

**Лабораторна робота №3**  
**ДОСЛІДЖЕННЯ СТІЙКОСТІ САК ЗА**  
**ЧАСТОТНИМИ КРИТЕРІЯМИ**

**Мета роботи:** *Дослідити стійкість систем автоматичного керування за частотними критеріями та визначити запаси стійкості.*

**Теоретичні відомості**

Частотні критерії стійкості дозволяють судити про стійкість САК за виглядом частотних характеристик. Ці критерії є графоаналітичними. Вони одержали широке розповсюдження, оскільки дозволяють порівняно легко досліджувати стійкість систем високих порядків, мають просту геометричну інтерпретацію та наочність. Крім того, за деякими частотними характеристиками системи можна судити не тільки про стійкість, але й про якість перехідного процесу.

***Критерій стійкості Михайлова***

Цей критерій був сформульований О.В. Михайловим у 1938 році.

Візьмемо характеристичний поліном замкненої системи:

$$D(p) = a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_{n-1} p + a_n \quad (3.1)$$

Підставимо в (3.1) чисто уявне значення  $p = j\omega$ . Одержимо частотний характеристичний поліном, у якому виділимо дійсну та уявну частини:

$$D(j\omega) = X(\omega) + jY(\omega),$$

де

$$\begin{aligned} X(\omega) &= a_n - a_{n-2}\omega^2 + a_{n-4}\omega^4 - \dots, \\ Y(\omega) &= a_{n-1}\omega - a_{n-3}\omega^3 + a_{n-5}\omega^5 - \dots \end{aligned} \quad (3.2)$$

Якщо всі коефіцієнти характеристичного полінома  $a_0 \dots a_n$  відомі і задане певне значення частоти  $\omega$ , то комплекс  $D(j\omega)$  буде зображений на комплексній площині  $X(\omega)$ ,  $jY(\omega)$  у вигляді вектора, проєкції якого на дійсну та уявну осі відповідно дорівнюють  $X(\omega)$  та  $Y(\omega)$  (рис. 3.1).

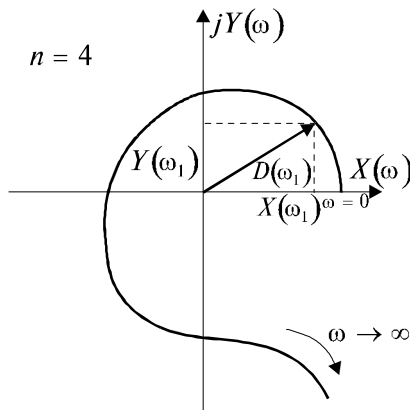


Рис. 3.1. Крива Михайлова

Якщо значення частоти  $\omega$  змінювати неперервно від нуля до нескінченності, то проєкції  $X(\omega)$  та  $Y(\omega)$  будуть змінюватися, і вектор  $D(j\omega)$  своїм кінцем опише деяку криву, яка називається кривою Михайлова (рис. 3.1).

Практично крива Михайлова будується по точках: задаються різними значеннями частоти  $\omega$ , за формулами (3.2) обчислюють  $X(\omega)$  та  $Y(\omega)$ , результати обчислень зводять у таблицю, за даними якої і будується крива.

Критерій Михайлова формулюється так: для того, щоб система автоматичного керування була стійкою, необхідно та достатньо, щоб крива Михайлова при зміні частоти  $\omega$  від 0 до  $\infty$ , беручи початок при  $\omega = 0$  на дійсній додатній півосі, обходила тільки проти годинникової стрілки послідовно  $n$  квадрантів координатної площини, де  $n$  – порядок характеристичного рівняння.

Побудувати криву Михайлова можливо також, використовуючи програмний пакет Mathcad. Розглянемо вирішення цієї задачі на прикладі. Послідовність виконання задачі наступна (синтаксис програмного пакету Mathcad збережений):

1. За заданою передатною функцією

$$W(p) = \frac{10(0.1p + 1)}{(p + 1)^2(0.05p + 1)}$$

знаходимо характеристичний поліном:

$$\begin{aligned} D(p) &:= (p + 1)^2(0.05p + 1) + 10(0.1p + 1) \text{ expand, } p \rightarrow \\ &\rightarrow 5 \cdot 10^{-2} p^3 + 1.10 p^2 + 3.05 p + 11 \end{aligned}$$

