціями (3) та (5), і враховуючи можливість фізичної реалізації компенсатору, обираємо граничне число членів ряду (4).

Запишемо вирази, що зв'язують параметри налаштування ПІД²Д³-регулятора та пристрою керування $W_{нк}(s)$, який включає ПІД-регулятор та компенсатор:

$$\begin{aligned}
K_p^M &= K_p + K_1 \cdot K_u; & K_u^M &= K_u; \\
K_{д1}^M &= K_д + K_1 \cdot K_p + K_2 \cdot K_u; \\
K_{д2}^M &= K_д \cdot K_1 + K_p \cdot K_2; \\
K_{д3}^M &= K_д \cdot K_2.
\end{aligned}
\tag{6}$$

В разі використання ПІ-регулятора, пристрій керування з компенсатором, що включає три члена ряду (4), буде відповідати ПІДД²-закону регулювання, а ПІ-регулятор з компенсатором, що включає два члена ряду (4), буде відповідати ПІД-алгоритму керування.

Мета роботи

Виконати порівняльний аналіз роботи САР з ПІДД²Д³, ПІДД²-регуляторами, а також САР з керуючим пристроєм, ПІД-регулятором та компенсатором.

Основна частина

Для знаходження оптимальних параметрів налаштування багато-параметричного регулятора та керуючого пристрою, що включає ПІД-регулятор з компенсатором, використано комп'ютерне середовище «Matlab» [14].

Для оптимізації параметрів алгоритмів керування, що аналізуються, значення цільових функцій були визначені з використанням імітаційної цифрової моделі системи регулювання з перетворенням за методом Рунге-Кутти 2-го порядку. При цьому, моделювання системи регулювання зведено до моделювання аперіодичних ланок, а використання методу Рунге-Кутти значно знизило чутливість моделі до інтервалу дискретності.

В якості цільової функції використано площу перехідного процесу у вигляді інтегралу за модулем відхилення величини регулювання $I_{M,\lambda} = \int |y(t)| dt$ при одиничному ступеневому впливі $\lambda(t) = 1$ по каналу регулюючого органу. Такий вигляд цільової функції в залежності від інтегралу має екстремальний характер, і таким чином робить стійкою процедуру пошуку оптимальних параметрів налаштувань. Для забезпечення заданого запасу стійкості використаний частотний показник коливальності M_{don} , визначений у вигляді максимального значення амплітудно-частотної характеристики (АЧХ) замкнутої системи на частоті резонансу $A_{zc}(\omega_p)$.

Рівняння для АЧХ замкнутої системи з багато-параметричним регулятором $A_{zc, pM}(\omega_p)$ та для пристрою керування з компенсатором $A_{zc, nk}(\omega_p)$ має вигляд:

$$A_{zc, pM}(\omega_p) = \left| \frac{W_{pM}(j\omega) \cdot W_o(j\omega)}{1 + W_{pM}(j\omega) \cdot W_o(j\omega)} \right|, \quad (7)$$

$$A_{zc, nk}(\omega_p) = \left| \frac{W_{nk}(j\omega) \cdot W_o(j\omega)}{1 + W_{nk}(j\omega) \cdot W_o(j\omega)} \right|.$$

Критерій оптимальності за звичайного налаштування регулятора без врахування зміни параметрів об'єкта запишемо у вигляді:

$$F_{opt} = \begin{cases} I_{M, \lambda} \cdot \left\langle 1 + |M_{\partial\partial\partial} - A_{zc}(\omega_p)| \right\rangle, \\ \text{якщо, } A_{zc}(\omega_p) \triangleright M_{\partial\partial\partial}, \\ I_{M, \lambda}, \text{ якщо, } A_{zc}(\omega_p) \leq M_{\partial\partial\partial}. \end{cases} \quad (8)$$

Запишемо критерій робастного налаштування, додатково враховуючи граничний показник коливальності для САР з варіативною передавальною функцією об'єкту регулювання:

$$F_{opt}^{pab} = \begin{cases} I_{M, \lambda} \cdot \left\langle 1 + |M_{\partial\partial\partial} - A_{zc}(\omega_p)| + |M_{\partial\partial\partial}^{var} - A_{zc}^{var}(\omega_p)| \right\rangle, \\ \text{якщо, } A_{zc}(\omega_p) \triangleright M_{\partial\partial\partial} \text{ та } A_{zc}^{var}(\omega_p) \triangleright M_{\partial\partial\partial}^{var}, \\ I_{M, \lambda}, \text{ якщо, } A_{zc}(\omega_p) \leq M_{\partial\partial\partial} \text{ та } A_{zc}^{var}(\omega_p) \leq M_{\partial\partial\partial}^{var}. \end{cases} \quad (9)$$

