

**Державна служба України з надзвичайних ситуацій
Національний університет цивільного захисту України
Кафедра автоматичних систем безпеки та інформаційних технологій**

ЗАТВЕРДЖУЮ

Начальник кафедри АСБтаІТ

Роман ШЕВЧЕНКО

Навчальна дисципліна

**АВТОМАТИКА РАННЬОГО ВИЯВЛЕННЯ НАДЗВИЧАЙНИХ
СИТУАЦІЙ**

Лекція № 3

**МАТЕМАТИЧНИЙ ОПИС ХАРАКТЕРИСТИК АВТОМАТИЧНИХ
СИСТЕМ КОНТРОЛЮ ТА СПОСТЕРЕЖЕННЯ. СТАНДАРТНІ ВХІДНІ
СИГНАЛИ. ТИПИ ХАРАКТЕРИСТИК АВТОМАТИЧНИХ СИСТЕМ.
МАТЕМАТИЧНИЙ ОПИС ХАРАКТЕРИСТИК АВТОМАТИЧНИХ СИСТЕМ**

Лекцію розробив:

Доцент кафедри АСБтаІТ



Вячеслав ДУРЕСОВ

ХАРКІВ 2024

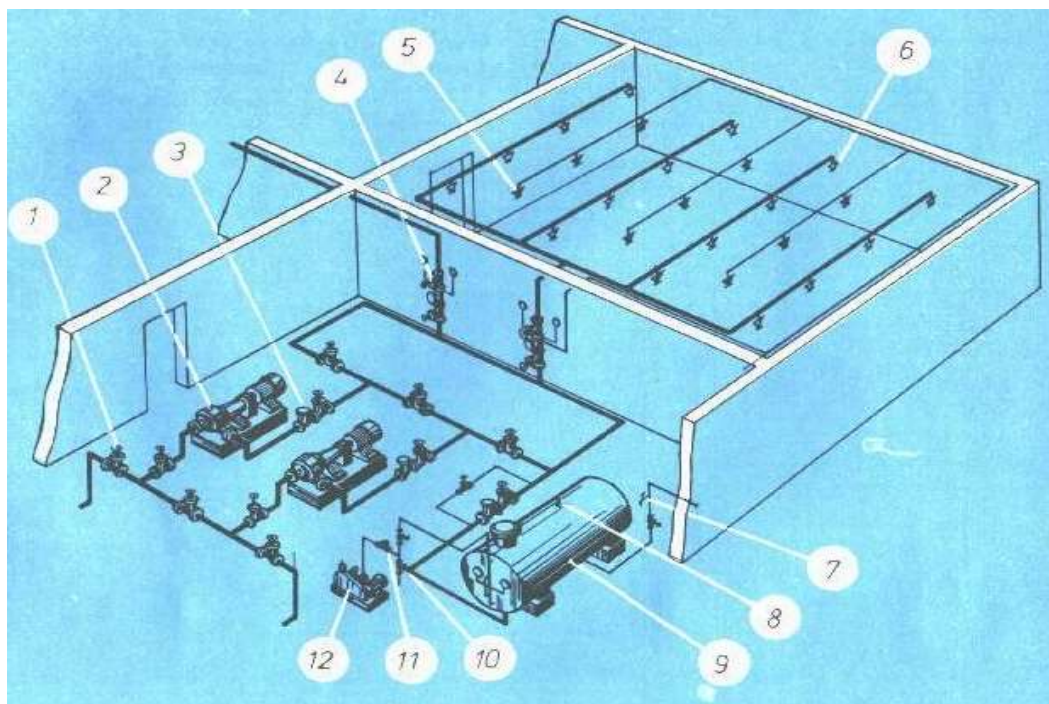
Зміст лекції:

Вступ

1. Стандартні входні впливи.
2. Характеристики АС
3. Математичний опис характеристик АС.
 - 3.1. Перехідні функції АС.
 - 3.2 Імпульсні функції АС.
 - 3.3. Частотні функції АС.
4. Логарифмічні частотні характеристики (ЛЧХ).
 - 4.1. Логарифмічна амплітудна характеристика (ЛАХ).
 - 4.2. Логарифмічна фазова характеристика (ЛФХ).
5. Частотні функції ланок й їхніх з'єднань
6. Типові динамічні ланки АС.
7. Позиційні ланки.
8. Інтегруючі ланки.
9. Ланки, що диференціюють.
10. Висновки, урахування впливу воєнного стану.

