

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ТЕРНОПІЛЬСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ ІМ. ІВАНА ПУЛЮЯ**

І.Р. Козбур, Г.В. Козбур, Р.І. Михайлишин

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

**до виконання лабораторної роботи по дисципліні
«КОМП'ЮТЕРНІ МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ
СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО УПРАВЛІННЯ»
«Проектування регулятора для одномірної лінійної
неперервної системи за допомогою середовища
MATLAB»**

**для студентів 4 курсу спеціальності
6.050201 «Системна інженерія»**

Тернопіль 2019



Навчально-методична

література

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ТЕРНОПІЛЬСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМ. ІВАНА ПУЛЮЯ

Кафедра
Автоматизації технологічних
процесів і виробництв

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до виконання лабораторної роботи по дисципліні
«КОМП'ЮТЕРНІ МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМ
АВТОМАТИЧНОГО УПРАВЛІННЯ»
«Проектування регулятора для одномірної лінійної неперервної системи
за допомогою середовища MATLAB»

для студентів 4 курсу спеціальності
6.050201 «Системна інженерія»

Тернопіль - ТНТУ – 2019

Методичні вказівки до виконання лабораторної роботи «Проектування регулятора для одномірної лінійної неперервної системи за допомогою середовища МАТЛАВ», по курсу «Комп'ютерні методи дослідження систем автоматичного управління», для студентів 4 курсу спеціальності 6.050201 «Системна інженерія» / Авт.: Козбур І.Р., Козбур Г.В. Михайлишин Р.І., – Тернопіль: ТНТУ, каф. АВ, 2019. - с. 24

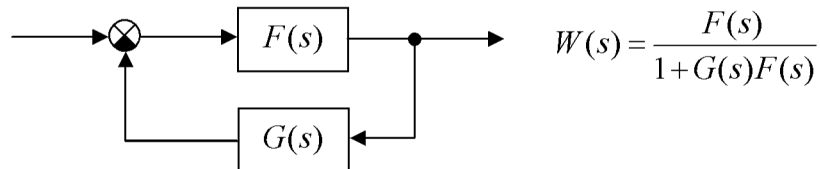
Укладачі: ст. викл. каф. АВ Козбур І.Р., ст. викл. каф. КН Козбур Г.В., ст. викл. каф. АВ, к.т.н. Михайлишин Р.І.

Рекомендовано кафедрою «Автоматизації технологічних процесів і виробництв», протокол № 10 від «5» лютого 2019 р.

Рекомендовано науково-методичною радою ФПТ, протокол № 6 від «26» березня 2019 р.

ЗМІСТ

ЗМІСТ	4
Проектування регулятора для одномірної лінійної неперервної системи за допомогою середовища MATLAB.....	5
Мета роботи	5
Завдання роботи.....	5
Проектування регулятора для лінійної системи (короткі теоретичні відомості)	5
Моделі з'єднань систем.....	5
Кореневий годограф	7
Синтез за допомогою ЛАФЧХ	8
Точність в установленому (статичному) режимі.....	10
Найпростіші типи регуляторів	11
Оформлення звіту	12
Опис системи	12
Інструкція з виконання роботи.....	13
Таблиця коефіцієнтів (варіанти завдань).....	16
Контрольні питання до захисту.....	17
Приклад виконання звіту по лабораторній роботі	18
Проектування регулятора для лінійної системи.....	18



```
>> w = feedback(f, g)
```

```
Transfer function:
```

$$2s + 1$$

```
-----
```

$$2s^2 + 3s + 2$$

Можна обчислити цю передавальну функцію й так:

```
>> w = f / (1 + g*f)
```

```
Transfer function:
```

$$2s^2 + 3s + 1$$

```
-----
```

$$2s^3 + 5s^2 + 5s + 2$$

Цей результат може здатися несподіваним. Справа в тому, що обидві передавальні функції мають перший порядок, тобто, описуються диференціальним рівнянням (ДУ) першого порядку. Тому вся система повинні описуватися другого порядку, а ми одержали третій. Щоб розібратися в цьому, перетворимо модель до форми « нулі-полюси»:

```
>> w_zpk = zpk(w)
```

```
Zero/pole/gain:
```

$$(s+1) (s+0.5)$$

```
-----
```

$$(s+1) (s^2 + 1.5s + 1)$$

Видне, що чисельник і знаменник передавальної функції містять загальний множник $s+1$, який можна скоротити, і залишається система другого порядку. Для цього треба побудувати *мінімальну реалізацію*, скоротивши загальні множники:

```
>> w = minreal(w)
```

```
Transfer function:
```

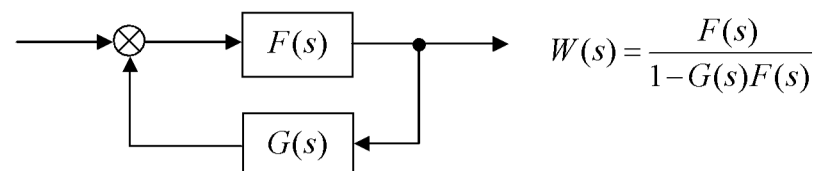
$$s + 0.5$$

```
-----
```

$$s^2 + 1.5s + 1$$

Ця передавальна функція збігається з тією, що видає функція **feedback**.

- контур з позитивним зворотним зв'язком



```
>> w = feedback(f, -g)
```

```
або
```

```
>> w = feedback(f, g, 1)
```

```
або
```

```
>> w = minreal(f/(1 - g*f))
```

Transfer function:

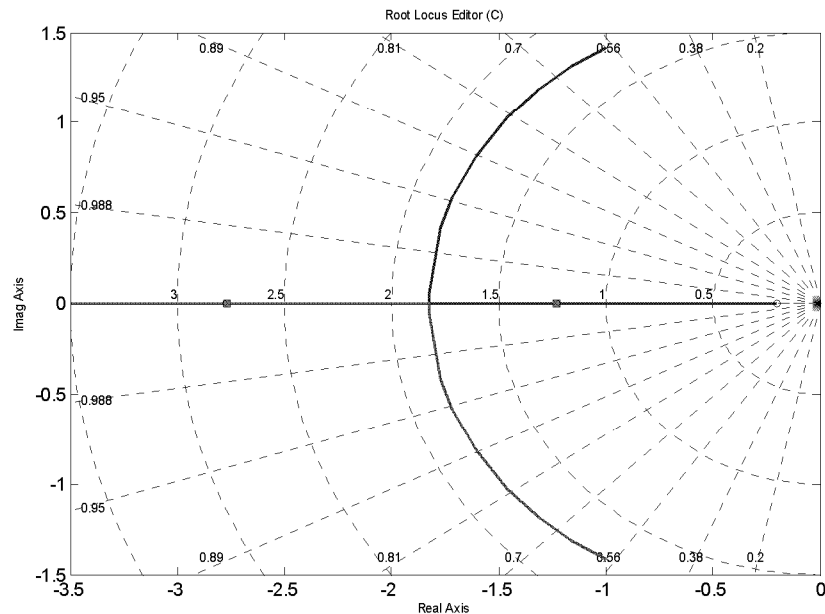
$$\frac{2s + 1}{2s^2 + 3s}$$

Кореневий годограф

Багато важливих властивостей системи (наприклад, швидкодія, перерегулювання) визначаються розташуванням корінь характеристичного рівняння на комплексній площині.

Найпростіший спосіб корекції системи – застосувати П-Регулятор (підсилювач із коефіцієнтом k), який змінює коефіцієнт підсилення розімкнутої системи й розташування цього корінь. При зміні k від 0 до ∞ корені описувало криві, які називаються *кореневим годографом*¹.