де ω_p^{var} - резонансна частота у САР з варіативними параметрами об'єкту; $M_{\partial\partial\partial}^{var}$ - допустиме значення показника коливальності у САР з варіативними параметрами при відповідній йому частоті ω_p^{var} .

Слід зауважити, що варіативною може бути як сама передавальна функція об'єкту регулювання в цілому, так і окремі параметри, які характеризують динамічні властивості об'єкту [12, 15]. В даному випадку, варіативним параметром обрано транспортне запізнювання τ_{var} . Зменшення запізнювання не викликає зниження стійкості системи, адже вона при цьому стає менш чутливою, а відповідно – більш грубою.

Для моделювання було використано наступну передавальну функцію об'єкту регулювання:

$$W_0(s) = K \cdot \frac{e^{\tau \cdot s}}{(T_1 s + 1) \cdot (T_2 s + 1)^3}, \quad (10)$$

де $K_0 = 3,32$; $\tau = 30$ с ($\tau_{\text{впр}} = 42$ с); $T_1 = 55$ с; $T_2 = 22$ с.

Обмеження на показник коливальності транспортного запізнення, а також параметри налаштування ПІД-регулятора з компенсатором - $M_{\text{доп}} \leq 1,618$.

У відповідності до критерію (8) отримано налаштування САР з ПІДД²Д³, ПІДД² та ПІД-регуляторами з урахуванням вихідного значення часу запізнення, а також налаштування САР з керуючим пристроєм, ПІД-регулятором та компенсатором другого порядку, що складається з трьох членів ряду (4). За результатами отриманих налаштувань проведено оцінку чутливості системи що до збільшення запізнення від τ до $\tau_{\text{впр}}$ шляхом аналізу амплітудно-частотних характеристик (АЧХ) та відповідних показників коливальності.

Для САР, що аналізуються, у відповідності до критерію (9) були отримані робастні налаштування, які обмежують величину показника коливальності при варіюванні запізнення. Умовою робастного налаштування за першим варіантом, є збереження прийнятого запасу стійкості як для САР з вихідним об'єктом, так і з варіативним. Проте, отримані параметри налаштування за таким жорстким обмеженням знижують якісні показники процесу регулювання при нормальному вихідному об'єкті, що є неминучим наслідком компромісу. Тому у другому варіанті запас стійкості для варіативного об'єкта при $\tau_{\text{впр}}$ був удвічі збільшений, що дозволило помітно підвищити якісні показники вихідної САР у протиставленні до першого варіанту.

На рис.2 показано результати розрахунків з перехідними процесами та АЧХ у САР з багато параметричними ПІДД²Д³, ПІДД² та ПІД-регуляторами, оптимально налаштованими на вихідну передавальну функцію об'єкта з постійною запізнення τ та при вибраній умові $M_{\text{доп}} \leq 1,618$.