ВСТУП

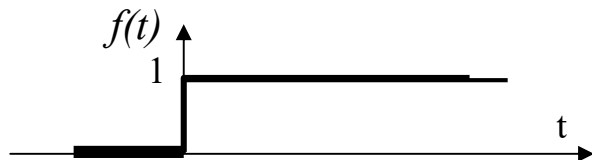
В другій лекції, на прикладі АУВПГ було показано, що люба по складності пожежна АС, може бути представлена набором окремих простих елементів. Сьогодні на занятті ми розглянемо, як можливо математично записати усі її елементи, та виразити діючи на них сигнали.



1. СТАНДАРТНІ ВХІДНІ ВПЛИВИ

В автоматичі прийнято розглядати реакції АС на вхідні сигнали визначеної форми, що називаються стандартними.

1. Одиничний східчастий сигнал: $f(t)=1(t)$.



При $t \leq 0$, $f(t)=0$;

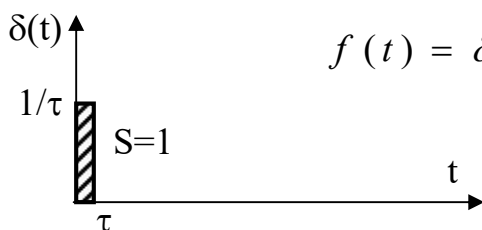
При $t > 0$, $f(t)=1(t)$, $F(p)=1/p$.

2. Одиничний східчастий сигнал швидкості:

$$\dot{f}(t) = 1(t) \quad , \quad F(p) = \frac{1}{p^2} \quad .$$

$$f(t) = \int_0^t 1(t) \cdot dt \quad ; \quad F(p) = L \left[\int_0^t 1(t) \cdot dt \right] = \frac{1}{p^2} \quad ;$$

3. Одиничний імпульсний сигнал (дельта функція):



$$f(t) = \delta(t) \quad , \quad F(p) = 1 \quad .$$

4. Одиничний гармонійний сигнал:

$$f(t) = \cos(\omega \cdot t) \quad , \quad F(p) = \frac{p}{p^2 + \omega^2} \quad .$$

2. ХАРАКТЕРИСТИКИ АС

Реакції АС на стандартні вхідні сигнали мають визначені назви.

Перехідною характеристикою (ПХ) називають графічне зображення реакції АС на східчастий сигнал. Математичне вираження перехідної характеристики називається **перехідною функцією (ПерФ)**.

Імпульсною (ваговою) характеристикою (ІХ) називають графічне зображення реакції АС на одиничний імпульсний сигнал. Математичне вираження імпульсної характеристики називається **імпульсною (ваговою) функцією (ІФ)**.

Частотною характеристикою (ЧХ) називають графічне зображення реакції АС на гармонійний сигнал. Математичне вираження гармонійної характеристики називається **частотною функцією (ЧФ)**.

3. МАТЕМАТИЧНИЙ ОПИС ХАРАКТЕРИСТИК АС

3.1. Перехідні функції АС.

Щоб одержати перехідну функцію необхідно вирішити ДР, що описує динаміку АС при одиничному східчастому сигналі на вході. Рішення ДУ і є перехідною функцією.

Приклад:

Нехай пожежна АС описується рівнянням динаміки:

$$T \dot{\bar{y}} + \bar{y} = K \bar{x}$$

Потрібно знайти ПерФ при нульових початкових умовах:

$$\text{при } t=0, \bar{y}(0) = 0.$$

Рішення диференціального рівняння легко одержати скориставшись таблицею перетворень Лапласа.

