

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
Національний університет кораблебудування  
імені адмірала Макарова

О.В. КОРОБКО

**ТЕОРІЯ І ПРОЕКТУВАННЯ ЦИФРОВИХ СИСТЕМ  
УПРАВЛІННЯ**

методичні вказівки до виконання практичних робіт

Миколаїв 2014

*О.В. Коробко* Теорія і проектування цифрових систем управління: Методичні вказівки до виконання практичних робіт. – Миколаїв: НУК, 2014. – 37 с.

*Кафедра комп'ютеризованих систем управління*

Подано теоретичні відомості та методичні вказівки до виконання практичних робіт, на основі яких студенти повинні набути навичок застосування методів та засобів теорії проектування цифрових систем управління для вирішення різноманітних задач автоматизації та керування. В посібнику приводиться короткий опис основних методів, що використовуються в навчальному курсі та даються рекомендації щодо виконання практичної роботи.

Рецензенти:

д-р техн. наук В.Л. Тимченко;

д-р техн. наук, проф. М.Я. Хлопенко

© Коробко О.В.

© Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, 2014

© Видавництво НУК, 2014

## ЗМІСТ

Вступ.....	4
<i>Практична робота №1. Частотні характеристики квантувачів. пристрій вибірки та збереження сигналу, його характеристики.....</i>	<i>5</i>
<i>Практична робота №2. Вивчення методик знаходження дискретних зображень і оригіналів неперервних систем .....</i>	<i>11</i>
<i>Практична робота №3. Побудова та принципи аналізу цифрових фільтрів.....</i>	<i>15</i>
<i>Практична робота №4. Дослідження дискретних систем управління з релейними елементами .....</i>	<i>17</i>
<i>Практична робота №5. Синтез цифрового керуючого пристрою з корекцією по фазі .....</i>	<i>19</i>
<i>Практична робота №6. Синтез цифрових ПІ та ПІД-регуляторів з корекцією полюсів об'єкту керування.....</i>	<i>23</i>
<i>Практична робота №7. Структурна організація моделей ЦСУ.....</i>	<i>27</i>
<i>Практична робота №8. Побудова розгалужених систем управління на базі готових промислових блоків автоматики та контролю .....</i>	<i>30</i>
Список літератури .....	35

## **ВСТУП**

Сьогодні цифрові системи керування набули високої популярності. Їх кількість вимірюється мільярдами, а сфери застосування різняться від кухонних приладів до пристроїв космічної техніки.

Мета вивчення дисципліни “Теорія і проектування цифрових систем управління” полягає у підготовці фахівців, які можуть проектувати та налагоджувати цифрові системи управління і розробляти нові алгоритми управління технічними об’єктами в різних сферах життя людей на сучасному рівні розвитку технологій.

Курс практичних робіт включає рекомендації щодо теоретичних методик проектування цифрових систем управління, а також розглядає шляхи їх апаратної реалізації на різних рівнях автоматизованості.

Методичні вказівки щодо виконання практичних робіт з навчальної дисципліни “Теорія і проектування цифрових систем управління” містять короткі теоретичні відомості з кожної теми та порядок виконання роботи, а також список рекомендованих літературних джерел.

## ПРАКТИЧНА РОБОТА № 1

### ЧАСТОТНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ КВАНТУВАЧІВ. ПРИСТРІЙ ВИБІРКИ ТА ЗБЕРЕЖЕННЯ СИГНАЛУ, ЙОГО ХАРАКТЕРИСТИКИ

**Метою роботи** є ознайомлення із специфікою застосування квантувачів у цифрових системах, методами перетворення аналогових сигналів у дискретні.

#### Теоретичні відомості

У зв'язку з бурхливим розвитком обчислювальної техніки у промисловій автоматизації все більшого застосування набувають системи, робота яких пов'язана з впливом, передачею і перетворенням послідовності імпульсів, тобто дискретні системи. До складу дискретної системи разом із ланками безперервної дії входять елементи, що перетворюють безперервні сигнали у дискретні, і елементи, що виконують зворотне перетворення.

Процес перетворення безперервного сигналу на імпульсну послідовність виконується двома етапами:

- квантування сигналу, тобто перетворення безперервного сигналу на дискретний;
- перетворення квантованого сигналу відповідно до одного із законів модулювання на імпульсну послідовність, що діє на об'єкт.

Розрізняють три види квантування сигналів: за рівнем, за часом, за рівнем і за часом одночасно.

Квантування за рівнем полягає у фіксації визначених дискретних значень безперервного сигналу. При цьому безперервний сигнал замінюється сигналом, який змінюється східчасто. Суміжні дискретні значення відрізняються один від одного на постійну величину  $\Delta x$ , яка називається кроком квантування. Перехід з одного рівня на інший відбувається у моменти часу, коли безперервний сигнал

досягає чергового фіксованого значення (рис. 3.1, а), або коли сигнал проходить середину інтервалу між двома суміжними значеннями (рис. 3.1, б).

Квантування за часом полягає у фіксації значень безперервного сигналу в рівновіддалені один від одного дискретні моменти часу. При цьому квантований сигнал може мати східчасту форму (рис. 3.1, в) або являти собою послідовність імпульсів (рис. 3.1, г). Суміжні моменти відрізняються один від одного на постійну величину  $\Delta t = T$ , яка називається інтервалом дискретності або періодом повтору.

Під час сумісного квантування за рівнем і за часом фіксуються дискретні за рівнем значення, найближчі до значень безперервного сигналу в дискретні моменти часу (рис. 3.1, д, е).

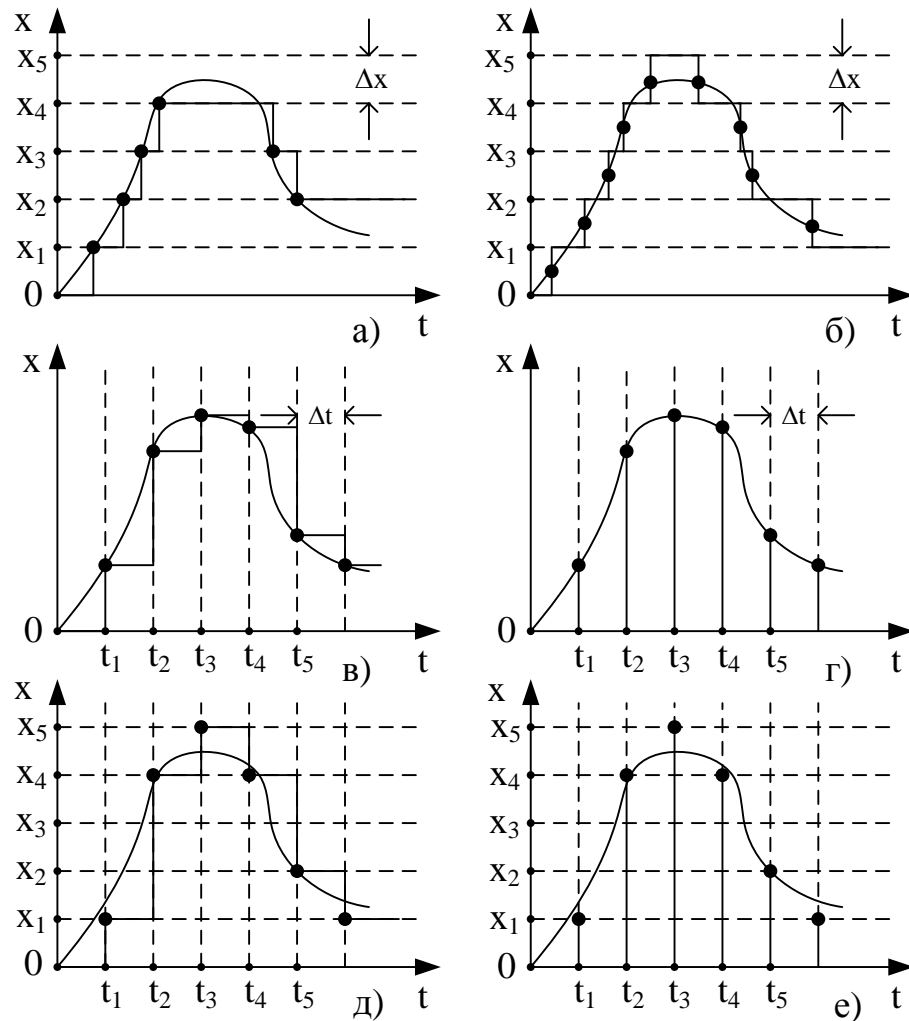


Рис. 1.1. Види квантування сигналів: за рівнем (а; б), за часом (в; г), за рівнем і за часом (д; е)

Залежно від виду квантування, всі дискретні системи можна розділити на три класи:

- релейні (квантування за рівнем);
- імпульсні (квантування за часом);
- цифрові (релейно-імпульсні) (квантуванням і за рівнем, і за часом).