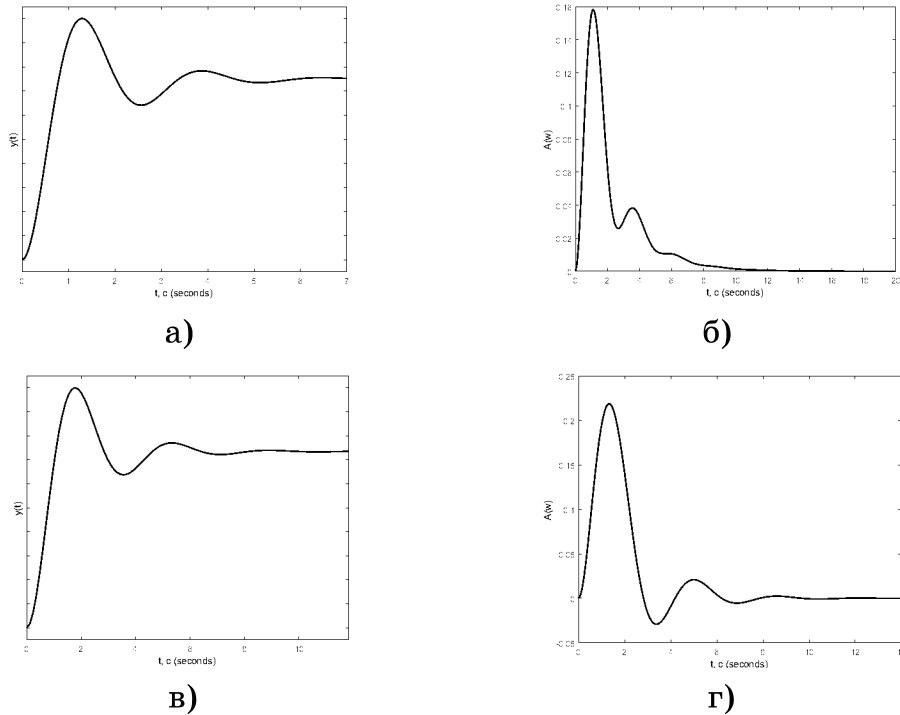


Рисунок 2 - Перехідні процеси та АЧХ для САР з багато-параметричними регуляторами, що налаштовані на вихідну передавальну функцію об'єкта:
 а, б – для вихідного об'єкта з запізнюванням τ ;
 в, г – для варіаційного об'єкта з запізнюванням $\tau_{вар}$.

На рис.3 показано перехідні процеси та АЧХ для САР з робастними налаштуваннями багато параметричних регуляторів для САР з ПІДД²Д³-регулятором та для структури з ПІД-регулятором і компенсатором.

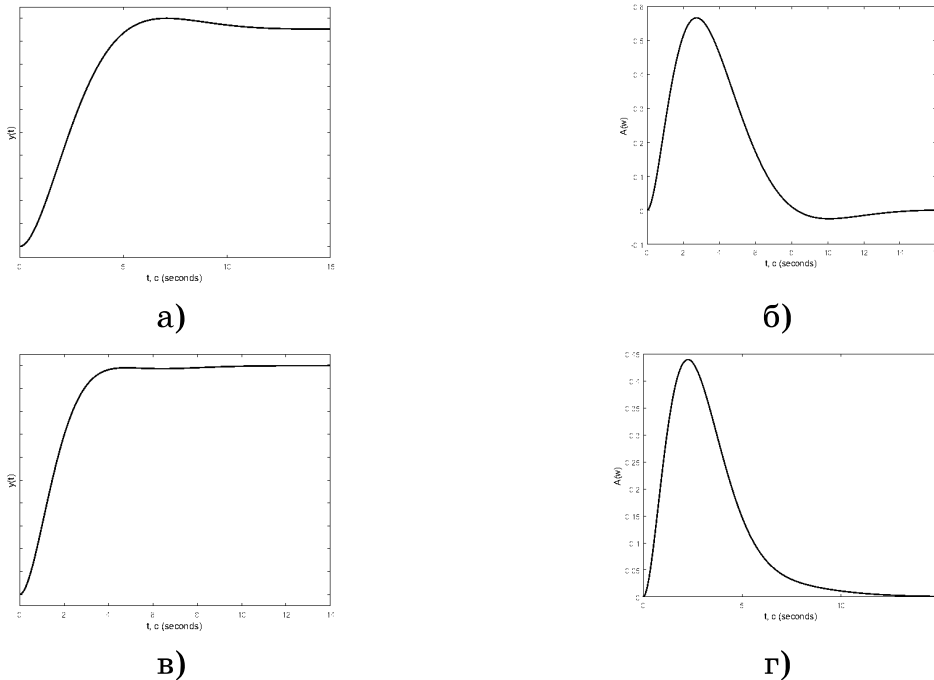


Рисунок 3 - Перехідні процеси та АЧХ для САР

з робастними налаштуваннями багато параметричних регуляторів:

а, б – для вихідного об'єкту з запізнюванням τ ;

в, г – для варіаційного об'єкту з запізнюванням τ_{var} .