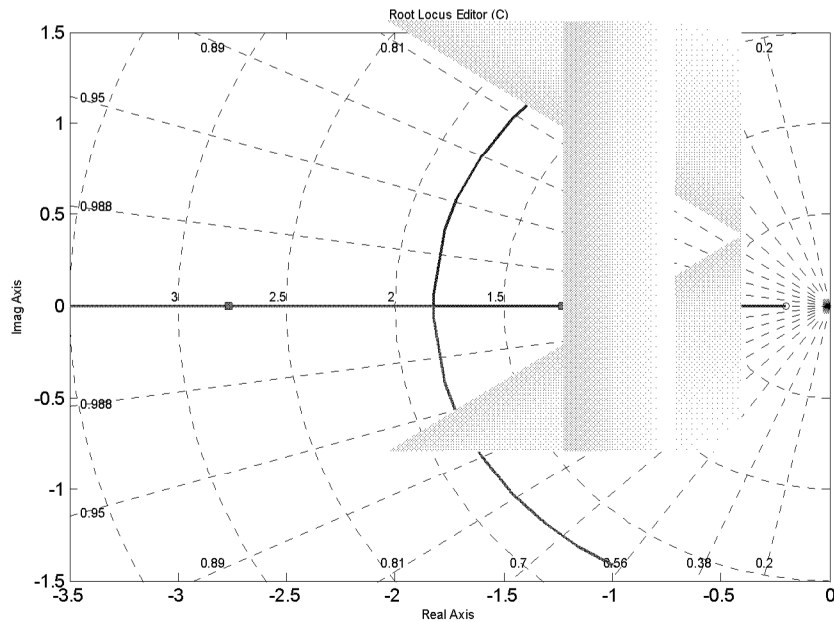
За допомогою модуля **Sisotool** (скорочення *SISO=Single Input Single Output* позначає систему з одним входом і одним виходом) можна вибирати потрібне розташування корінь (і відповідний коефіцієнт підсилення), «перетаскуючи» їх мишкою. Помітимо, що при переміщенні одного кореня зміщуються й усі інші, оскільки система має один ступінь свободи – змінний коефіцієнт підсилення контуру.



Корені при обраному коефіцієнті підсилення k зображуються фіолетовими квадратиками. Кінці годографа для кожного кореня поміщені хрестиком ($k=0$) і кружком ($k=\infty$). Сітка (для її виводу треба натиснути ПКМ на графіку й вибрати пункт **Grid**) показує лінії рівних показників кривальності (коефіцієнта демпфування, *damping factor*) – прямі, що виходять із початку координат, і лінії рівних власних частот (*natural frequency*) – кола із центром у початку координат.

У контекстному меню (ПКМ) можна встановити обмеження на розташування полюсів так, щоб перерегулювання й час перехідного процесу не перевищували заданих. Для цього треба вибрати пункт **Design Constraints – New** і вибрати в списку, що **випадає**, **Percent Overshoot** (перерегулювання у відсотках) або **Settling Time** (час перехідного процесу з 2%-ний точністю). Обмеження показуються у вигляді границь заборонених зон.

¹ Цим терміном називають сукупність траєкторій, які описують корені характеристичного рівняння при зміні будь-якого числового коефіцієнта у системі.



Час перехідного процесу оцінюється по *ступеню стійкості* η замкненої системи. Так називається відстань від самого правого кореня характеристичного рівняння до уявної осі. Звичайно встановлюється (як для аперіодичної ланки)

$$T_{ii} \approx -\frac{\ln \Delta}{\eta} \approx \frac{3,912}{\eta},$$

де Δ – величина припустимої помилки (в MATLAB вона встановлюється рівної 2% або 0,02). Таким чином, при обмеженні тільки на T_{ii} область припустимого розташування корінь p_i є півплощина $\text{Re } p_i < -\frac{3,912}{T}$.

Вимоги до коефіцієнта демпфування додають обмеження у вигляді сектору

$$\beta = \max_i \left| \frac{\text{Im } p_i}{\text{Re } p_i} \right| < \frac{\sqrt{1-\zeta^2}}{\zeta^2}.$$

Число β називають *коливністю* або *ступенем коливності* замкненої системи. Кожному заданому ζ відповідає деяке значення β .

Перерегулювання (у відсотках) оцінюється по формулі

$$\sigma \approx e^{-\frac{\pi \zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}}} \times 100\%.$$

Кожному перерегулюванню відповідає своє значення ζ й свій сектор, що обмежує розташування корінь.

Таким чином, при використанні двох обмежень (перше – на T_{ii} , друге – на σ або ζ) область припустимого розташування корінь являє собою усічений сектор у лівій частині малюнка. Якщо перетаскуванням корінь (тобто, зміною посилення контуру) не вдається розташувати полюси в цій області, треба ускладнювати регулятор, додаючи його нулі й полюси (ПКМ – **Add Pole/Zero** або ПКМ – **Edit Compensator**).

Синтез за допомогою ЛАФЧХ

У вітчизняній літературі класичним став метод синтезу коригувальних пристроїв за допомогою логарифмічних амплітудно-фазових частотних характеристик (ЛАФЧХ) розімкнутої системи (діаграм Бode по закордонній термінології).

Нехай розімкнута система має передавальну функцію $W(s)$. ЛАФЧХ містить у собі дві криві – амплітудну частотну характеристику (ЛАЧХ)

$$L_m(\omega) = 20\lg|W(j\omega)|$$

і фазову (ЛФЧХ)

$$\varphi(\omega) = \arg W(j\omega).$$

Кутова частота (у рад/сек) на осі ординат відкладається в логарифмічному масштабі. При цьому так звані *асимптотичні* ЛАЧХ являють собою відрізки прямих, це значно полегшує ручна побудова.

Розклавши чисельник і знаменник передавальної функції $W(s)$ на співмножники першого й другого порядків, можна представити ЛАЧХ системи як суму ЛАЧХ елементарних ланок (аперіодичних, коливальних, інтегруючих, диференціюючих і т.д.) Для

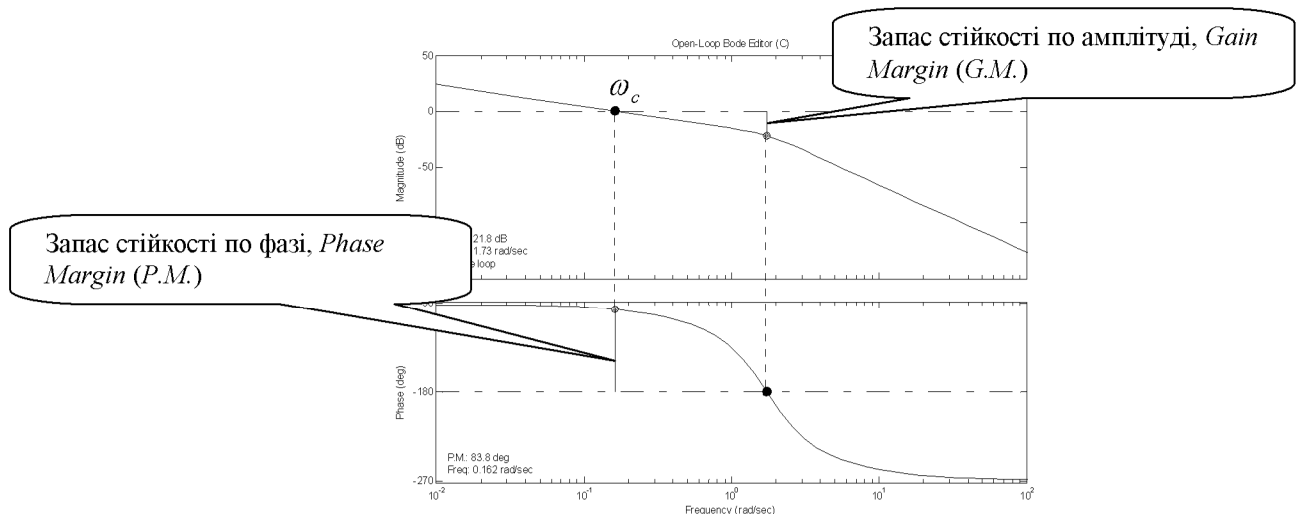
$$W(j\omega) = \frac{N_1(j\omega) \dots N_n(j\omega)}{D_1(j\omega) \dots D_q(j\omega)}$$