Запишемо рівняння динаміки в операторній формі:

$$TpY + Y = KX.$$

Визначимо зображення вхідного сигналу для $X = \frac{1}{p}$, ($\bar{x} = 1(t)$).

$$Y = \frac{K}{Tp + 1} \cdot X \text{ или } Y = \frac{K}{Tp + 1} \cdot \frac{1}{p}.$$

З таблиць перетворень Лапласа знайдемо оригінал отриманого зображення:

$$\bar{y}(t) = K \cdot (1 - e^{-\frac{t}{T}}).$$

3.2 Імпульсні функції АС.

Щоб одержати імпульсну функцію необхідно вирішити ДР, що описує динаміку АС при одиничному імпульсному сигналі на вході. Рішення ДУ і є імпульсною функцією.

Нехай АС описується рівнянням динаміки.

$$T \dot{\bar{y}} + \bar{y} = K \bar{x}$$

Потрібно знайти імпульсну функцію при нульових початкових умовах:

$$\text{при } t=0, \bar{y}(0) = 0.$$

Запишемо рівняння динаміки в операторній формі:

$$TpY + Y = KX.$$

Визначимо зображення вхідного сигналу для $X = 1$, ($\bar{x} = \delta(t)$).

$$Y = \frac{K}{Tp + 1} \cdot X \text{ или } Y = \frac{K}{Tp + 1}.$$

З таблиць перетворень Лапласа знайдемо оригінал отриманого зображення:

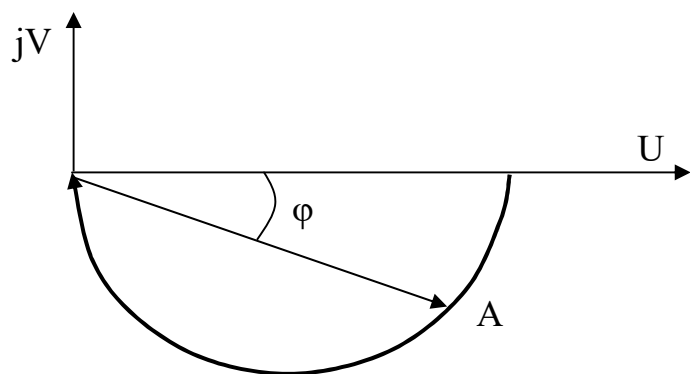
$$\bar{y}(t) = \frac{K}{T} \cdot e^{-\frac{t}{T}}.$$

3.3. Частотні функції АС.

Подамо на вхід АС гармонійний сигнал. Через якийсь час на виході АС установаються гармонійні коливання з такою же частотою, але амплітудою b і зрушенням фази φ :

$$x(t) = a \cos(\omega t) \xrightarrow{t} y(t) = b \cos(\omega t + \varphi).$$

Амплітудною фазовою частотною характеристикою (АФЧХ) називають залежність співвідношення амплітуд $A(\omega)$ и зрушення фази $\varphi(\omega)$ від частоти коливань вхідного сигналу:



АФЧХ зображують на комплексній площині у виді годографа вектору $A(\omega)$, модуль якого дорівнює відношенню амплітуд вихідного і вхідного сигналів $A(\omega) = \frac{b}{a}$; а напрямок визначається зрушенням фази $\varphi = \varphi(\omega)$.

Якщо спостерігається відставання по фазі, то фаза вважається негативною і відкладається по годинній стрілці від полярної осі.

Будь-яку точку АФЧХ можна представити у виді комплексного числа:

$$Ae^{j\varphi} = U + jV.$$

Частотною функцією буде залежність:

$$A(\omega) = \sqrt{U^2(\omega) + V^2(\omega)}; \quad \varphi(\omega) = \arctg \left(\frac{V(\omega)}{U(\omega)} \right);$$

чи: $U=U(\omega); \quad V=V(\omega).$

Правило. Щоб одержати **аналітичне вираження АФЧХ** будь-якої АС, необхідно:

1. У передатній функції параметр P замінити на $j\omega$.

2. В отриманому комплексному числі виділити:

$U(\omega)$ – дійсну і $V(\omega)$ – уявну частини.

3. Визначити: $A(\omega) = \sqrt{U^2 + V^2}$; и $\varphi(\omega) = \arctg \left(\frac{V}{U} \right).$

4. Змінюючи ω від 0 до ∞ , побудувати годограф АФЧХ.