Квантування за рівнем у релейних системах відбувається за допомогою спеціальних елементів – квантувачів. Найпростішим квантувачем є дво- та трипозиційні реле. Вони квантують безперервний сигнал відповідно за двома і трьома рівнями.

Операція відновлення аналогового сигналу з дискретного зворотна операції дискретизації і представляє, по суті, інтерполяцію даних (знаходження аналітичної залежності для дискретних значень сигналу).

Дискретизація сигналів може приводити до певної втрати інформації про поведінку сигналів в проміжках між вибірками. Проте існують умови, визначені теоремою Котельникова-Шенона, згідно з якими аналоговий сигнал з обмеженим частотним спектром може бути без втрат інформації перетворений в дискретний сигнал, і потім абсолютно точно відновлений за своїми дискретними значеннями. Теоремою Котельникова-Шенона встановлюється, що коли спектр сигналу обмежений частотою  $f$ , то після дискретизації сигналу з частотою не менш ніж  $2f$  можна відновити вихідний безперервний сигнал за отриманим цифровим сигналом абсолютно точно.

На практиці ця теорема має велике значення. Відомо, що діапазон звукових сигналів, що сприймаються людиною, не перевищує 20 кГц. Отже, при дискретизації записаних звукових сигналів з частотою не менше 40 кГц ми можемо точно відновити вихідний аналоговий сигнал за його цифровими вибірками, що і відбувається в програвачах компакт-дисків для відновлення звуку. Частота дискретизації звукового сигналу при записі на компакт-диск складає 44100 Гц.

Для виконання операції дискретизації у програмі MatLab використовується блок Zero-Order Hold (екстраполятор нульового порядку), що розміщений у бібліотеці Discrete. Його входним параметром Sample time є величина кроку дискретизації у секундах. Блок Zero-Order Hold фіксує значення вхідного сигналу на початку інтервалу дискретизації і підтримує на виході це значення до закінчення інтервалу дискретизації. Потім вихідний сигнал миттєво змінюється до величини вхідного сигналу на наступному кроці дискретизації. Приклад застосування блока Zero-Order Hold для дискретизації синусоїдального сигналу наведено на рис. 1.2.

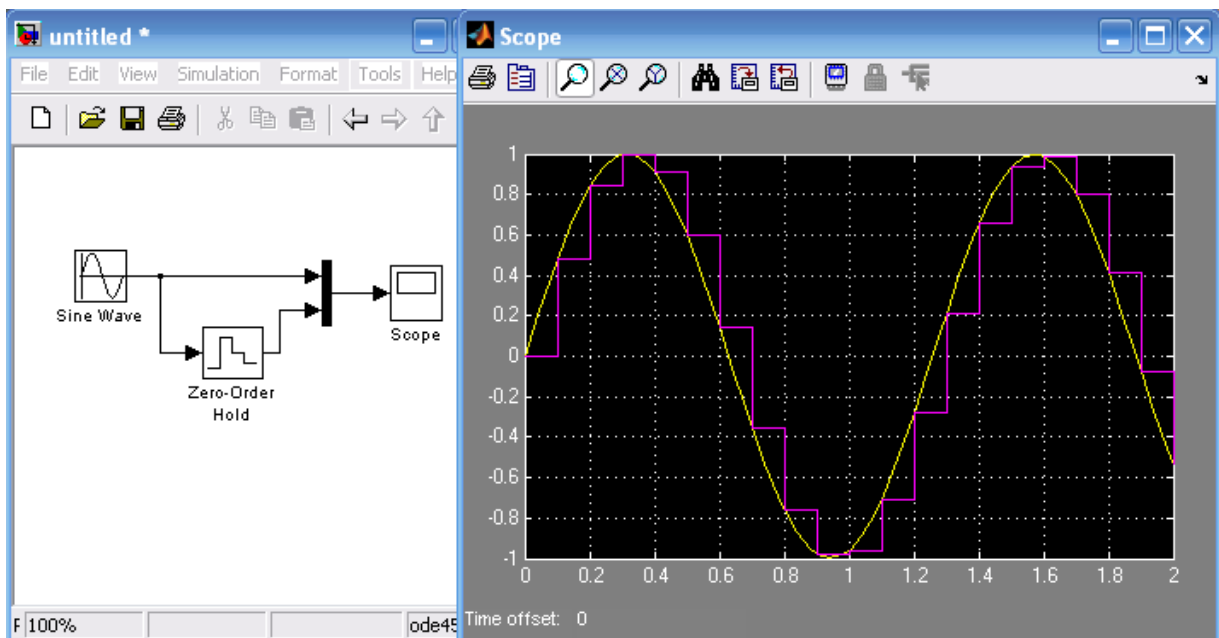


Рис. 1.2. Приклад дискретизації синусоїдального сигналу

Для виконання операції квантування за рівнем у програмі MatLab використовується блок Quantizer, що знаходиться у бібліотеці Signal Processing Blockset\Quantizers. Блок Quantizer виконує квантування з рівномірним кроком Quantization interval вхідного сигналу. Приклад застосування блока Quantizer для квантування за рівнем синусоїдального сигналу наведено на рис. 3.3.