одержуємо, використовуючи властивості логарифма,

$$20\lg|W(j\omega)| = 20\lg|N_1(j\omega)| + \dots + 20\lg|N_n(j\omega)| - 20\lg|D_1(j\omega)| - \dots - 20\lg|D_q(j\omega)|$$

Раніше вручну будували асимптотичні ЛАЧХ, підсумовуючись ЛАЧХ окремих ланок. У середовищі MATLAB існують засоби, що дозволяють автоматизувати побудову точних (не асимптотичних) ЛАФЧХ. При цьому можна використовувати накопичений за багато років класичний досвід проектування.

Низькочастотна частина ЛАЧХ визначає точність системи, середньочастотна (поблизу частоти зрізу ω_c) – стійкість і якість перехідного процесу, високочастотна – чутливість до перешкод. Якщо система містить інтегратор, низькочастотна частина має ненульовий нахил (20 дБ на декаду для одного інтегратора), постійний сигнал відслідковується без помилки, в установленому режимі. Для системи із двома інтеграторами ЛАФЧХ має в області низьких частот нахил 40 дБ на декаду, без помилки, в установленому режимі, відслідковується не тільки постійний, але й лінійно зростаючий сигнал. Більш складні вимоги до точності приводять до того, що ЛАЧХ не повинна заходити в деякі заборонні області.



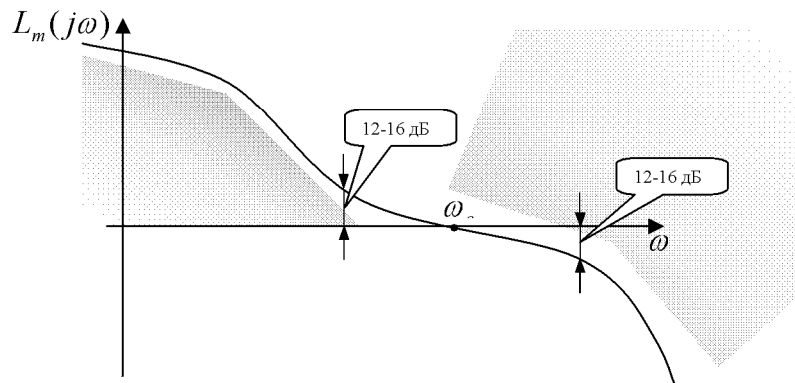
Запас стійкості по амплітуді g_m (у дБ) – це відстань від ЛАЧХ до горизонтальної прямої $L_m = 0$ дБ на частоті, на якій фазова характеристика перетинає пряму $\varphi = -180^\circ$. На цій частоті система повинна мати коефіцієнт підсилення менше 1 (або $L_m(\omega) < 0$).

Запас стійкості по фазі φ_m (у градусах) – це відстань від частотної характеристики до горизонтальної прямої $\varphi = -180^\circ$ на частоті зрізу ω_c . На цій частоті фазова характеристика повинна мати значення *більше* -180° .

Припустимим вважається запас по амплітуді не менш 6 дБ і запас по фазі не менш 30 градусів.

«Підйом» ЛАЧХ означає збільшення коефіцієнта підсилення контуру, фазова характеристика не змінюється. Точність системи (при відпрацьовуванні низькочастотних сигналів) підвищується, однак збільшується й вплив високочастотних перешкод. Оскільки частота зрізу збільшується, підвищується швидкодія системи. При цьому перехідні процеси здобувають виражений коливальний характер, запаси стійкості зменшуються, при подальшому збільшенні коефіцієнта підсилення губиться стійкість.

Звичайно потрібно, щоб система мала високу точність (великий коефіцієнт підсилення по контуру) для низьких частот і пригнічувала високочастотні перешкоди (мала низьке посилення в області високих частот). Частота зрізу вибирається виходячи з вимог до швидкодії. Таким чином, типова ЛАЧХ має вигляд, показаний на малюнку. Сірим кольором показані заборонні області, які визначаються вимогами до точності й придушенню перешкод.



Для забезпечення гарної якості перехідних процесів рекомендується, щоб ЛАЧХ перетинала вісь $L = 0$ із нахилом 20 дБ/град. Це пояснюється тим, що нахил 20 дБ/дек, відповідний до аперіодичної ланки, приводить до найменшої коливальності перехідного процесу. Крапки переходу (зламу асимптотичної ЛАЧХ) від низькочастотної частини до середньочастотної і далі до високочастотної повинні відстояти від осі $L = 0$ на 12-16 дБ.

У загальному випадку будується бажана ЛАЧХ $L_e(j\omega)$, що задовольняє вимоги до системи, потім ЛАЧХ послідовного коригувального пристрою визначається як різниця між $L_e(j\omega)$ й ЛАЧХ існуючої розімкнутої системи.

Точність в установленому (статичному) режимі.

Нехай передавальну функцію розімкнутої системи можна представити у вигляді

$$W(s) = KW_1(s),$$

де передавальна функція $W_1(s)$ має властивість $\lim_{s \rightarrow 0} W_1(s) = 1$. Тоді передавальна функція замкненої системи помилково рівна

$$\Phi_\varepsilon(s) = \frac{1}{1 + KW_1(s)}.$$

значення, що встановилося, помилки при постійному вхідному $x(t) = x_0$ сигналі, що має зображення по $X(s) = \frac{x_0}{s}$ Лапласу, може бути обчислене по теоремі про кінцеве значення:

$$\varepsilon_{\infty} = \lim_{t \rightarrow \infty} \varepsilon(t) = \lim_{s \rightarrow 0} s \Phi_{\varepsilon}(s) X(s) = \frac{x_0}{1+K}.$$

Таким чином, при збільшенні коефіцієнта підсилення K помилка зменшується (однак запас стійкості також зменшується й система може стати нестійкою). Величина K називається *добротністю* системи. При будь-якому кінцевому K в такій системі помилка буде кінцевою. Для лінійно зростаючого сигналу помилка буде лінійно зростати.

Тепер нехай

$$W(s) = \frac{K}{s^{\nu}} W_1(s),$$

де ν – ціле число й $\lim_{s \rightarrow 0} W_1(s) = 1$. Тоді для всіх вхідних сигналів виду

$$x(t) = x_0 + x_1 t + x_2 t^2 + \dots + x_{\nu-1} t^{\nu-1}$$

система буде забезпечувати нульову, в встановленому режимі, помилку при будь-яких значеннях коефіцієнтів $x_0, \dots, x_{\nu-1}$. Таким чином, при $\nu > 0$ система відслідковує постійний сигнал без помилки, в встановленому режимі. Такі системи називають *астатичними*.

Число ν називається *порядком астатизму*. Для сигналу

$$x(t) = x_{\nu} t^{\nu}, \quad X(s) = \frac{\nu! x_{\nu}}{s^{\nu+1}}$$

помилка, що встановилась, рівна

$$\varepsilon_{\infty} = \frac{\nu! x_{\nu}}{K}$$

Вище розглянутий випадок астатизму стосовно задаючого впливу. Аналогічно може йти мова про астатизм по відношенню до збурюючого впливу.