Приклад. Чутливий елемент теплового максимального ПС ТРВ-2 описується рівнянням динаміки $80 \dot{y} + \bar{y} = 90 \bar{x}$. Отримати АФЧХ.

1. У ПФ параметр P замінимо на $j\omega$.

$$W(p) = \frac{90}{80p + 1} \quad P \rightarrow j\omega \quad W(j\omega) = \frac{90}{1 + 80j\omega}$$

2. Виділимо $U(\omega)$ – дійсну і $V(\omega)$ – мниму частини:

$$W(j\omega) = \frac{90}{(1 + j80\omega)} \cdot \frac{(1 - j80\omega)}{(1 - j80\omega)} = \frac{90(1 - j80\omega)}{1 + 6400\omega^2} = \frac{90}{1 + 6400\omega^2} - j \frac{7200\omega}{1 + 6400\omega^2}$$

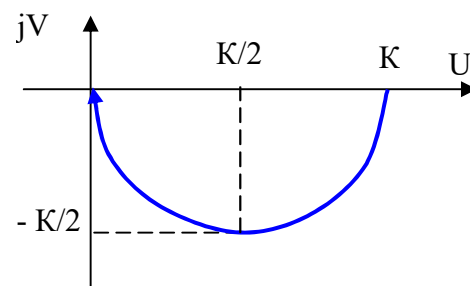
$$U(\omega) = \frac{90}{1 + 6400\omega^2}; \quad V(\omega) = -\frac{7200\omega}{1 + 6400\omega^2}$$

3. Визначимо $A(\omega)$, $\varphi(\omega)$:

$$A(\omega) = \sqrt{U(\omega)^2 + V(\omega)^2} = \sqrt{\left(\frac{90}{1 + 6400\omega^2}\right)^2 + \left(\frac{7200\omega}{1 + 6400\omega^2}\right)^2} = \left(\frac{90}{\sqrt{1 + 6400\omega^2}}\right)$$

4. Змінюючи ω від 0 до ∞ , будемо годограф АФЧХ.

ω	U	V	A	φ
0	K	0	K	0
1/T	$\frac{K}{2}$	$-\frac{K}{2}$	$\frac{K}{\sqrt{2}}$	$-\pi/4$
∞	0	0	0	$-\pi/2$



4. Логарифмічні частотні характеристики ЛЧХ.

На практиці частотні характеристики зручно будувати в логарифмічних координатах. ЛЧХ у ряді випадків мають дуже просте зображення, що й обумовило їхнє широке застосування.

3.4.1. Логарифмічна амплітудна характеристика (ЛАХ).

У ЛАХ по осі абсцис відкладається величина $\lg(\omega)$, а по осі ординат

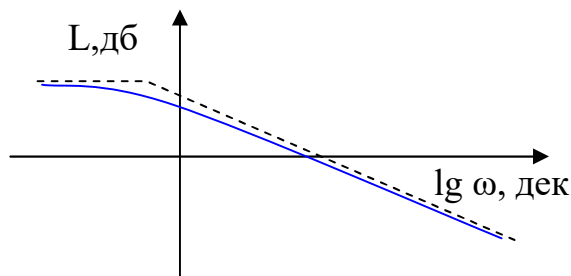
$$L(\omega) = \lg(K_N), \text{ де: } K_N = \frac{N_{\text{ВНХ}}}{N_{\text{ВХ}}} - \text{коефіцієнт посилення потужності.}$$

За одиницю посилення потужності в логарифмічних координатах приймають таке посилення, при якому потужність вихідного сигналу збільшується в **10** разів і називається “**белом**”. Бел дуже велика величина, тому частіше використовується величина в десять разів менша – децибел (**дБ**).