2. Зробивши заміну виду  $p = i\omega$ , знаходимо дійсну та уявну частини характеристичного поліному:

$$X(\omega) := \text{Re}(D(i \cdot \omega)); \quad Y(\omega) := \text{Im}(D(i \cdot \omega)).$$

Для нашого прикладу отримуємо наступні вирази

$$X(\omega) \text{ float, 3} \rightarrow -1.10 \cdot \omega^2 + 11;$$

$$\frac{Y(\omega)}{i} \text{ float, 3} \rightarrow -(5.00 \cdot 10^{-2}) \cdot \omega^3 + 3.05 \cdot \omega.$$

3. Змінюючи частоту від 0 до нескінченності, в нашому випадку

$$\omega := 0, 0.1..100$$

будуємо криву Михайлова (рис. 3.2).

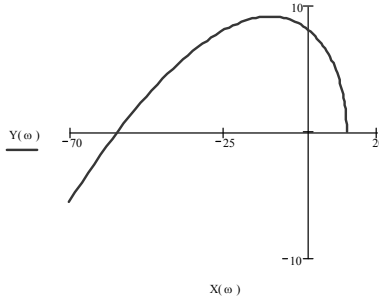


Рис. 3.2. До побудови кривої Михайлова при використанні програмного пакету Mathcad

За критерієм Михайлова задана система є стійкою.

### **Критерій стійкості Найквіста**

Цей частотний критерій стійкості, розроблений у 1932 році американським вченим Г. Найквістом, дозволяє судити про стійкість замкненої системи за виглядом амплітудно-фазової характеристики (годографа) розімкнутої системи.

Візьмемо передатну функцію розімкнутої системи:

$$W(p) = \frac{R(p)}{Q(p)} = \frac{b_0 p^m + b_1 p^{m-1} + \dots + b_m}{c_0 p^n + c_1 p^{n-1} + \dots + c_n}, \quad m \leq n. \quad (3.3)$$

Підставляючи в (3.3)  $p = j\omega$ , одержуємо частотну передатну функцію розімкнутої системи:

$$\begin{aligned} W(j\omega) &= \frac{b_0 (j\omega)^m + b_1 (j\omega)^{m-1} + \dots + b_m}{c_0 (j\omega)^n + c_1 (j\omega)^{n-1} + \dots + c_n} = \\ &= U(\omega) + jV(\omega) = A(\omega)e^{j\varphi(\omega)}, \end{aligned} \quad (3.4)$$

де  $U(\omega)$  та  $V(\omega)$  – дійсна та уявна частини частотної передаточної функції відповідно;  $A(\omega)$  – модуль частотної передаточної функції, причому

$$A(\omega) = \sqrt{U^2(\omega) + V^2(\omega)};$$

$\psi(\omega)$  – фаза частотної передатної функції, причому

$$\psi(\omega) = \text{arctg} \frac{V(\omega)}{U(\omega)}.$$

Якщо змінювати частоту  $\omega$  від 0 до  $\infty$ , то у вектора  $W(j\omega)$  буде змінюватися величина та фаза. Криву, що описується кінцем цього вектора на комплексній площині, називають амплітудно-фазовою характеристикою розімкнутої системи (рис. 3.3, а).

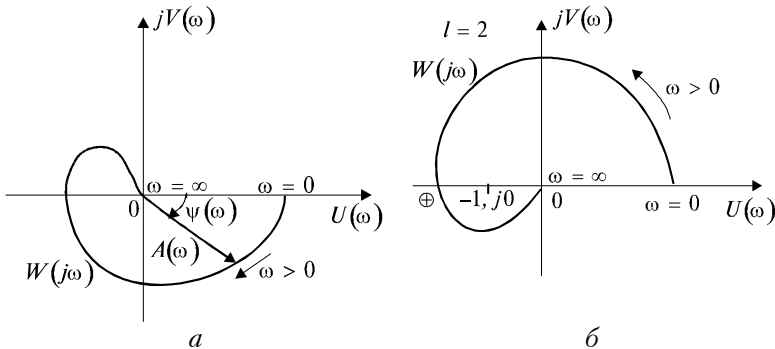


Рис. 3.3. Амплітудно-фазові характеристики розімкнутих статичних систем: а – для визначення АФХ; б – АФХ системи нестійкої в розімкнутому та стійкої в замкненому станах