Найпростіші типи регуляторів

П-Регулятор. Найпростіші пропорційний регулятор (П-Регулятор) являє собою звичайний підсилювач із передавальною функцією

$$C(s) = K_c.$$

ПД-Регулятор. Для поліпшення якості регулювання й підвищення швидкодії в закон керування вводять похідну від сигналу помилки, так що передавальна функція пропорційно-диференціального регулятора, що виходить (ПД-Регулятора) може бути представлена у вигляді

$$C(s) = K_c (1 + T_D s),$$

де T_D – постійна часу диференціюючої ланки. На практиці реалізувати ідеальне диференціювання неможливе, тому що частотна характеристика ланки нескінченно збільшується на високих частотах. Тому використовують диференціюючу ланку з додатковим фільтром

$$C(s) = K_c \left(1 + \frac{T_D s}{T_v s + 1} \right).$$

Тут постійна часу фільтра T_v звичайно в 3-10 раз менша, чим T_D . Надмірне збільшення T_D може привести до нестійкості системи, зменшення цієї величини затягує перехідний процес.

ПІД-Регулятор. На відміну від ПД-Регулятора, він містить інтегратор і система стає астатичною по задаючому впливу, так і по збурюванню (тобто, постійне збурювання повністю компенсується). Його передавальна функція має вигляд

$$C(s) = K_c \left(1 + \frac{T_D s}{T_v s + 1} + \frac{1}{T_I s} \right).$$

де T_I – постійна часу інтегруючої ланки. При збільшенні T_I перехідний процес затягається, при зменшенні – зменшується запас стійкості, перехідний процес здобуває виражений коливальний характер, при подальшому зменшенні T_I губиться стійкість.

За допомогою правильно настроєного ПД-Регулятора в більшості випадків вдається забезпечити виконання всіх вимог до системи. У силу своєї простоти, вони одержали саме широке поширення. По статистиці більш 90% усіх промислових регуляторів являють собою саме ПД-Регулятори.

Оформлення звіту

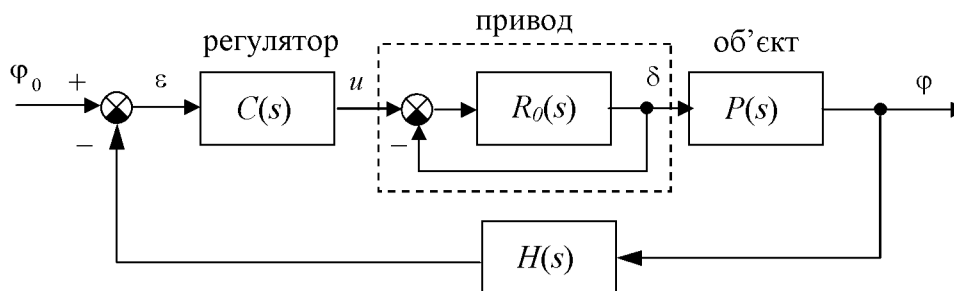
Звіт по лабораторній роботі виконується у вигляді тексту файлу формату *Microsoft Word* (шрифт основного тексту **Times New Roman**, 12 пунктів, через 1,5 інтервалу, вирівнювання по ширині). Він повинен включати

- назву предмета, номер і назву лабораторної роботи
- прізвище й ініціали авторів, номер групи
- прізвище й ініціали викладача
- номер варіанта
- короткий опис досліджуваної системи
- результати виконання всіх пунктів інструкції, які виділені сірим тлом (див. нижче): результати обчислень, графіки, відповіді на запитання.

При складанні звіту рекомендується копіювати необхідну інформацію через буфер обміну з робочого вікна середовища MATLAB. Для цих даних використовуйте шрифт **Courier New**, у якому ширина всіх символів однакова.

Опис системи

У роботі розглядається система стабілізації по куту повороту. Її структурна схема показана на малюнку.



вимірювальна система (зворотній зв'язок)

Структурна схема системи стабілізації судна на курсі

Лінійна математична модель, що описує зміну кута (рискання кута), має вигляд

$$\dot{\phi} = \omega_y$$

$$\dot{\omega}_y = -\frac{1}{T_s} \omega_y + \frac{K}{T_s} \delta$$

де ϕ – кут рискання (кут відхилення від заданого курсу), ω_y – кутова швидкість обертання навколо вертикальної осі, δ – кут повороту вертикального керма щодо положення рівноваги, T_s – постійна часу, K – постійний коефіцієнт, що має розмірність

рад/сек. Передавальна функція від кута повороту керма до кута рискання запишеться у вигляді

$$P(s) = \frac{K}{s(T_s s + 1)}.$$

Привод (кермова машина) приблизно моделюється як інтегруюча ланка

$$R_0(s) = \frac{1}{T_R s},$$

охоплена одиничним від'ємним зворотним зв'язком.

Для виміру кута рискання використовується гірокомпас, математична модель якого записується у вигляді аперіодичної ланки першого порядку з передавальною функцією²

$$H(s) = \frac{1}{T_{oc} s + 1},$$

Інструкція з виконання роботи

Основна частина команд уводиться в командному вікні середовища MATLAB. Команди, які треба застосовувати в інших вікнах, позначені іконками відповідних програм.

Етап виконання завдання	Команди MATLAB
1. Уведіть передавальну функцію моделі судна $P(s) = \frac{K}{s(T_s s + 1)}$ як об'єкт <code>tf</code> .	<code>P = tf (K, [Ts 1 0])</code>
2. Уведіть передавальну функцію інтегруючої ланки $R_0(s) = \frac{1}{T_R s}$.	<code>R0 = tf (1, [TR 0])</code>
3. Побудуйте передавальну функцію кермового пристрою, замкнувши інтегратор одиничним негативним зворотним зв'язком.	<code>R = feedback (R0, 1)</code>
4. Побудуйте передавальну функцію послідовного з'єднання об'єкта із приводом.	<code>G = P * R</code>
5. Побудуйте перехідну характеристику для отриманої моделі й скопіюйте її у звіт через буфер обміну. Поясніть, чому функція нескінченно зростає й прагне до прямої. Який коефіцієнт нахилу цієї прямій? Закрийте вікно із графіком.	<code>step (G)</code>
6. Побудуйте передавальну функцію вимірювального пристрою $H(s) = \frac{1}{T_{oc} s + 1}$.	<code>H = tf (1, [Toc 1])</code>
7. Побудуйте передавальну функцію розімкнутого контуру.	<code>L = G * H</code>
8. Побудуйте ЛАФЧХ розімкнутої системи ³ .	<code>bode (L)</code>

² Числові значення K , T_s , T_R и T_{oc} потрібно взяти з таблиці в кінці файлу.

³ В зарубіжній літературі ЛАФЧХ називають діаграмою Бодє.