При гармонійних коливаннях потужність сигналу пропорційна квадрату амплітуди:

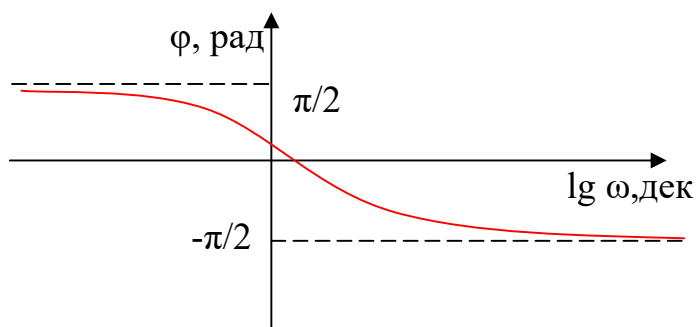
$$K_N(\omega) = \frac{b^2}{a^2} = A^2(\omega); \quad L(\omega) = 20 \lg A(\omega), \quad [\text{дБ}].$$

Одиницею виміру по осі абсцис служить декада. Кожній декаді відповідає збільшення частоти ω у десять разів.



4.2. Логарифмічна фазова характеристика (ЛФХ).

у ЛФХ фаза відкладається в натуральному масштабі, а частота в логарифмічному.



5. ЧАСТОТНІ ФУНКЦІЇ ЛАНОК Й ЇХНІХ З'ЄДНАНЬ

Як уже відзначалося, частотною функцією називається математичне представлення ЧХ – залежності співвідношення амплітуд коливань на вході і виході АС, а також зрушення фази коливань від частоти коливань вхідного сигналу ω . Щоб одержати частотну функцію досить у ПФ $W(p)$ параметр " p " замінити на параметр " $i\omega$ ". Отримане комплексне число $W(i\omega)$ описує АФЧХ на комплексній площині. Щоб побудувати АФЧХ необхідно в комплексному числі $W(i\omega)$ виділити дійсну частину $U(\omega)$ та уявну частину $V(\omega)$ і знайти:

$$A(\omega) = \sqrt{U^2(\omega) + V^2(\omega)}; \quad \varphi(\omega) = \arctg \left(\frac{V(\omega)}{U(\omega)} \right),$$

$$L(\omega) = 20 \lg A(\omega).$$

Це загальне правило для будь-якої АС. Однак побудову АФЧХ складної АС можна істотно спростити, якщо ПФ представити у виді добутку ПФ простих ланок.

Приклад. Нехай ПФ АС має вид:

$$W(p) = W_1(p) \cdot W_2(p) .$$

Аналітичне вираження АФЧХ одержимо замінивши в ПФ параметр p на $i\omega$.

$$W(i\omega) = W_1(i\omega) \cdot W_2(i\omega) .$$

Отримане комплексне число представимо в показовій формі:

$$W(i\omega) = A \cdot e^{i\varphi} = A_1 \cdot e^{i\varphi_1} \cdot A_2 \cdot e^{i\varphi_2} = A_1 \cdot A_2 \cdot e^{i(\varphi_1 + \varphi_2)} .$$

Отже:

$$A = A_1 \cdot A_2; \quad \varphi_{\Sigma} = \varphi_1 + \varphi_2;$$

$$L_{\Sigma} = 20 \lg A = 20 \lg A_1 + 20 \lg A_2 = L_1 + L_2;$$

Висновок: ЛЧХ добутку ПФ можна одержати додаванням ЛЧХ функцій співмножників.

6. ТИПОВІ ДИНАМІЧНІ ЛАНКИ АС

Будь-яка пожежна АС може бути представлена у вигляді з'єднання елементів: вентилі та засувки, пожежні насоси з двигунами-приводами, зворотні клапани, вузли управління, зрошувачі та трубопроводи. Виявляється що, незважаючи на різноманіття конструктивних форм цих елементів, їхня динаміка описується однаковими диференціальними рівняннями. Тому можна уніфікувати елементи по динамічним властивостям. Уніфікований елемент (без обліку конструктивних форм) з певним рівнянням динаміки називається динамічною ланкою. Якщо порядок рівняння динаміки динамічної ланки не перевищує 2-й, то така ланка називається елементарною.

Зауваження. Якщо порядок рівняння динаміки динамічної ланки перевищує 2-й, то така ланка називається складною. Кожну складну ланку можна представити у вигляді набору елементарних ланок. Залежно від властивостей, всі динамічні ланки можна розділити на три групи: позиційні ланки, інтегруючі ланки, ланки, що диференціюють.