Критерій Найквіста формулюється так: якщо розімкнута система автоматичного керування нестійка, то для того, щоб замкнена система була стійкою, необхідно і достатньо, щоб амплітудно-фазова характеристика розімкнутої системи  $W(j\omega)$  при зміні частоти  $\omega$  від 0 до  $\infty$ , охоплювала точку  $(-1, j0)$  в додатному напрямку (проти годинникової стрілки)  $l/2$  разів, де  $l$  – число правих коренів характеристичного рівняння розімкнутої системи (рис. 3.3, б).

Якщо характеристичне рівняння розімкнутої системи автоматичного керування не має правих коренів, то замкнута система буде стійкою, коли амплітудно-фазова характеристика розімкнутої системи  $W(j\omega)$  не охоплює точку  $(-1, j0)$ .

Після того, як побудована АФХ та з'ясовано, що система є стійкою, по віддаленню характеристики  $W(j\omega)$  від точки з координатами  $(-1, j0)$  можна визначити запас стійкості, що характеризується двома величинами: запасом стійкості за фазою та запасом стійкості за амплітудою.

Запас стійкості за амплітудою визначають як величину відрізка осі абсцис  $h$ , що знаходиться між критичною точкою  $(-1, j0)$  та точкою перетину АФХ з цією віссю:

$$h = 1 - |W(j\omega_\pi)|, \quad (3.5)$$

де  $\omega_\pi$  – частота, при якій

$$\text{Arg}W(j\omega_\pi) = -\pi.$$

З виразу (3.6) знайдемо так звану частоту зрізу  $\omega_s$ , при якій виконується умова:

$$|W(j\omega_s)| = 1. \quad (3.6)$$

Тоді запас стійкості по фазі визначається за виразом:

$$\varphi = \pi - \psi(\omega_s).$$

На рис. 3.4 показано методику визначення запасу стійкості за фазою  $\varphi$  та амплітудою  $h$  по АФХ системи.

Перевагою критерію Найквіста в порівнянні з іншими критеріями (наприклад, з критерієм Гурвіца або критерієм Михайлова) є те, що для побудови АФХ використовується така функція, яка визначається як лівою, так і правою частинами вихідного диференціального рівняння. Це дозволяє легко

розвивати цей критерій для визначення не тільки стійкості, а й якісних показників процесу керування.

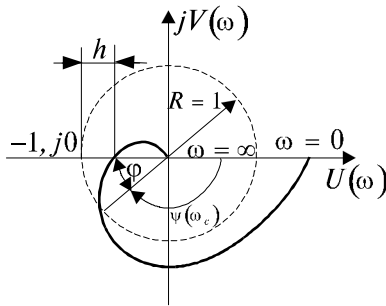


Рис. 3.4. До визначення запасу стійкості системи за фазою  $\varphi$  та амплітудою  $h$

Іншою перевагою критерію Найквіста є також можливість використання його для визначення стійкості експериментально знятих частотних характеристик системи. Це буває особливо цінним у випадках, коли за будь-яких причин важко одержати математичну модель всієї системи або окремих її блоків.

Побудувати амплітудно-фазову характеристику за критерієм Найквіста можливо також використовуючи програмний пакет Mathcad. Розглянемо вирішення цієї задачі на прикладі. Послідовність виконання задачі наступна (синтаксис програмного пакету Mathcad збережений):

1. Задаємо передатну функцію розімкненої системи

$$W(p) := \frac{10(0.01p + 1)}{(p + 1)^2(0.05p + 1)}.$$

2. Зробивши заміну виду  $p = i\omega$ , знаходимо дійсну та уявну частини частотної передатної функції відповідно:

$$U(\omega) := \text{Re}(W(1i \cdot \omega)); \quad V(\omega) := \text{Im}(W(1i \cdot \omega)).$$

3. Змінюючи частоту від 0 до нескінченності, в нашому випадку

$$\omega := 0, 0.1..1000 .$$

будуємо криву Найквіста (рис. 3.5), за якою знаходимо запаси стійкості за фазою та амплітудою.