9. Відзначте крапки, що визначають перетинання ЛАЧХ із прямою 0 дБ і перетинання ЛФЧХ із прямою -180° .	<p>Figure No. 1</p> ПКМ – Characteristics – Stability (Minimum Crossing)
10. Визначите, чи є замкнена система стійка? Які запаси стійкості по амплітуді (<i>Gain margin</i>) і фазі (<i>Phase margin</i>)? Який регулятор неявно використовується в цьому випадку? Скопіюйте графік ЛАФЧХ у звіт.	<p>Figure No. 1</p> ЛКМ на мітках-кружках
11. Знайдіть максимальний коефіцієнт підсилення розімкнутої системи. Поясніть цей результат.	<p>Figure No. 1</p> ПКМ – Characteristics – Peak Response
12. Закрийте вікно з ЛАФЧХ і запустіть модуль Sisotool . ⁴	sisotool
13. Імпортуйте передавальну функцію G як модель об'єкта (<i>Plant</i>) і H як модель датчика (<i>Sensor</i>). Блоки F (попередній фільтр) і C (регулятор) залишіть без змін (рівними 1).	<p>SISO Design Tool</p> File – Import
14. Відключіть зображення кореневого годографа так, щоб у вікні залишилася тільки ЛАФЧХ.	<p>SISO Design Tool</p> View – Root Locus (відключити)
15. Для того, щоб відразу бачити зміни перехідних процесів, запустіть Ltviewer ⁵ з верхнього меню вікна Sisotool . Розташуйте два вікна поруч, щоб вони не перекривали один одного.	<p>SISO Design Tool</p> Analysis – Response to Step Command
16. Залишіть тільки графік перехідного процесу на виході, відключивши вивід сигналу керування.	<p>LTI Viewer</p> ПКМ – Systems – Closed loop r to u
17. Визначте перерегулювання σ й час перехідного процесу T_p . ⁶ Скопіюйте графік у звіт.	<p>LTI Viewer</p> ПКМ – Characteristics – <ul style="list-style-type: none"> • Peak Response • Settling Time
18. Перейдіть у вікно Sisotool . Визначте коефіцієнт підсилення, при якому перерегулювання зразкове рівно 10%. Як змінився час перехідного процесу? Які запаси стійкості в цьому випадку? Скопіюйте графік у звіт.	<p>SISO Design Tool</p> перетаскування мишею ЛАЧХ, редагування в полі <i>Current Compensator</i>

⁴ SISO = Single Input Single Output, система с одним входом и виходом.

⁵ LTI = Linear Time-Invariant, лінійна стаціонарна система.

⁶ По замовчуванню в MATLAB час перехідного процесу визначається для 2%-ного відхилення від встановленого значення.

<p>19. Перейдіть у вікно середовища MATLAB і введіть передавальну функцію диференціально-пропорційно-диференціального (ПД) регулятора</p> $C_{pd}(s) = 1 + \frac{T_s s}{T_v s + 1}, \text{ де } T_v = 1 \text{ сек,}$ <p>а T_s – стала часу системи.</p>	$Cpd = 1 + tf ([Ts \ 0], [Tv \ 1])$
<p>20. Перейдіть у вікно Sisotool. Імпортуйте регулятор Cpd, як базову модель для блоку C.</p>	<p>SISO Design Tool File – Import, $Cpd \rightarrow C$</p>
<p>21. Визначите додатковий коефіцієнт підсилення, при якому перерегулювання зразкове рівно 10%. Знайдіть час перехідного процесу й запаси стійкості. Порівняйте пропорційний і ПД-Регулятори. Скопіюйте у звіт графік перехідного процесу.</p>	<p>SISO Design Tool перетаскування мишею ЛАЧХ, редагування в поле <i>Current Compensator</i></p>
<p>22. Визначите додатковий коефіцієнт підсилення, при якому час перехідного процесу мінімально. Скопіюйте у звіт графік перехідного процесу.</p>	<p>SISO Design Tool перетаскування мишею ЛАЧХ, редагування в поле <i>Current Compensator</i></p>
<p>23. Експортуйте отриманий регулятор у робочу область MATLAB.</p>	<p>SISO Design Tool File – Export у стовпці <i>Export as</i> перемінити ім'я Cpd на C кнопка <i>Export to workspace</i></p>
<p>24. Побудуйте передавальну функцію отриманої замкненої системи. Подумайте, чому вийшло таке громіздке вираження. Який повинен бути порядок передавальної функції?</p>	$W = C * G / (1 + C * G * H)$
<p>25. Побудуйте мінімальну реалізацію передавальної функції W.</p>	$W = \text{minreal}(W)$
<p>26. Визначите полюси передавальної функції замкненої системи. Що означає близькість деяких полюсів до уявної осі? Чи вірно буде, що для цього випадку буде малий запас стійкості?</p>	$\text{pole}(W)$
<p>27. Знайдіть коефіцієнт підсилення системи в режимі, що встановився. Поясніть результат. Є чи в такій системі статична помилка при відстеженні постійного сигналу? Чому? А для лінійно зростаючого сигналу?</p>	$\text{dcgain}(W)$

28. Як зміниться статичний коефіцієнт підсилення, якщо модель датчика прийме вид

$$H(s) = \frac{2K_{oc}}{T_{oc}s + 1} ?$$

29. Побудуйте мінімальну реалізацію передавальної функції замкненої системи від входу до сигналу керування (виходу регулятора).

$$W_u = \text{minreal}(C / (1 + C * G * H))$$

30. Побудуйте зміну сигналу керування при одиничному східчастому вхідному сигналі й скопіюйте графік у звіт. Поясніть, чому сигнал керування прагне до нуля.

$$\text{step}(W_u)$$

Таблиця коефіцієнтів (варіанти завдань)

Варіант	T_s , сек	K , рад/сек	T_R , сек	T_{oc} , сек
1.	16.0	0.06	1	1
2.	16.2	0.07	2	2
3.	16.4	0.08	1	3
4.	16.6	0.07	2	4
5.	16.8	0.06	1	5
6.	17.0	0.07	2	6
7.	17.2	0.08	1	1
8.	17.4	0.07	2	2
9.	17.6	0.06	1	3
10.	17.8	0.07	2	4
11.	18.0	0.08	1	5
12.	18.2	0.09	2	6
13.	18.4	0.10	1	1
14.	18.6	0.09	2	2
15.	18.8	0.08	1	3
16.	19.0	0.07	2	4
17.	19.2	0.08	1	5
18.	19.4	0.09	2	6
19.	19.6	0.10	1	1
20.	18.2	0.0694	2	6

Контрольні питання до захисту

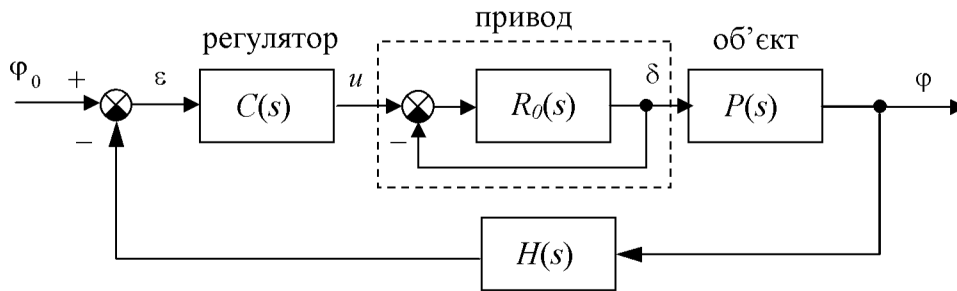
1. Див. усі питання до роботи № 1.
2. Що означають скорочення SISO, LTI?
3. Як одержати передавальну функцію по лінійних диференціальних рівняннях системи?
4. Як увести передавальну функцію у вікні MATLAB?
5. За допомогою яких операцій (функцій) будуються в MATLAB моделі паралельного й послідовного з'єднань, системи зі зворотним зв'язком?
6. Як побудувати ЛАФЧХ розімкнутої системи?
7. Як визначаються запаси стійкості по амплітуді й по фазі? Що означають ці величини? У яких одиницях вони вимірюються?
8. Які можливості надає модуль **Sisotool**?
9. Що таке
 - кореневий годограф
 - перерегулювання
 - час перехідного процесу
10. Як впливає збільшення коефіцієнта підсилення контуру на ЛАФЧХ?
11. Чому в частині, що диференціює, ПД-Регулятора використовується додатковий фільтр у вигляді аперіодичної ланки з постійної T_i часу ?
12. Які переваги дає використання ПД-Регулятора в порівнянні з П-Регулятором?
13. Як впливає збільшення коефіцієнта підсилення контуру на перерегулювання й час перехідного процесу?
14. Як знайти порядок передавальної функції замкненої системи, знаючи характеристики всіх її блоків?
15. Чи пов'язана близькість полюсів передавальної функції замкненої системи з уявною віссю з малим запасом стійкості
16. Як залежить статичний коефіцієнт підсилення замкненої системи від характеристик вимірювального пристрою?
17. Що таке астатична система? Що таке порядок астатизму?