7. Позиційні ланки.

Позиційні ланки характеризуються тим, що на сталих режимах вихідний сигнал однозначно визначається рівнем вхідного сигналу:

$$\bar{y}(\infty) = f(\bar{x}) .$$

Така залежність називається позиційною або статичною.

а) Ідеальна позиційна ланка:

$$\bar{y} = K\bar{x}; \quad W(p) = K.$$

Приклад: Ричаг датчика рівня вогнегасної речовини. Переміщення кінця перемістить інший кінець.

б) Інерційна (реальна) позиційна ланка:

$$T \frac{\dot{\bar{y}}}{\bar{y}} = K\bar{x}; \quad W(p) = \frac{K}{Tp+1}$$

На рівноважному режимі швидкість вихідного сигналу дорівнює нулю, отже, вихідний сигнал пропорційний вхідному.

$$\frac{\dot{\bar{y}}}{\bar{y}}(\infty) = 0; \Rightarrow \bar{y}(\infty) = K\bar{x}.$$

Приклад: пожежний насос. Вхідний сигнал оберти від приводу, вихідний сигнал витрата води.

в) Позиційна ланка другого порядку:

$$T_1^2 \frac{\ddot{\bar{y}}}{\bar{y}} + T_2 \frac{\dot{\bar{y}}}{\bar{y}} = K\bar{x}.$$

Позначимо $\frac{T_2}{T_1} = 2d$ - декремент загасання. Рівняння динаміки прийме вид:

$$T^2 \frac{\ddot{\bar{y}}}{\bar{y}} + 2dT \frac{\dot{\bar{y}}}{\bar{y}} = K\bar{x}; \quad W(p) = \frac{K}{T^2 p^2 + 2dTp + 1}.$$

На рівноважному режимі прискорення й швидкість вихідного сигналу дорівнює нулю, отже вихідний сигнал пропорційний вхідному.

$$\frac{\ddot{\bar{y}}}{\bar{y}}(\infty) = 0; \quad \frac{\dot{\bar{y}}}{\bar{y}}(\infty) = 0; \Rightarrow \bar{y}(\infty) = K\bar{x}$$

Зауваження:

Якщо $d > 1$, ланка – аперіодична (рухома маса).

Якщо $d < 1$, ланка – коливальна (коливання вантажу на пружині).

Якщо $d = 0$, ланка – консервативна (ідеальний маятник).

8. Інтегруючі ланки.

Інтегруючі ланки характеризуються тим, що вихідний сигнал визначається інтегралом вхідного сигналу:

$$\bar{y} = \int_0^t f(\bar{x}) dt$$

Або швидкість вихідного сигналу однозначно визначається рівнем вх. сигналу:

$$\frac{\dot{\bar{y}}}{\bar{y}} = f(\bar{x})$$

а) Ідеальна інтегруюча ланка:

$$\bar{y} = \frac{1}{T} \int_0^t \bar{x} \cdot dt, \quad T \dot{\bar{y}} = \bar{x}; \quad W(p) = \frac{1}{Tp}.$$

Приклад: Датчик рівня вогнегасної речовини: вхідний сигнал витрата рідини, вихідний сигнал - рівень рідини.

б) Інерційна (реальна) інтегруюча ланка:

$$T \cdot T_1 \ddot{\bar{y}} + T \dot{\bar{y}} = \bar{x}; \quad W(p) = \frac{1}{Tp \cdot (T_1 p + 1)} = \frac{1}{Tp} \cdot \frac{1}{T_1 p + 1}.$$

Приклад: перспективна пожежна АС

3.9. Ланки, що диференціюють.

Ланки, що диференціюють, характеризуються тим, що вихідна величина визначається швидкістю вхідного сигналу:

$$\bar{y} = f(\dot{\bar{x}}).$$

а) Ідеальна ланка, що диференціює:

$$\bar{y} = K \dot{\bar{x}}; \quad W(p) = K \cdot p.$$

Вихідний сигнал подає інформацію про швидкості вхідного сигналу.

Приклад: ідеальний вимірник швидкості.