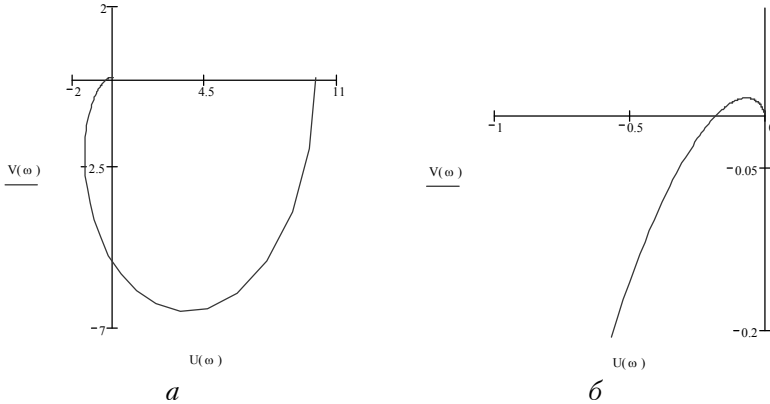


Рис. 3.5. До побудови кривої Найквіста при використанні програмного пакету Mathcad: а – повний годограф, б – годограф у точці перетину з віссю  $U(\omega)$

- Для знаходження запасів стійкості за фазою та амплітудою, знайдемо модуль частотної передатної функції  $A(\omega)$  та фазу частотної передатної функції  $\psi(\omega)$ :

$$A(\omega) := |W(1i \cdot \omega)|; \quad \psi(\omega) := \text{atan} \frac{V(\omega)}{U(\omega)}.$$

- Знайдемо, при яких частотах уявна частина частотної передатної функції  $V(\omega)$  буде обертатися у нуль:

$$V(\omega) \text{ solve, } \omega \rightarrow \left[ \begin{array}{c} 0 \\ 7.2324057067957897914 \end{array} \right].$$

- Знайдемо частоту зрізу  $\omega_3$  при якій буде виконуватись умова (3.6):



$$A(\omega) - 1 \text{ solve, } \omega \rightarrow [2.9824538077092825183].$$

7. Знайдемо запаси стійкості системи за амплітудою та фазою, використовуючи наступні вирази:

$$h := 1 - A(7.2324057067957897914) \rightarrow .82312925;$$

$$\varphi := (\pi - \psi(2.9824538077092825183)) \cdot \frac{180}{\pi} \rightarrow 30.299.$$

За критерієм Найквіста задана система є стійкою.

### ***Дослідження стійкості за логарифмічними частотними характеристиками системи***

В інженерній практиці широке розповсюдження одержав різновид критерію Найквіста, заснований на використанні логарифмічних частотних характеристик розімкнутої системи. Це зумовлено тим, що логарифмічні частотні характеристики, особливо асимптотичні, будуються практично без попереднього обчислення. В цьому випадку замість амплітудно-фазової характеристики розімкнутої системи будуються логарифмічна амплітудно-частотна характеристика (ЛАХ) та логарифмічна фазочастотна характеристика (ЛФХ) розімкнутої системи, за взаємним розташуванням яких і судять про стійкість системи.

Побудова ЛАХ проводиться за виразом:

$$L(\omega) = 20 \lg A(\omega) = 20 \lg |W(j\omega)|, \quad (3.7)$$

а ЛФХ будується за виразом:

$$\varphi(\omega) = \text{Arg} W(j\omega) = -r \frac{\pi}{2} + \text{arctg} \frac{\text{Im}(W(j\omega))}{\text{Re}(W(j\omega))}. \quad (3.8)$$

де  $r$  – порядок астатизму системи. Під знаком *arctg* знаходиться статична частина частотної передатної функції.

Графіки  $L(\omega)$  та  $\varphi(\omega)$  будуються в залежності від логарифму частоти ( $\lg \omega$ ). По осі абсцис відкладають частоту в логарифмічному масштабі, але на відмітці, яка відповідає значенню  $\lg \omega$ , пишуть значення самої частоти  $\omega$ .

Логарифмічною амплітудною частотною характеристикою називається графік залежності  $L(\omega)$  від логарифму частоти  $\lg \omega$ .

Логарифмічною фазовою частотною характеристикою називається графік залежності  $\varphi(\omega)$  від логарифму частоти  $\lg \omega$ .