Приклад виконання звіту по лабораторній роботі

Проектування регулятора для лінійної системи

1. Опис системи

Досліджується система керування судном за курсом, структурна схема якої показана на малюнку.



Вимірювальна система

Рух судна описується лінійною математичною моделлю у вигляді передавальної функції

$$P(s) = \frac{K}{s(T_s s + 1)}, \quad \text{де } K = 0.0694 \text{ рад/сек, } T_s = 18.2 \text{ сек,}$$

Привод моделюється як інтегруюча ланка

$$R_0(s) = \frac{1}{T_R s}, \quad T_R = 2 \text{ сек,}$$

охоплена одиничним від'ємним зворотним зв'язком. Модель вимірювального пристрою являє собою аперіодичну ланку з передавальною функцією

$$H(s) = \frac{1}{T_{oc} s + 1}, \quad T_{oc} = 6 \text{ сек,}$$

2. Дослідження розімкнутої системи

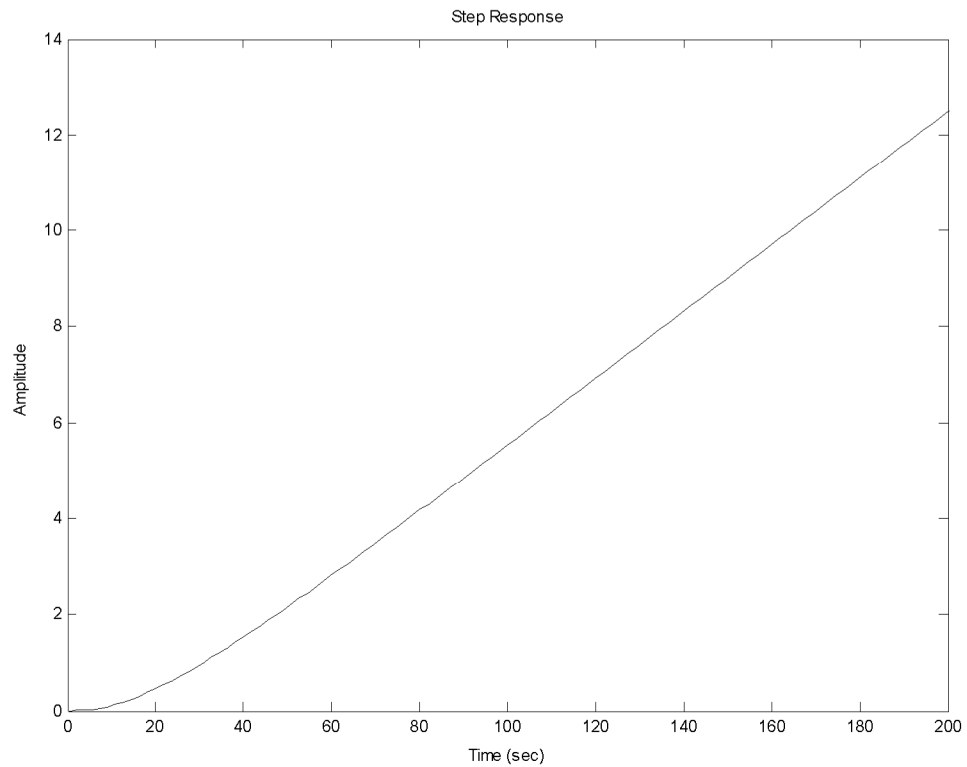
- Передавальна функції кермового пристрою

$$R(s) = \frac{1}{2s + 1}.$$

- Передавальна функція послідовного з'єднання об'єкта із приводом

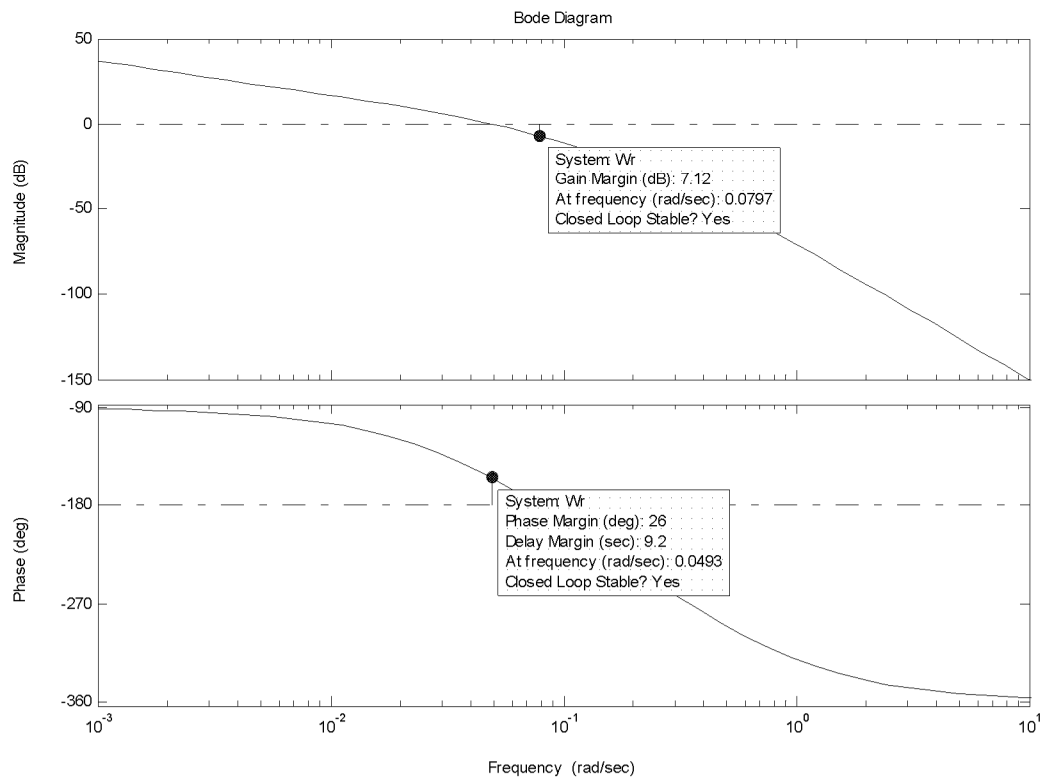
$$G(s) = \frac{0.0694}{36.4s^3 + 20.2s^2 + s}.$$

- Перехідна характеристика цієї моделі:



Графік прямує до похилої прямої, тому що ...
 Нахил асимптоти рівний ...