б) Інерційна (реальна) ланка, що диференціює:

$$T \dot{\bar{y}} + \bar{y} = K \dot{\bar{x}}; \quad W(p) = \frac{Kp}{Tp + 1}.$$

Приклад: реальний вимірник швидкості.

в) ланка, що форсує:

$$\bar{y} = KT \dot{\bar{x}} + K \bar{x}; \quad W(p) = K(Tp + 1).$$

Ланка, що форсує, має властивості ідеальної позиційної й ланок, що диференціює, одночасно.

10. Висновки, урахування впливу воєнного стану.

Застосування стандартних вхідних сигналів для опису вхідного сигналу в функціонуванні озброєння.

Одиничний східчастий сигнал $f(t)=1(t)$ дозволяє описати вхідний сигнал перенастройки режимів роботи озброєння. Так якщо броньована техніка з автоматичним перемиканням передачі виходить на підвищенні обороти двигуна, це відповідає сигналу перенастройки при збільшенні амплітуди вхідного сигналу. Це дозволяє автоматично вийти на наступну передачу, що автоматично покращує режим роботи двигуна та збільшити швидкість руху бронетехніки.



Так в 2021 році німецька оборонна компанія Rheinmetall оголосила про розробку роботизованого наземного транспортного засобу Rheinmetall Autonomous Combat Warrior (ACW). Цей робот-танк використовує систему контролю двигуна, та автоматично перемикає передачу, дросельну заслінку, гальма та рульове керування. Для покращення роботи двигуна в складних

умовах, реалізоване урахування вхідного східчастого сигналу швидкості $\dot{f}(t) = 1(t)$, що відповідає різким змінам впливу середовища на роботу автоматики двигуна.

Динаміка руху Rheinmetall ACW визначається характером нерівності пересічної місцевості, що описується гармонійним сигналом $f(t) = A \cos(\omega \cdot t)$, де A визначає висоту перепаду нерівностей.



Крім того зазначимо, що постріл описується імпульсним сигналом $f(t) = \delta(t)$. Таким чином, звичайний сигнал перенастройки має максимально сжатий час дії з максимальною амплітудою, що забезпечує площу імпульсної характеристики на рівні стандартного одиничного сигналу та дорівнює 1.

Застосування властивостей астатизму системи при покращенні рівня прохідності військової техніки.

Підвищена прохідність гусеничного шасі Rheinmetall ACW при зміні доріжних умов забезпечується астатизмом другого та третього порядку. Це дозволяє рухатися пересічною місцевістю з перепадами нерівностей без зміни швидкості.

Таким чином, питання що стосуються основ автоматики раннього виявлення надзвичайних ситуацій є актуальними в умовах збройної агресії РФ проти України.

Завдання на самопідготовку

1. Теорія автоматичного управління. Практикум [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» / Н.І. Бурау, Д.О. Півторак; КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – С 12-15.

https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/42076/1/TAU_praktykum.pdf

Таблиця перетворень Лапласа.

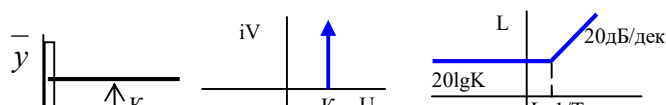
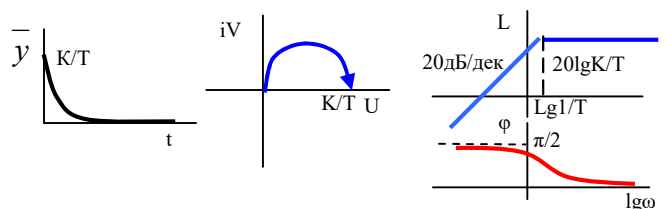
№п/п	Оригінал $f(t)$	Зображення $F(p)$
1.	$\delta(t)$	1
2.	$a \cdot \delta(t)$	a
3.	$1(t)$	$\frac{1}{p}$
4.	$a(t)$	$\frac{a}{p}$
5.	$a \cdot t^n \quad (n = 1, 2, \dots)$	$\frac{a \cdot n!}{p^{n+1}}$
6.	$\frac{t}{T} - \frac{T_1}{T} (1 - e^{-\frac{t}{T_1}})$	$\frac{1}{Tp (T_1 p + 1) p}$
7.	$\frac{a}{T} e^{-\frac{t}{T}}$	$\frac{a}{Tp + 1}$
8.	$a(1 - e^{-\frac{t}{T}})$	$\frac{a}{p(Tp + 1)}$
9.	$a(1 - \frac{T_1}{T_1 - T_2} e^{-\frac{t}{T_1}} - \frac{T_2}{T_2 - T_1} e^{-\frac{t}{T_2}})$	$\frac{a}{p(T_1 p + 1) \cdot (T_2 p + 1)}$
10.	$a \cdot (1 - \frac{1}{\sqrt{1-d^2}} e^{-\frac{t}{T/d}} \cdot \sin(\frac{\sqrt{1-d^2}}{T} t + \arctg \frac{\sqrt{1-d^2}}{d})$	$\frac{a}{p(T^2 p^2 + 2dTp + 1)}; \quad d < 1$