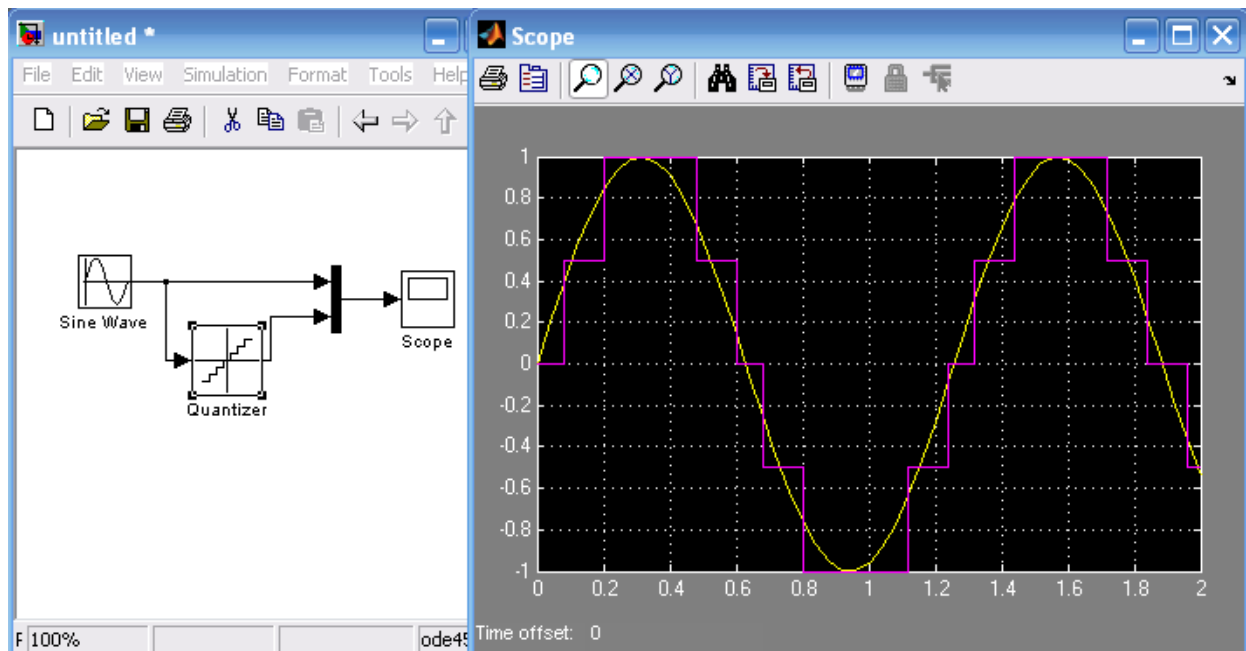


Рис. 1.3. Приклад квантування за рівнем синусоїдального сигналу

Моделювання пристрою виробки і збереження виконується із використанням блоку Sample and Hold. Модельна схема, що показує методику використання блоку Sample and Hold наведена на рис. 1.4.

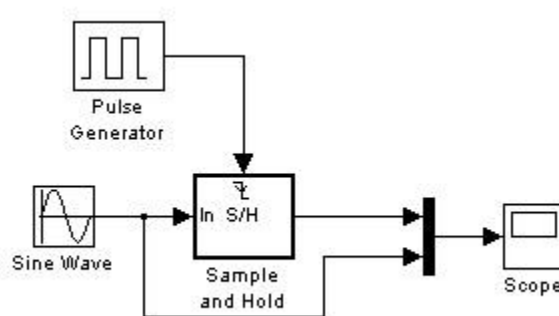


Рис. 1.4. Квантування сигналу з довільним періодом

### Порядок виконання роботи

**1. Дослідити методику квантування неперервних сигналів за допомогою екстраполятора нульового порядку**

Для дослідження використати модельну схему з рис. 1.2. Симуляцію провести для синусоїдальних сигналів з частотами, що визначаються формулою (1.1).

$$\begin{aligned}\omega_c &= [0,01; 0,1; 0,3; 0,5; 0,7; 1,2; 2,5] \cdot \omega_{\kappa\theta}; \\ \omega_{\kappa\theta} &= 100 + N.\end{aligned}\tag{1.1}$$

де  $N$  – номер студента за списком групи.

## **2. Дослідити методику квантування неперервних сигналів за рівнем**

Для дослідження використати модельну схему з рис. 1.3. Симуляцію провести для синусоїдальних сигналів з частотами, що визначаються формулою (1.1).

## **3. Дослідити методику квантування неперервних сигналів з використанням пристрою вибірки і збереження**

Для дослідження використати модельну схему з рис. 1.4. Симуляцію провести для синусоїдальних сигналів з частотами, що визначаються формулою (1.1). Для випадку  $\omega_c = 0,1\omega_{\kappa\theta}$  провести моделювання з трьома періодами квантування  $T_{\kappa\theta} = [0,01; 0,5; 2]\omega_c$ .

## **4. Отримані результати представити у звіті у вигляді графіків, зробити висновки щодо впливу методик квантування на результат дискретизації сигналу.**

## ПРАКТИЧНА РОБОТА №2

### ВІВЧЕННЯ МЕТОДИК ЗНАХОДЖЕННЯ ДИСКРЕТНИХ ЗОБРАЖЕНЬ І ОРИГІНАЛІВ НЕПЕРЕРВНИХ СИСТЕМ

**Метою роботи** дослідження особливостей застосування апарату з-перетворення для синтезу дискретних систем.

#### Теоретичні відомості

Узагальнену дискретну функцію  $f[nT_0]$  можна аналітично записати у вигляді ряду:

$$f[nT_0] = \sum_{n=0}^{\infty} f(t) \delta(t - nT_0), \quad (2.1)$$

де  $f(t)$  – породжувальна безперервна функція;

$\delta(t - nT_0)$  – зміщена на час  $nT_0$  дельта-функція.

Перетворення Лапласа від функції (2.1) має вигляд:

$$F^*(s) = \int_0^{\infty} f(nT_0) e^{-st} dt = \sum_{n=0}^{\infty} f[nT_0] e^{-nT_0 s}. \quad (2.2)$$

Це перетворення називається *дискретним перетворенням Лапласа*. У символічній формі його записують так:

$$F^*(s) = D\{f[nT_0]\}. \quad (2.3)$$

Якщо аргументом безперервної функції є відносний час  $t/T_0$ , то формула дискретного перетворення матиме вигляд:

$$F^*(q) = D\{f[n]\} = \sum_{n=0}^{\infty} f[n] e^{-qn}, \quad (2.4)$$

де  $q = sT_0$  – комплексне число, яке називається параметром дискретного перетворення Лапласа.

Зображення  $F^*(s)$  і  $F^*(q)$  є трансцендентними функціями від  $s$  і  $q$ , що робить неможливим застосування звичайних методів аналізу в площині  $s$  або  $q$  для дослідження імпульсних систем. Більш прийнятним є  $z$ -перетворення. Формула  $z$ -перетворення випливає з формули (2.4), якщо виконати підстановку  $e^q = z$ . Вона має вигляд:

$$F(z) = Z\{f[n]\} = \sum_{n=0}^{\infty} f[n] z^{-n}. \quad (2.5)$$

$Z$ -перетворення деяких функцій подано в таблиці 8.1.

Таблиця 8.1.  $Z$ -перетворення основних функцій

Безперервна функція $f(t)$	Решітчаста функція $f[n]$	Перетворення Лапласа $F(s)$	$Z$ -перетворення $F(z)$
$1(t)$	$1[n]$	$1/s$	$z/(z-1)$
$t$	$nT_0$	$1/s^2$	$T_0 z / (z-1)^2$
$t^2$	$(nT_0)^2$	$2/s^3$	$T_0^2 z(z+1) / (z-1)^3$
$t^3$	$(nT_0)^3$	$6/s^4$	$T_0^3 z(z^2+4z+1) / (z-1)^4$
$e^{-\alpha t}$	$e^{-\alpha n T_0}$	$1/(s + \alpha)$	$z/(z-d), d = e^{-\alpha T_0}$
$1 - e^{-\alpha t}$	$1 - e^{-\alpha n T_0}$	$\alpha/[s(s+\alpha)]$	$(1-d)z / [(z-1)(z-d)], d = e^{-\alpha T_0}$
$\sin \beta t$	$\sin \beta n T_0$	$\beta/(s^2 + \beta^2)$	$z \cdot \sin \beta T_0 / (z^2 - 2z \cdot \cos \beta T_0 + 1)$

За допомогою  $z$ -перетворення можна розв'язувати різницеві рівняння, причому послідовність дій аналогічна послідовності розв'язування диференціальних рівнянь при використанні перетворення Лапласа безперервних функцій. Спочатку треба перейти від різницевого рівняння відносно оригіналів до алгебраїчних рівнянь відносно їх  $z$ -зображень, потім визначити  $z$ -зображення шуканої функції, розв'язавши знайдене алгебраїчне рівняння, і нарешті перейти від  $z$ -зображення до оригіналу – шуканої решітчастої функції.

Для переходу до оригіналу зображення доцільно подати у вигляді простих дробів, для яких оригінали можна знайти у таблицях z-перетворень функцій часу, і знайти оригінал  $y[n]$  як суму оригіналів, що відповідають простим дробам.