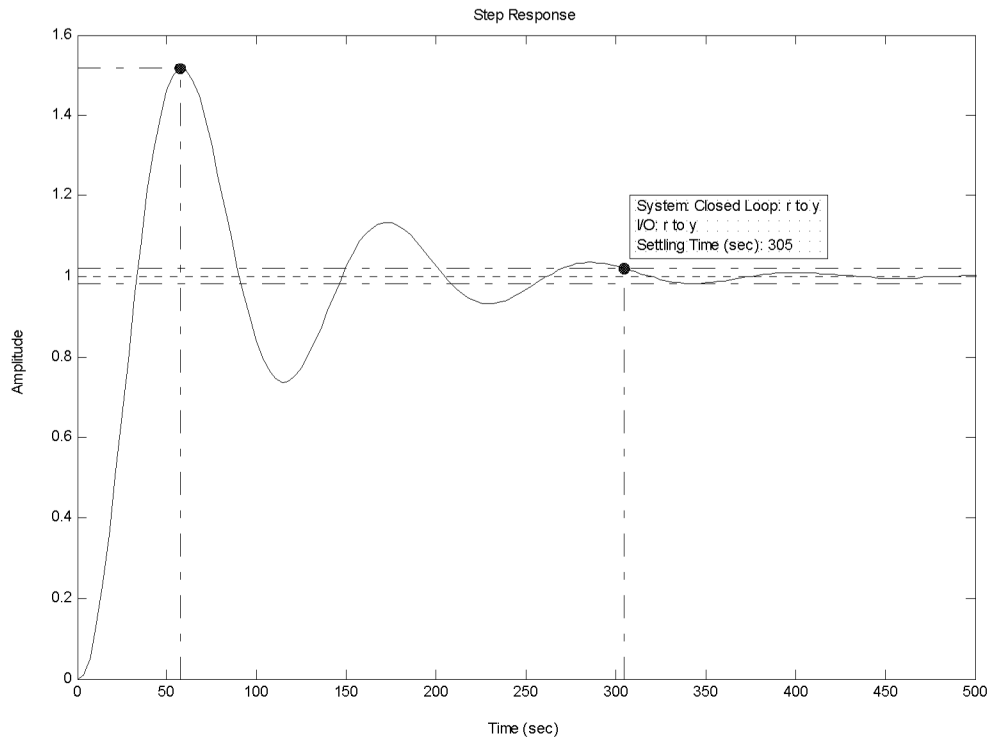
- ЛАФЧХ розімкнутої системи



- Система з регулятором $C(s) = \dots$ стійка, запаси стійкості: по амплітуді – 7,12 дБ, по фазі – 26 градусів.
- Максимальний коефіцієнт підсилення розімкнутої системи рівний ... Це пояснюється тим, що ...

3. Дослідження системи із пропорційним (П-П-) регулятором

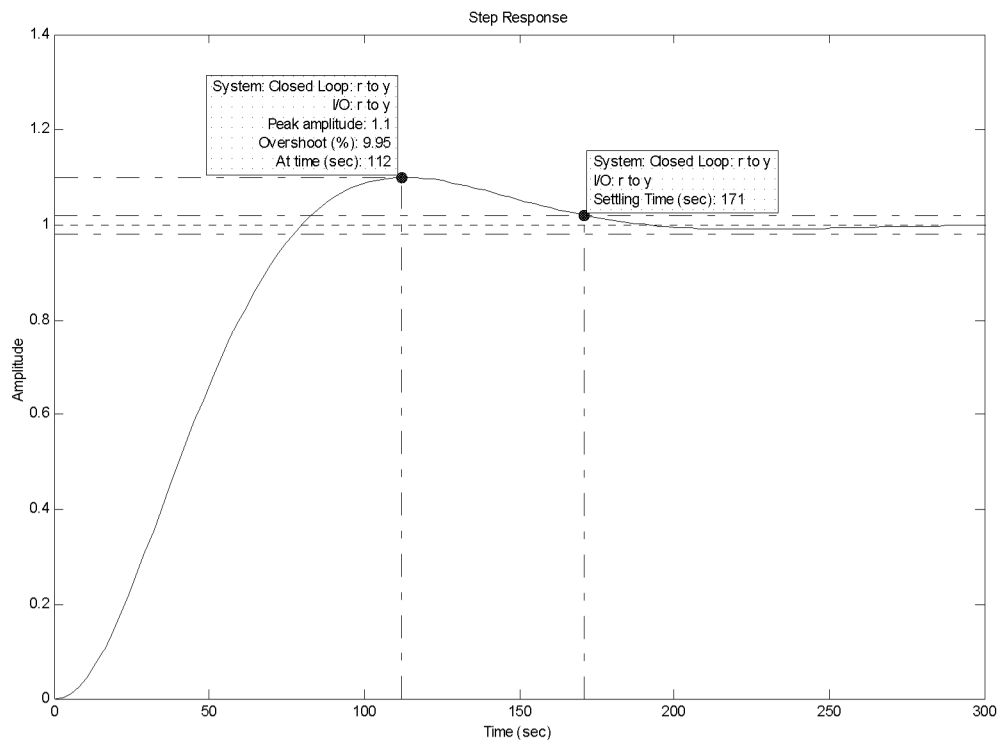
- Перехідна функція замкненої системи при $C(s) = \dots$



- Час перехідного процесу $T_{ii} = 305$ сек, перерегулювання $\sigma = 51\%$.
- Для забезпечення перерегулювання не більш 10% потрібно зменшити коефіцієнт підсилення регулятора до значення

$$C(s) = 0.348$$

- Перехідна функція скоректованої замкненої системи при $C(s) = 0.348$



- Час перехідного процесу $T_{ii} = 171$ сек,

- Запаси стійкості: по амплітуді 16,3 Дб, по фазі 57.9 градуса.

4. Дослідження системи з диференціальний-диференціальним-диференційним-пропорційно-диференціальним (ПД-) регулятором

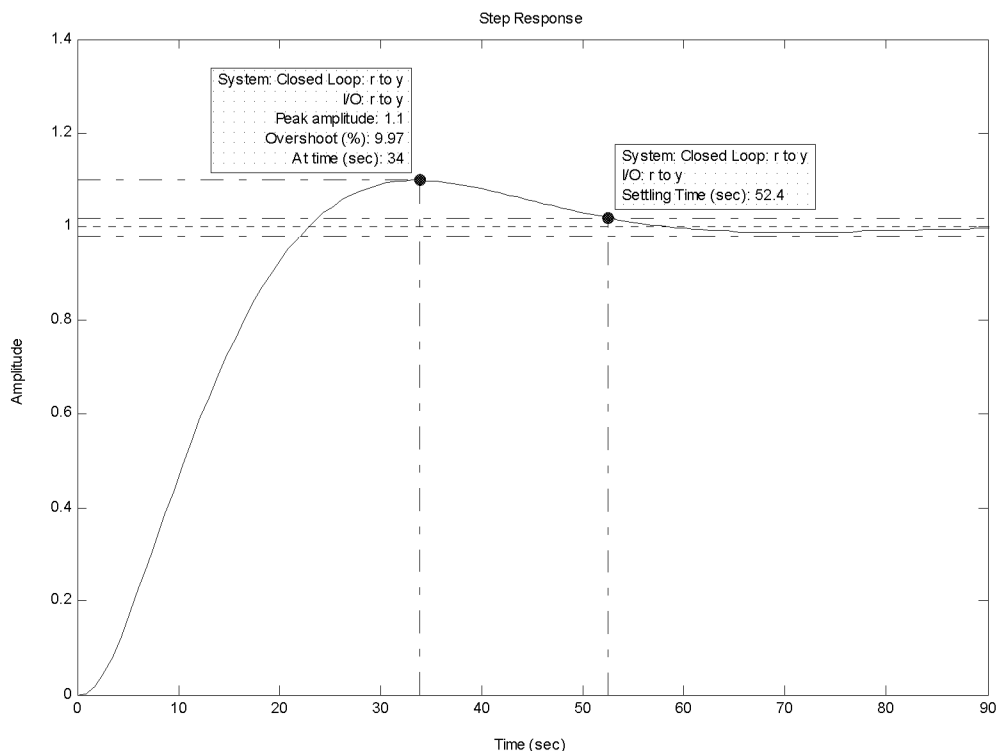
- Загальний вид передавальної функції регулятора

$$C(s) = K_c \left(1 + \frac{T_s s}{T_v + 1} \right), \quad \text{де } T_s = 18.2 \text{ сек, } T_v = 1 \text{ сек,}$$

а коефіцієнт K_c повинен бути обраний у процесі проектування відповідно до вимог до системи.