Одиницею виміру є децибел, а одиницею виміру  $\lg \omega$  – декада. Декадою називається інтервал, на якому частота змінюється у 10 разів. При зміні частоти у 10 разів кажуть, що вона змінилася на одну декаду.

Вісь ординат при побудові логарифмічних частотних характеристик проводять через довільну точку, оскільки частоті  $\omega = 0$  відповідає нескінченно віддалена точка (при  $\omega \rightarrow 0$   $\lg \omega \rightarrow \infty$ ).

В таблиці 3.1 наведені ЛАХ і ЛФХ типових динамічних ланок, та формули для їх побудови.

Таблиця 3.1

Тип ланки	Формули для побудови	ЛАХ, ЛФХ
1	2	3
Пропорційна (підсилювальна)	$W(p) = k$ $L(\omega) = 20 \lg k$ $\varphi(\omega) = 0$	

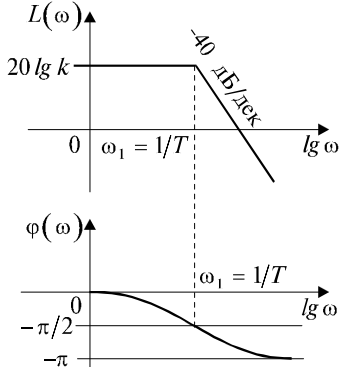
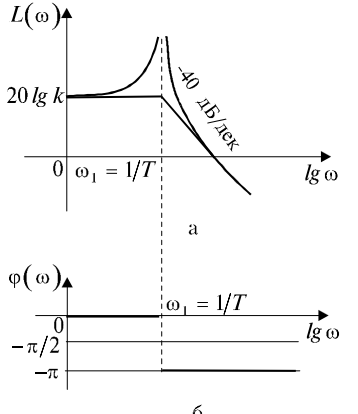
Продовження табл. 3.1

1	2	3
Інтегруюча	$W(p) = \frac{k}{p}$ $L(\omega) = 20 \lg k - 20 \lg \omega$ $\varphi(\omega) = -\frac{\pi}{2}$	<p>The figure shows two vertically aligned plots. The top plot is the magnitude plot <math>L(\omega)</math> versus <math>\lg \omega</math>. It features a straight line with a negative slope of <math>-20</math> dB/dec. The line crosses the horizontal axis at <math>\omega_0 = 1</math>. A dashed horizontal line from the y-axis at <math>20 \lg k</math> meets the plot line. The bottom plot is the phase plot <math>\varphi(\omega)</math> versus <math>\lg \omega</math>, showing a constant horizontal line at <math>-\pi/2</math>.</p>
Диференціуюча	$W(p) = kp$ $L(\omega) = 20 \lg k + 20 \lg \omega$ $\varphi(\omega) = \frac{\pi}{2}$	<p>The figure shows two vertically aligned plots. The top plot is the magnitude plot <math>L(\omega)</math> versus <math>\lg \omega</math>. It features a straight line with a positive slope of <math>+20</math> dB/dec. The line crosses the horizontal axis at <math>\omega_0 = 1</math>. A dashed horizontal line from the y-axis at <math>20 \lg k</math> meets the plot line. The bottom plot is the phase plot <math>\varphi(\omega)</math> versus <math>\lg \omega</math>, showing a constant horizontal line at <math>\pi/2</math>.</p>

Продовження табл. 3.1

1	2	3
<p>Аперіодична (інерційна першого порядку)</p>	$W(p) = \frac{k}{Tp + 1}$ $L(\omega) = 20 \lg k - 20 \lg \sqrt{1 + \omega^2 T^2}$ $\varphi(\omega) = -\text{arctg}(\omega T)$	
<p>Форсуюча</p>	$W(p) = k(Tp + 1)$ $L(\omega) = 20 \lg k + 20 \lg \sqrt{1 + \omega^2 T^2}$ $\varphi(\omega) = \text{arctg}(\omega T)$	