Значення функції  $y[n]$  у дискретних точках можна обчислити без знаходження аналітичного виразу для неї, якщо розкласти зображення  $Y(z)$  в ряд Лорана

$$Y(z) = c_0 + c_1 z^{-1} + c_2 z^{-2} + c_3 z^{-3} + \dots \quad (2.6)$$

За формулою (2.6) отримаємо:

$$Y(z) = \sum_{n=0}^{\infty} y[n] z^{-n} = y[0] + y[1] z^{-1} + y[2] z^{-2} + \dots \quad (2.7)$$

Із (2.6) і (2.7) випливає, що  $y[0] = c_0$ ,  $y[1] = c_1$ ,  $y[2] = c_2$  і т.д.

Найзручнішим способом розкладання в ряд Лорана дрібно-раціональних функцій є ділення чисельника на знаменник.

### **Порядок виконання роботи**

#### **1. Аналітичним шляхом здійснити z-перетворення передаточної функції неперервної системи**

Передаточну функцію системи управління задати рівнянням

$$W(s) = \frac{N}{\left(\frac{N}{20} p + 1\right) \left(\frac{N}{15} p + 1\right)}, \quad (2.8)$$

де  $N$  – номер студента у списку групи.

Період квантування прийняти  $T = N/30$ .

#### **2. Знайти z-перетворення передаточної функції неперервної системи, заданої рівнянням (2.8) із застосуванням Matlab**

Для цього використати команду

`sysd=c2d(Ws, Ts, 'type'),`

де  $W_s$  – передаточна функція неперервної системи;  $T_s$  – період квантування; 'type' – тип перетворення, може приймати значення:

- 'zoh' – екстраполятор нульового порядку;
- 'foh' – екстраполятор першого порядку;
- 'impulse' – імпульсна функція;
- 'tustin' – перетворення Тастіна.

Отримати дискретні передаточні функції для всіх видів перетворення.

**3. Здійснити порівняльний аналіз отриманих дискретних систем графічно.**

**4. Провести аналіз впливу періоду дискретизації на адекватність отриманої дискретної передаточної функції.**

Для цього здійснити синтез дискретних передаточних функцій за методом, що показав найкращі результати в пункті 3. Синтез провести для періодів квантування  $T_s' = [0,1T_s; 0,5T_s; T_s; 2T_s; 5T_s]$ . Здійснити графічне порівняння отриманих результатів.

**5. Аналітичним шляхом здійснити зворотне z-перетворення двох передаточних функцій дискретних систем з пп. 2, 4.**

**6. Знайти зворотне z-перетворення двох передаточних функцій дискретних систем з пп. 2, 4 з використанням Matlab**

Для цього використати команду

$$SYSC = d2c(SYSD, METHOD)$$

де SYSD – передаточна функція дискретної системи; METHOD – метод перетворення, може приймати значення:

- 'zoh' – екстраполятор нульового порядку;
- 'foh' – екстраполятор першого порядку;
- 'matched' – метод узгоджених нулів і полюсів;
- 'tustin' – перетворення Тастіна.

7. Здійснити порівняльний аналіз результатів зворотних z-перетворень з пп. 5, 6.

## ПРАКТИЧНА РОБОТА №3

### ПОБУДОВА ТА ПРИНЦИПИ АНАЛІЗУ ЦИФРОВИХ ФІЛЬТРІВ

**Метою роботи** є набуття навичок в проектуванні і аналізі дискретних фільтрів.

#### Теоретичні відомості

В Matlab розрахунок коефіцієнтів передаточної функції цифрового фільтра при заданих вимогах до частотної характеристики може бути проведений з використанням тих же самих функцій, які застосовуються для розрахунку аналогових фільтрів. Відмінність полягає в тому, що строковий параметр 's' вводити не потрібно. Крім того, всі частоти ( $\omega_0$ ,  $\omega_n$ ,  $\omega_p$ ,  $\omega_s$ ) вказуються в частках від частоти Найквіста ( $F_s / 2$ ), тобто лежать в інтервалі від 0 до 1. Є і спеціальний пакет програм, де зібрана велика кількість корисних для проектувальника функцій. Він носить назву *fdatool (filter design & analysis tool)*. Цей пакет містить зручний користувальницький інтерфейс і дозволяє проводити розрахунок передаточної функції рекурсивних та нерекурсивних фільтрів різнорізними методами, переглядати характеристики фільтра, аналізувати зміну характеристик при квантуванні коефіцієнтів фільтра, відліків вхідного сигналу і результатів проміжних обчислень.

Виклик пакета здійснюється шляхом введення його імені в командному вікні MatLab: `fdatool`. Після введення імені з клавіатури слід натиснути клавішу

<Enter>. На екрані монітора з'явиться вікно програми *fdatool*. Крім основного меню і панелі інструментів тут міститься поточна інформація по структурі фільтра, його порядку, стійкості (*Current Filter Information*); графік допусків для АЧХ (у дБ) (*Filter Specifications*), а також вкладка *Design Filter* для завдання типу фільтра, його класу, методу синтезу, порядку фільтра, частоти дискретизації, граничних частот смуг пропускання і затримки, а також допустимих згасань в цих смугах. Крім того, є вкладка для дослідження ефектів квантування (*Set Quantization Parameters*).

### **Порядок виконання роботи**

#### **1. Здійснити синтез цифрового фільтра за допомогою утиліти *fdatool*.**

Тип фільтра, параметри частот полос пропускання та затримки, а також період дискретизації фільтра задаються викладачем.

#### **2. Здійснити експорт розробленого цифрового фільтра в Simulink.**

#### **3. Провести моделювання роботи розробленого цифрового фільтра в Simulink.**

Моделювання здійснити для наступних сигналів:

- Сума трьох синусоїд, причому частота однієї синусоїди повинна знаходитися в полосі затримки, одна в полосі пропускання і одна в перехідній ділянці.
- Білий шум.
- Синусоїдальний сигнал з наростаючою частотою (*Chirp*).

#### **4. Провести спектральний аналіз отриманих результатів моделювання.**

Для спектрального аналізу скористатись функцією



`pwelch(X)` .

Дана функція розраховує спектральну щільність сигналу  $X$ .

**5. Представити результати моделювання графічно і здійснити їх порівняльний аналіз.**

## **ПРАКТИЧНА РОБОТА №4**

### **ДОСЛІДЖЕННЯ ДИСКРЕТНИХ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ З РЕЛЕЙНИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ**

**Метою роботи** є закріплення студентами навичок побудови та дослідження дискретним систем управління з релейними елементами.

#### **Теоретичні відомості**

В схемах автоматичного та програмного управління різними виробничими процесами, в пристроях сигналізації та блокування в якості елементів дискретної дії з двома станами входу та виходу широко використовують електромагнітні реле. В залежності від поєднання сигналів, які надходять від вхідних пристроїв (пускові кнопки, кінцеві та прохідні вимикачі), такі схеми дозволяють отримувати необхідну послідовність вмикання виконуючих пристроїв (електроприводів, тягових електромагнітів, електропневматичних і електрогідравлічних клапанів та ін.). По суті, такі схеми втілюють логічні операції тієї чи іншої складності, які складаються з елементарних логічних операцій  $I$ ,  $АБО$ ,  $НЕ$ . При цьому проходження по обмотці реле струму, достатнього для спрацьовування, приймається за “1” на вході реле, відсутність струму в обмотці чи його зменшення до струму відпускання – за “0” на вході.

Замкнений стан контактів приймається за “1”, розімкнений – за “0”, як на виході реле, так і на його вході, якщо обмотка вмикається контактами попереднього реле.

Логічні операції за допомогою реле можливо здійснити або шляхом комбінації вмикання декількох обмоток в багатообмоточних реле, або шляхом комбінації вмикання контактів реле.