Таблиця перетворень Лапласа.

№п/п	Оригінал $f(t)$	Зображення $F(p)$
1	$\delta(t)$	1
2	$a \cdot \delta(t)$	a
3	$1(t)$	$\frac{1}{p}$
4	$a(t)$	$\frac{a}{p}$
5	$a \cdot t^n \quad (n = 1, 2, \dots)$	$\frac{a \cdot n!}{p^{n+1}}$
6	$\frac{t}{T} - \frac{T_1}{T} (1 - e^{-\frac{t}{T_1}})$	$\frac{1}{Tp (T_1 p + 1) p}$
7	$\frac{a}{T} e^{-\frac{t}{T}}$	$\frac{a}{Tp + 1}$

8	$a(1 - e^{-\frac{t}{T}})$	$\frac{a}{p(Tp + 1)}$
9	$a(1 - \frac{T_1}{T_1 - T_2} e^{-\frac{t}{T_1}} - \frac{T_2}{T_2 - T_1} e^{-\frac{t}{T_2}})$	$\frac{a}{p(T_1 p + 1) \cdot (T_2 p + 1)}$
10	$a \cdot (1 - \frac{1}{\sqrt{1-d^2}} e^{-\frac{t}{T/d}} \cdot \sin(\frac{\sqrt{1-d^2}}{T} t + \arctg \frac{\sqrt{1-d^2}}{d})$	$\frac{a}{p(T^2 p^2 + 2dTp + 1)}$; $d < 1$

Наименование звена	Передаточная функция W(p)	Переходная функция	Переходная характеристика	АФЧХ	ЛЧХ
Идеальное позиционное звено	K	K			
Реальное позиционное звено	$\frac{K}{Tp + 1}$	$K(1 - e^{-\frac{t}{T}})$			
Позиционное звено 2го порядка	$\frac{K}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)}$ $\frac{K}{Tp^2 + 2dTp + 1}$	$K \left[1 + \frac{T_1}{T_2 - T_1} e^{-\frac{t}{T_1}} - \frac{T_2}{T_2 - T_1} e^{-\frac{t}{T_2}} \right]$ $K \left[1 - \frac{1}{\sqrt{1-d^2}} e^{-\frac{t}{T/d}} \cdot \sin(\omega t + \alpha) \right]$ $\omega = \frac{\sqrt{1-d^2}}{T}; \alpha = \arctg \frac{\sqrt{1-d^2}}{d}$			
Идеальное интегрирующее звено	$\frac{1}{Tp}$	$\frac{1}{T} \cdot t$			
Реальное интегрирующее звено		$\frac{1}{T} \left[t - T_1 (1 - e^{-\frac{t}{T_1}}) \right]$			
Идеальное дифференцирующее звено	Kp	$K \cdot \delta(t)$	$S = K$ 		



Реальное дифференцирующее звено	$\frac{Kp}{Tp + 1}$	$\frac{K}{T} e^{-\frac{t}{T}}$			
Форсирующее звено	$K(Tp + 1)$	$KT \cdot \delta(t) + K$			