4.1 Регулятор, що забезпечує перерегулювання 10%

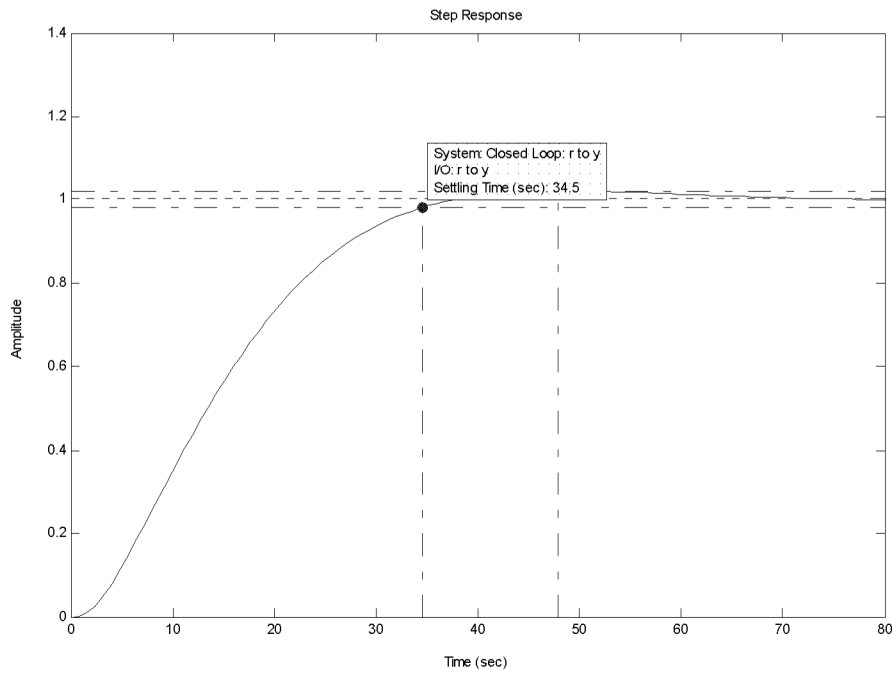
- Для забезпечення перерегулювання 10% потрібно вибрати $K_c = 0.942$
- Перехідна функція скоректованої замкненої системи



- Час перехідного процесу $T_{\text{ii}} = 52$ сек,
- Запаси стійкості: по амплітуді 15.9 Дб, по фазі 60.2 градусів.
- У порівнянні з П-Регулятором, використання ПД-Регулятора дозволяє ...

4.2 Регулятор, що забезпечує найкоротший перехідний процес

- Для забезпечення мінімального часу перехідного процесу потрібно вибрати $K_c = 0.704$
- Перехідна функція скоректованої замкненої системи



- Час перехідного процесу $T_{ii} = 34$ сек,
- Запаси стійкості: по амплітуді 18.4 Дб, по фазі 67.3 градуса.
- Передавальна функція замкненої системи

$$0.025771 (s+0.05208) (s+0.1667)$$

$$(s+0.9892) (s+0.5459) (s+0.04826) (s^2 + 0.1382s + 0.008584)$$

- Порядок передавальної функції рівний 5, тому що ...
- Полюси передавальної функції

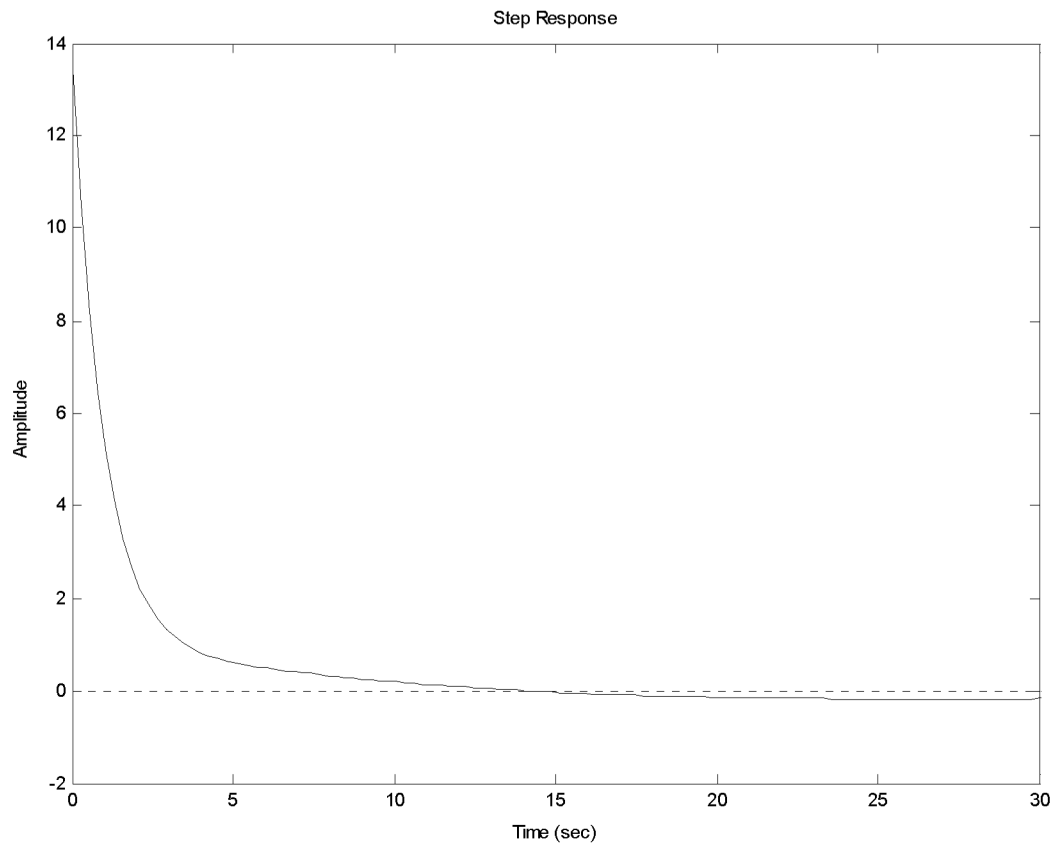
$$\begin{aligned} & -0.9892 \\ & -0.5459 \\ & -0.0691 + 0.0617i \\ & -0.0691 - 0.0617i \\ & -0.0483 \end{aligned}$$

- Близькість полюсів до уявної осі означає, що ... При цьому запас стійкості ...
- Коефіцієнт підсилення системи в режимі, що встановився, рівний ... Це пояснюється тим, що ...
- При постійному сигналу помилка, що встановився, ..., тому що ...
- При лінійно зростаючому сигналі помилка, що встановився, ..., тому що ...
- При використанні датчика, описуваного моделлю $H(s) = \frac{2K_{oc}}{T_{oc} + 1}$, коефіцієнт підсилення в режимі, що встановився, буде рівний ..., тому що ...
- Отримана система є астатическою, тобто, відслідковує без помилки постійний вхідний сигнал. Це визначається тим, що ...
- При лінійно зростаючому сигналі ...
- Передавальна функція замкненої системи від входу до сигналу керування

$$13.5168 s (s+0.05208) (s+0.05495) (s+0.1667) (s+0.5)$$

$$(s+0.9892) (s+0.5459) (s+0.04826) (s^2 + 0.1382s + 0.008584)$$

- Зміна сигналу керування при одиничному східчастому вхідному сигналі



- Сигнал керування прагне до нуля, тому що ...

Висновок