Перший спосіб вимагає наявності у реле стількох обмоток, скільки вхідних величин має логічний зв'язок. В цьому випадку струми та кількість витків окремих обмоток повинні бути розраховані так, щоб намагнічувальна сила (НС) спрацьовування чи відпускання реле досягалася тільки при потрібній логічній комбінації вхідних сигналів (струмів) в окремих обмотках реле. Найбільш придатним для цієї мети є поляризоване реле з декількома обмотками.

Наприклад, для здійснення операції  $I$  на  $n$  входів реле потрібно мати  $n$  обмоток, кожна з яких повинна створювати намагнічувальну силу, яка дорівнює  $1/n$  НС спрацьовування. В цьому випадку реле спрацьовує тільки при наявності всіх  $n$  сигналів на вході. При цьому, для відпускання реле при відсутності хоча б одного сигналу необхідно, щоб НС  $n-1$  обмоток була менша НС відпускання. Звідси очевидний основний недолік цього способу, який полягає в необхідності особливої стабільності струмів в обмотках.

Іншою сферою застосування релейних елементів є дискретні системи керування, які не потребують високої точності стабілізації вихідної величини і допускають її пульсації в процесі роботи. Прикладами таких систем є водогрійні котли, системи кондиціонування та ін.

### **Порядок виконання роботи**

**1. Для заданого об'єкта управління побудувати схему системи управління з одиничним зворотнім зв'язком і релейним елементом в якості регулюючого пристрою.**

При побудові схеми прийняти наступні параметри:

- Період дискретизації  $T=1$ .
- Співвідношення постійних часу об'єкту керування

$$\frac{T}{\tau} = \frac{N}{20}, \quad (4.1)$$

де  $N$  – порядковий номер студента в групі.

- Передаточна функція об'єкту керування:

$$H_{o,y} = \frac{(1 - e^{-T*\tau}) * z}{(z - e^{-T*\tau}) * (z - 1)}. \quad (4.2)$$

2. Дослідити вплив полярності релейного пристрою на вихідні характеристики системи.
3. Дослідити вплив значення гістерезису релейного пристрою на вихідні характеристики системи.
4. Базуючись на результатах пп. 2 та 3, здійснити налаштування релейного елемента так, щоб коливання вихідного сигналу не перевищували 5%.
5. Результати моделювання системи в кожному з пунктів привести у звіті в графічній формі.

## ПРАКТИЧНА РОБОТА №5

### СИНТЕЗ ЦИФРОВОГО КЕРУЮЧОГО ПРИСТРОЮ З КОРЕКЦІЄЮ ПО ФАЗІ

**Метою роботи** є вивчення студентами методики синтезу корегуючих пристроїв з корекцією по фазі.

## Теоретичні відомості

Часто при розробці систем управління виникає необхідність у введенні додаткових пристроїв, що мають покращити робочі характеристики системи. Такі пристрої називаються коригуючими. Існує велика кількість методик вибору та розрахунку коригуючих пристроїв.

При корекції з відставанням за фазою контролер описується передавальною функцією першого порядку:

$$Wk(s) = \frac{1 + s / \omega_0}{1 + s / \omega_p}. \quad (5.1)$$

Вплив такого контролера можна проілюструвати за допомогою діаграми Бode (рис. 5.1, а). Значення нуля і полюса контролера  $\omega_0$  і  $\omega_p$  вибрані достатньо малими порівняно з частотою, на якій  $|W_o(j\omega)W_o3(j\omega)|=1$ . Завдяки цьому відставання за фазою, що вноситься контролером, матиме незначний вплив на вигляд діаграми Найквіста в околі точки -1. Підсилення системи в області високих частот зменшиться в  $\omega_0 / \omega_p$  разів, що приведе до збільшення запасу стійкості системи за фазою.

При синтезі контролера з випередженням за фазою його передаточна функція теж описується формулою (5.1), проте на відміну від попереднього, для якого необхідно забезпечити співвідношення частот  $\omega_0 > \omega_p$ , тут це співвідношення протилежного характеру, а саме:  $\omega_0 < \omega_p$ .

При корекції з випередженням за фазою на запаси стійкості замкненої системи впливають як збільшення коефіцієнта підсилення, так і додатний зсув за фазою, який вноситься контролером (рис. 5.1, б). Нуль і полюс контролера розташовані в околі точки 0 дБ, що відповідає одиничному коефіцієнту підсилення розімкненої системи.

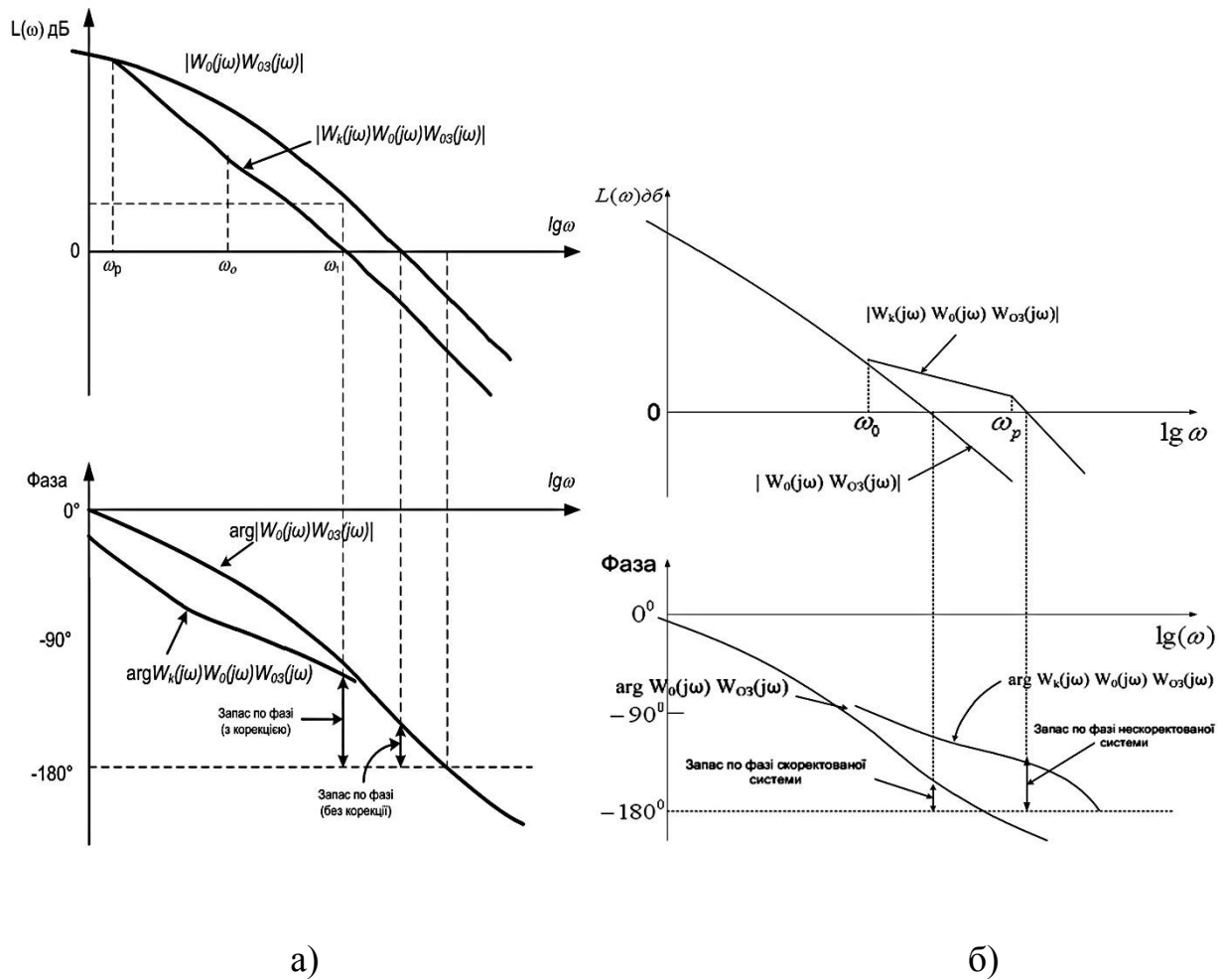


Рис. 5.1. Синтез контролера з відставанням (а)  
та випередженням (б) за фазою

На рис. 5.2 наведено перехідні функції системи для різних способів корекції, які отримано моделюванням. Для порівняння наведено перехідні функції систем з контролером на основі зміни коефіцієнта підсилення і контролера на основі корекції з відставанням за фазою. Слід звернути увагу на підвищення швидкодії системи, в якій використовується контролер з випередженням за фазою, що стало можливим завдяки збільшенню коефіцієнта підсилення на високих частотах.