Висновки

Якість САР з ПІДД²Д³-регулятором за інтегральним показником $I_{M,\lambda}$ покращується у 1,6 разів у порівнянні з ПІДД²-регулятором та у 3 рази у порівнянні з ПІД-регулятором. Збільшення часу запізнювання τ на 40% до τ_{var} за такого налаштування істотно знижує стійкість системи регулювання, де показник коливальності САР з ПІДД²Д³-регулятором збільшується в 3,2 рази, з ПІДД²-регулятором в 1,9 рази, а з ПІД-регулятором в 1,4 рази. Також погіршуються якісні показники $I_{M,\lambda}$, які збільшуються у САР з ПІДД²Д³-регулятором в 2,5 рази, з ПІДД²-регулятором в 1,8 рази, а з ПІД-регулятором в 1,3 рази.

За дотримання заданого запасу стійкості системи управління, де виконуються умови $M_{\partial\partial\partial} \leq 1.617$, $M_{\partial\partial\partial}^{var} \leq 1.617$, показник якості регулювання зменшується для ПІДД²Д³-регулятора в 1,4 рази, для ПІДД²-регулятора в 1,25 рази та для ПІД-регулятора в 1,12 рази. Різниця між перехідними процесами при звичайних налаштуваннях регулятора для відповідних τ та τ_{var} помітно зменшується, як за зви-

чайних налаштувань регулятору, так і при аналогічних варіативних налаштуваннях.

ЛІТЕРАТУРА

1. Сыромятников В. Ф. Наладка автоматики судовых энергетических установок./В.Ф. Сыромятников.:Справочник.– Л.:Судостроение, 1989. - 352с.
2. Сыромятников В. Ф. Основы автоматики и комплексная автоматизация судовых пароэнергетических установок. / В. Ф. Сыромятников. Учебник. – М.: Транспорт, 1983. – 312 с.
3. Ротач, В.Я. Расширение границ действия теории автоматического управления теплоэнергетическими процессами / В.Я. Ротач // Тепло- энергетика. – 2009. – № 10. – С. 25–31.
4. Штейнберг Ш.Е. Проблемы создания и эксплуатации эффективных систем регулирования./Ш.Е. Штейнберг, Л.П. Сережин, И. Е.Залуцкий и др.//Промышленные АСУ и контроллеры. Научтехлитиздат,2004.–№7.– С 1-7.
5. Дудников Е. Г. Автоматическое управление в химической промышленности: Учебник для ВУЗов./Под ред. Е.Г. Дудникова.–М.:Химия, 1987.– 368с.
6. Ротач В.Я. Теория автоматического управления; Учебник для вузов/ В. Я. Ротач - 2-е изд., перераб. и доп. – М.:МЭИ, 2004. –400 с.
7. Ротач В. Я. К расчету оптимальных параметров ПИД регуляторов по экспертным критериям / В. Я. Ротач // Промышленные АСУ и контроллеры. Научтехлитиздат, 2006. -№02. –С 22-29.
8. Денисенко В. ПИД регуляторы: принцип построения и модификации. <http://www.cta.ru/cms/f/342946.pdf>
9. Макаров И. М. Линейные автоматические системы (элементы теории, методы расчета и справочный материал). /И. М. Макаров, Б. М. Менский - 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1982. – 504 с.
- 10.Егупов Н. Д. Методы классической и современной теории автоматического управления./Под ред. Н. Д. Егупова, К. А. Пупкова: Учебник. В 5 т. Том 5. Синтез регуляторов систем автоматического управления. – М.:МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. – 616 с.
- 11.Уидброу Б. Адаптивная обработка сигналов / Б. Уитброу, С. Д. Стирнз // - М.: Радио и связь, 1989. - 440 с.
- 12.Morales L.G. (ed.) Adaptive Filtering InTech, 2011, – 410 pp.
- 13.Haykin S. Adaptive Filter Theory, 4th edition.–Prentice Hall, 2002.–936 p.
- 14.Attaway S. MATLAB: A Practical Introduction to Programming and Problem Solving. 4th Ed. –Butterwonh-Heinemann, 2017. – 598 p.
- 15.Ладанюк А.П. Показатели функционирования и устойчивости систем с многопараметрическими регуляторами / А.П. Ладанюк, Д.О. Крониковский // Проблемы управления и информатики, 2011. –№ 2. – С.122-129.
- 16.RT-flex Operation & Practical Training Course. <http://dieselturbo.man.eu>