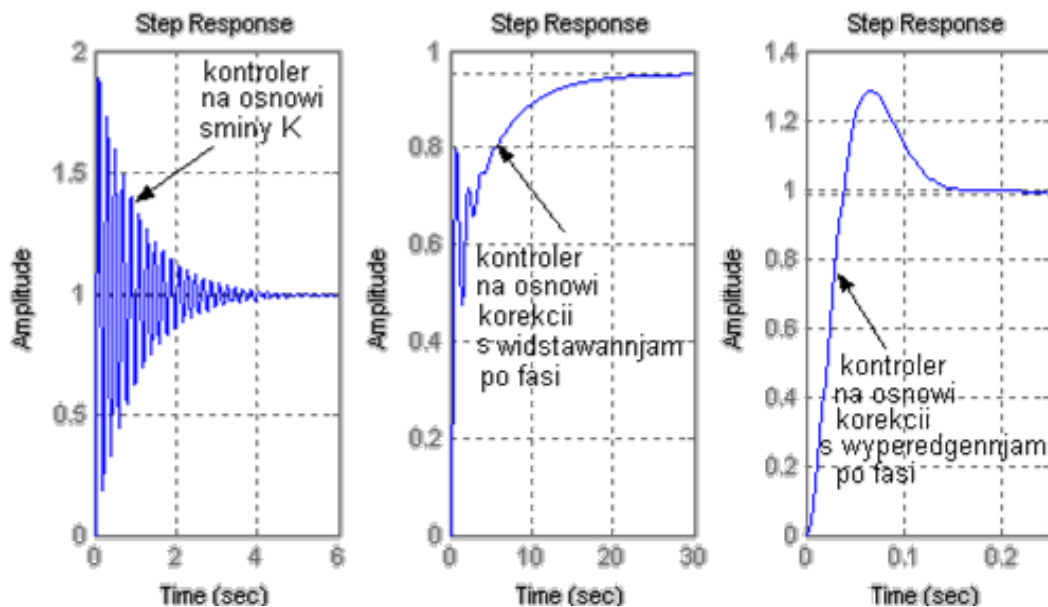


Рис. 5.2. Перехідні функції для аналізованих процесів

### Порядок виконання роботи

1. Для заданого об'єкта управління здійснити синтез замкненої дискретної системи керування з корегуючим пристроєм із запізненням по фазі.

Передаточну функцію системи управління задати рівнянням

$$W(s) = \frac{1,8N}{\left(\frac{N}{8}p + 1\right)\left(\frac{N}{7}p + 1\right)}, \quad (5.2)$$

де  $N$  – номер студента у списку групи.

Період квантування прийняти  $T = N/50$ .

В процесі синтезу отримати дискретні передаточні функції (ПФ) розімкненої та замкненої нескоригованих систем, ПФ коригуючого пристрою та ПФ розімкненої та замкненої скоригованих систем.

2. Для заданого об'єкта управління здійснити синтез замкненої дискретної системи керування з корегуючим пристроєм із випередженням по фазі.

Процес синтезу супроводити графічними ілюстраціями перехідних процесів розробленої системи.

**3. Здійснити порівняльне дослідження розроблених в пп. 1, 2 ДСАУ у часі, а саме навести їх перехідні процеси та порівняльну таблицю показників якості перехідних процесів.**

**4. Привести результати частотних досліджень синтезованих ДСАУ, а саме частотні характеристики, оцінку їх стійкості, карту нулів і полюсів.**

**5. На основі отриманих даних зробити висновки, щодо оптимального методу синтезу корегувальних пристроїв для даної системи.**

## **ПРАКТИЧНА РОБОТА №6**

### **СИНТЕЗ ЦИФРОВИХ ПІ ТА ПІД - РЕГУЛЯТОРІВ З КОРЕКЦІЄЮ ПОЛЮСІВ ОБ'ЄКТУ КЕРУВАННЯ**

**Метою роботи** є вивчення студентами методики побудови систем керування з ПІ та ПІД – регуляторами, а також засвоєння навичок синтезу коригуючих пристроїв з корекцією полюсів об'єкту керування.

#### **Теоретичні відомості**

Одним із найпоширеніших законів керування автоматичними системами на теперішній час є пропорційно-інтегрально-диференціальний (ПІД) закон. Створений на його основі, ПІД-регулятор використовується в системах автоматичного управління для формування керуючого сигналу з метою отримання необхідних точності і якості перехідного процесу. ПІД-регулятор формує керуючий сигнал, який є сумою трьох доданків, перший з яких

пропорційний до різниці вхідного сигналу і сигналу зворотного зв'язку (сигнал неузгодженості), другий – до інтегралу сигналу неузгодженості, третій – до похідної сигналу неузгодженості.

Пропорційна складова  $P(t)$  виробляє вихідний сигнал, який протидіє відхиленню регульованої величини  $\varepsilon(p)$  від заданого значення  $x_{ex}(p)$ , спостережуваному в даний момент часу. Він тим більше, чим більше це відхилення. При використанні тільки пропорційного регулятора значення регульованої величини ніколи не стабілізується на заданому значенні. Існує так звана статична помилка  $\Delta_{ст}$ , яка дорівнює такому відхиленню регульованої величини, яке забезпечує вихідний сигнал, стабілізуючий вихідну величину саме на цьому значенні. Наприклад, у регуляторі температури вихідний сигнал (потужність нагрівача) поступово зменшується при наближенні до заданої температури, і система стабілізується при потужності рівній тепловим втратам. Температура не може досягти заданого значення, так як в цьому випадку потужність нагрівача буде дорівнювати нулю, і він почне остигати.

Чим більше коефіцієнт пропорційності  $k_P$  між вхідним і вихідним сигналом (коефіцієнт підсилення), тим менше статична помилка, проте при занадто великому коефіцієнті посилення, за наявності затримок в системі, можуть початися автоколивання, а при подальшому збільшенні коефіцієнта система може втратити стійкість.

Інтегральна складова  $I(t)$  пропорційна інтегралу від відхилення регульованої величини. Її використовують для усунення статичної помилки. Якщо система не зазнає зовнішніх збурень, то через деякий час регульована величина стабілізується на заданому значенні, сигнал пропорційної складової дорівнюватиме нулю, а вихідний сигнал буде повністю забезпечувати інтегральна складова. Тим не менш, інтегральна складова також може призводити до автоколивань.

Диференціальна складова  $D(t)$  пропорційна темпу зміни відхилення регульованої величини і призначена для протидії відхиленням від цільового



значення, які прогнозуються в майбутньому. Відхилення можуть бути викликані зовнішніми збуреннями або запізнюванням впливу регулятора на систему.

В загальному випадку ПІД-закон (рис. 6.1) регулювання можна записати рівнянням (6.1).

$$u(t) = P(t) + I(t) + D(t) = k_P \varepsilon(t) + k_I \int_0^t \varepsilon(t) + k_D \frac{d\varepsilon(t)}{dt} \quad (6.1)$$

Той самий принцип дії ПІД-регулятора може бути використан і при цифровому керуванні. В цифрових система пропорційне управління реалізується як і раніше за допомогою постійного коефіцієнта  $K_p$ . Інтегрування і диференціювання у цифровій формі може бути виконано різними методами. Наприклад, операція інтегрування  $K_I/s$  може бути апроксимована в z-формі числовим інтегруванням по методу трапецій  $K_I T(z+1)/[2(z-1)]$ . Похідна  $e(t)$  в момент часу  $t = T$  апроксимується виразом

$$\left. \frac{de(t)}{dt} \right|_{t=T} \cong \frac{e(kT) - e[(k-1)T]}{T}. \quad (6.2)$$

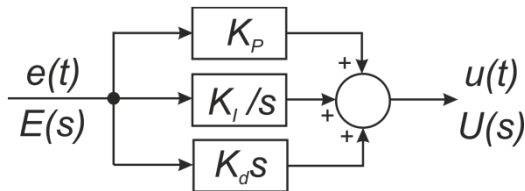


Рис. 6.1. Неперервний ПІД-регулятор

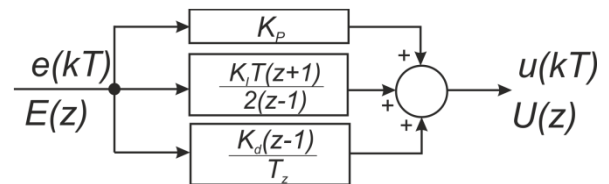


Рис. 6.2. Цифровий ПІД-регулятор

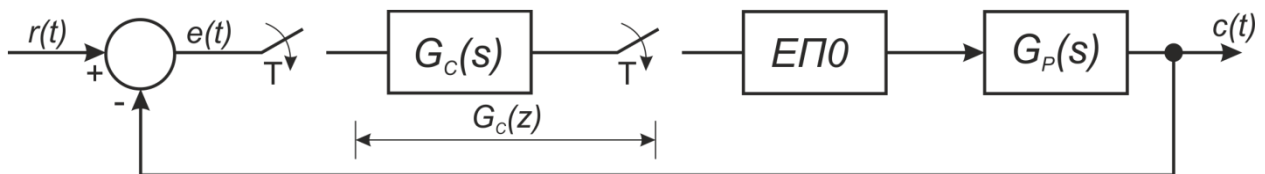


Рис. 6.3. Цифрова система управління з цифровим регулятором

Застосовуючи z-перетворення до обох частин останнього рівняння, отримаємо передаточну функцію цифрового диференціатора

(6.3)

де  $K_d$  - постійна диференціювання.

Повна структурна схема цифрового ПД-регулятора зображена на рис. 6.2.

Синтез ПД-регулятора  $G_c(z)$  (рис. 6.3) полягає в визначенні значень  $K_p$ ,  $K_I$  і  $K_d$  за заданими вимогами до якості системи.

### **Порядок виконання роботи**

**1. Для заданого об'єкта управління здійснити синтез замкненої дискретної системи керування з ПД-регулятором за допомогою методу корекції полюсів об'єкту керування.**

Передаточну функцію системи управління задати рівнянням

$$W(s) = \frac{1,8N}{\left(\frac{N}{8}p+1\right)\left(\frac{N}{7}p+1\right)}, \quad (6.4)$$

де  $N$  – номер студента у списку групи.

Період квантування прийняти  $T=N/50$ .

В процесі синтезу отримати дискретні передаточні функції (ПФ) розімкненої та замкненої нескоригованих систем, ПФ коригуючого пристрою та ПФ розімкненої та замкненої скоригованих систем.

**2. Для заданого об'єкта управління здійснити синтез замкненої дискретної системи керування з ПД-регулятором за допомогою методу корекції полюсів об'єкту керування.**

Процес синтезу супроводити графічними ілюстраціями перехідних процесів розробленої системи.

**3. Здійснити порівняльне дослідження розроблених в пп. 1, 2 ДСАУ у часі, а саме навести їх перехідні процеси та порівняльну таблицю показників якості перехідних процесів.**

**4. Привести результати частотних досліджень синтезованих ДСАУ, а саме частотні характеристики, оцінку їх стійкості, карту нулів і полюсів.**

**5. На основі отриманих даних зробити висновки, щодо оптимального регулятора для даної системи.**

## **ПРАКТИЧНА РОБОТА №7**

### **СТРУКТУРНА ОРГАНІЗАЦІЯ МОДЕЛЕЙ ЦСУ**

**Метою роботи** є надання студентам практичних навичок, щодо вибору апаратної складової ЦСУ на базі мікропроцесорних пристроїв, а також закріплення знань, щодо схемотехніки входів і виходів систем управління, контролерного блоку, інтерфейсів зв'язку та кіл живлення.

### **Теоретичні відомості**

Сучасний стан розвитку цифрових систем призвів до їх інтеграції у більшість сфер життя людини. Великої популярності набувають вбудовані системи, що представляють собою низькорівневі системи автоматики на базі мікроконтролерів або програмованих логічних інтегральних схем (ПЛІС).

В загальному випадку мікроконтролером називається виконана у вигляді мікросхеми спеціалізована мікропроцесорна система, що включає мікропроцесор, блоки пам'яті для збереження коду програм і даних, порти вводу-виводу і блоки зі спеціальними функціями (лічильники, компаратори, АЦП та

інші). По суті, це – однокристальний комп'ютер, здатний виконувати прості завдання. Використання однієї мікросхеми значно знижує розміри, енергоспоживання і вартість пристроїв, побудованих на базі мікроконтролерів.

Зараз великої популярності набувають 32-бітні мікропроцесори архітектури ARM (Advanced RISC Machine — поліпшена RISC машина). Вони широко використовуються в системах автоматики, мобільних пристроях, а також в економічних одноплатних комп'ютерних системах.

Прикладом такої системи є одноплатний комп'ютер Raspberry Pi (рис. 7.1). Характеристики даного цифрового керуючого пристрою наведені в табл. 7.1.



Рис. 7.1. Одноплатний комп'ютер Raspberry Pi

	<b>Model A</b>	<b>Model B</b>
Прогнозна ціна:	US\$25 (GBP £16)	US\$35 (GBP £22)
SoC:	BCM2835	

CPU:	700 MHz ARM	
GPU:	Broadcom VideoCore IV, <sup>[18]</sup> OpenGL ES 2.0, 1080p30 H.264 high-profile decode	
Пам'ять (SDRAM):	256 MB	512 MB
USB 2.0 порти:	1	2 (via integrated hub)
Відео вихід:	Composite, HDMI	
Аудіо вихід:	3.5 mm jack, HDMI	
On-board storage:	SD/MMC/SDIO memory card slot	
On-board network:	None	10/100 wired Ethernet
Low-level peripherals:	Up to 16 GPIO pins, SPI, I <sup>2</sup> C, UART <sup>[18]</sup>	
Real-time clock:	None	
Властивості живлення:	500mA, (2.5 W)	700mA, (3.5 W)
Джерело живлення:	5V micro USB	
Програмне забезпечення:	Debian GNU/Linux, Fedora, Arch Linux <sup>[1]</sup>	

ПО, що підтримується:	Other FLOSS software (Iceweasel, KOffice, Python), RISC OS <sup>[17]</sup> (shared source)
-----------------------	--

### **Порядок виконання роботи**

#### **1. Дослідити структурну організацію лабораторного стенду «Розумний будинок».**

Вивчити загальний устрій стенду, користуючись мережею Internet знайти характеристики датчиків системи «Розумний будинок». Скласти структурну та електричну схеми системи «Розумний будинок» на основі отриманих даних.

#### **2. На основі отриманих з пп. 1 даних охарактеризувати коло задач, що вирішує система.**

Привести контрольовані системою параметри, їх діапазони та шляхи контролю.

#### **3. Привести електричні схеми підключення датчиків та виконуючих пристроїв системи «Розумний будинок».**

#### **4. Скласти алгоритми роботи Raspberry Pi з периферійними пристроями.**

#### **5. Здійснити запуск системи та провести вимірювання робочих показників, результати вимірювань включити у звіт по роботі.**

### **ПРАКТИЧНА РОБОТА №8**

#### **ПОБУДОВА РОЗГАЛУДЖЕНИХ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ НА БАЗІ ГОТОВИХ ПРОМИСЛОВИХ БЛОКІВ АВТОМАТИКИ ТА КОНТРОЛЮ**

**Метою роботи** є надання студентам практичних навичок, щодо вибору апаратної складової ЦСУ на базі програмованих логічних контролерів, здобуття знань, щодо побудови алгоритмів, орієнтованих на структуру контролерів.

### **Теоретичні відомості**

Складність реалізації систем автоматизації об'єктів народного господарства полягає в необхідності низькорівневого програмування мікропроцесорних пристроїв. Даний підхід збільшує час, який необхідно затратити на розробку системи, а також ускладнює розробку інших важливих елементів сучасних систем правління – бази даних та людино-машинного інтерфейсу – адже потребує додаткових програмних робіт.

Одним із методів вирішення даної проблеми є застосування програмованих логічних контролерів (ПЛК). ПЛК (англ. Programmable Logic Controller (PLC)) – це електронний пристрій, який використовується для автоматизації технологічних процесів таких як, управління конвеєрною лінією, насосами на станціях водопостачання, верстатами з числовим програмним керуванням і т.п. По суті, це спеціалізований комп'ютер реального часу, що розроблений на основі мікроконтролера. Основною його відмінністю від комп'ютерів загального призначення є значна кількість пристроїв вводу-виводу для датчиків та виконавчих пристроїв, а також можливість надійної роботи при несприятливих умовах: широкий діапазон температур, висока вологість, сильні електромагнітні завади, вібрації і т.п.

Основним принципом дії ПЛК є циклічна робота, у якій контролер виконує по черзі окремі команди у такій послідовності, в якій вони записані у програмі. На початку кожного циклу програма зчитує "картину" стану входів контролера та записує їх стани (таблиця стану входів процесу). Після виконання всіх команд і визначення (підрахунку) актуального для даної ситуації стану виходів,

контролер вписує стани виходів до пам'яті, що є таблицею стану виходів процесу а операційна система виставляє відповідні сигнали на виходи, котрі управляють виконавчими механізмами. Отже всі сигнальні комбінації подаються у вхідний модуль контролера, а програма відслідковує їх картину та реагує зміною станів виходів на основі закладеного алгоритму.

Цикл роботи ПЛК може виглядати як послідовність кроків:

1. Автодіагностика.
2. Зчитування входів.
3. Виконання програми.
4. Комунікаційні завдання.
5. Встановлення станів виходів.

ПЛК може складатися з:

- модуля центрального процесора (CPU);
- модуля аналогових виходів;
- модуля аналогових входів;
- модуля комунікацій;
- модуля дискретних виходів;
- модуля дискретних входів;
- модуля керування осями;
- модуля лічильників;
- спеціальних модулів;
- блоків пам'яті ROM, PROM, EPROM, EEPROM.

Фірми, що випускають ПЛК, надають зазвичай разом з ними середовище програмування (напр. Simatic Step 7 для контролерів Simatic S7-300) , що



дозволяє писати прикладне програмне забезпечення однією або декількома мовами програмування. Ці мови зазвичай у більшій чи меншій мірі відповідають рекомендаціям норм ІЕС 61131-3:

- LD (*Ladder Diagram*) східчаста діаграма (мова релейних схем) - схема, наближена до класичного технічного електричного креслення;
- FBD (*Function Block Diagram*) - діаграма функційних блоків (графічна мова) - послідовність ліній, що містять функційні блоки;
- ST (*Structured Text*) структурований текст - мова, близька до мови Pascal;
- IL (*Instruction List*) список інструкцій - вид асемблера;
- SFC (*Sequential Function Chart*) послідовний ряд блоків (мова діаграм станів) - послідовність програмових блоків з умовними переходами, використовується для програмування автоматів.

### **Порядок виконання роботи**

#### **1. Здійснити вибір апаратного забезпечення для лабораторного стенду «Розумний будинок» на основі ПЛК.**

Базуючись на здобутих в практичній роботі №7 знаннях, щодо контрольованих параметрів системи «Розумний будинок» обрати апаратне забезпечення на базі програмованих логічних контролерів та модулів розширення для них.

Навести обґрунтування здійсненого вибору. Привести технічні характеристики обраних пристроїв.

#### **2. Навести структурну схему системи «Розумний будинок» з обраними пристроями промислової автоматики.**

- 3. Розробити електричні схеми підключення датчиків системи «Розумний будинок» до обраних пристроїв промислової автоматики.**
- 4. Розробити алгоритми роботи системи «Розумний будинок».**

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Зайцев Г. Ф. Теория автоматического управления и регулирования. – 2-е изд., перераб. и доп. – К.: Вища школа. Головне видавництво, 1989. – 431с., ил.
2. Куо Б. Теория и проектирование цифровых систем управления: Пер. с англ. – М.: Машиностроение, 1986. – 448с.
3. Конспект лекцій
4. Михайлов В. С. Теория управления.– К.: Вища школа. Головне видавництво, 1988. – 312с.
5. Цыпкин Я. З. Основы теории автоматических систем. – М.: Наука, 1977. – 560 с., ил.
6. Дорф Р., Бишоп Р. Современные системы управления. – М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2004. – 832 с.
7. Гудвин Г.К., Гребен С.Ф., Сальгадо М.Э. Проектирование систем управления. – М.: БИНОМ, Лаборатория знаний, 2004. – 911 с.
8. Смит С. Цифровая обработка сигналов. – М.: Додэка-XXI, 2012. – 720 с.
9. Гуляев А. Визуальное моделирование в среде MATLAB: учебный курс – СПб: Питер, 2000.– 432 с.
10. Дэбни Дж. Simulink 4. Секреты мастерства / Дж. Б. Дэбни, Т. Л. Харман; Пер. с англ. М. Л. Симонова. – М.:БИНОМ. Лаборатория знаний, 2003. – 403 с., ил.
11. Смирнова В. И., Разинцев В. И. Проектирование и расчет автоматизированных электроприводов: Учебное пособие. – М.: Машиностроение, 1990. – 368 с., ил.
12. Топчеев Ю. И. Атлас для проектирования систем автоматического регулирования: Учебное пособие для ВТУЗов. – М.: Машиностроение, 1989. – 752 с., ил.
13. Олсон Г., Пиани Д. Цифровые системы автоматизации и управления. – СПб.: Невский Диалект, 2001. – 557с.: ил.

14. Никулин У.А. Основы теории автоматического управления: Частотные методы анализа и синтеза систем. – СПб.: БХВ-Петербург, 2004. – 640 с.
15. Микропроцессорные автоматические системы регулирования. Основы теории и элементы: Учеб. Пособие / В.В. Солодовников, В.Г. Коньков, В.А. Суханов, О.В. Шевяков. Под ред. Солодовникова. — М.: Высшая школа, 1991.
16. Филлипс Ч., Харбор Р. Системы управления с обратной связью. – М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2001. – 616 с.
17. Cassandras C., Lafortune S. Introduction to Discrete Event Systems. – Springer. – 2008, XXIV, 776 p.
18. Landau I.D., Zito G. Digital Control Systems. – 2006, XXIV, 484 p.
19. Franklin G.F., Powell J.D., Workman M.L. Digital Control of Dynamic Systems (3rd Edition). – Addison-Wesley, 1997. – 850 p.