Продовження табл. 3.1

1	2	3
Коливальна	$W(p) = \frac{k}{T^2 p^2 + 2\xi T p + 1},$ $0 < \xi < 1$ $L(\omega) = 20 \lg k - 20 \times$ $\times \lg \sqrt{(1 - \omega^2 T^2)^2 + (2\xi T \omega)^2}$ $\varphi(\omega) = -\arctg \frac{2\xi T}{1 - \omega^2 T^2}$	 <p>The figure shows two Bode plots for a second-order underdamped system. The top plot is the magnitude <math>L(\omega)</math> in dB versus <math>\lg \omega</math>. It starts at a constant value <math>20 \lg k</math> for low frequencies. At the resonance frequency <math>\omega_1 = 1/T</math>, there is a sharp peak. After the peak, the magnitude decreases with a slope of <math>-40</math> dB/decade. The bottom plot is the phase <math>\varphi(\omega)</math> in degrees versus <math>\lg \omega</math>. The phase starts at <math>0</math> degrees at low frequencies and asymptotically approaches <math>-\pi</math> degrees at high frequencies. The phase shift is <math>-\pi/2</math> degrees at the resonance frequency <math>\omega_1 = 1/T</math>.</p>
Консервативна	$W(p) = \frac{k}{T^2 p^2 + 1}$ $L(\omega) = 20 \lg k -$ $- 20 \lg(1 - \omega^2 T^2)$ $\varphi(\omega) = \begin{cases} 0 & \text{при } \omega < \frac{1}{T} \\ -\pi & \text{при } \omega > \frac{1}{T} \end{cases}$	 <p>The figure shows two Bode plots for a second-order conservative system. The top plot is the magnitude <math>L(\omega)</math> in dB versus <math>\lg \omega</math>. It starts at a constant value <math>20 \lg k</math> for low frequencies. At the resonance frequency <math>\omega_1 = 1/T</math>, there is a sharp peak. After the peak, the magnitude decreases with a slope of <math>-40</math> dB/decade. The bottom plot is the phase <math>\varphi(\omega)</math> in degrees versus <math>\lg \omega</math>. The phase is <math>0</math> degrees for <math>\omega &lt; 1/T</math> and <math>-\pi</math> degrees for <math>\omega &gt; 1/T</math>. At the resonance frequency <math>\omega_1 = 1/T</math>, the phase is <math>-\pi/2</math> degrees.</p>

Побудова ЛАХ та ЛФХ системи докладно розглядається в [1]. Приклад побудови ЛФЧХ наведений на рис. 3.6. для передатної функції виду:

$$W(p) = \frac{k(T_2 p + 1)}{s(T_1 p + 1)(T_3 p + 1)^2}.$$

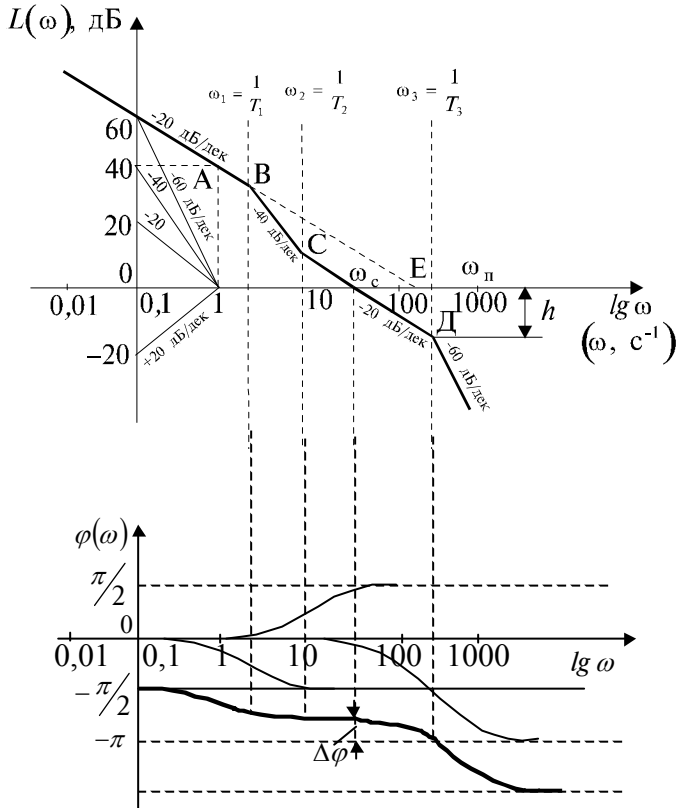


Рис. 3.6. До методики побудови ЛАХ та ЛФХ

Для стійкості замкненої системи необхідно і достатньо, щоб логарифмічна фазова характеристика при  $L(\omega) > 0$  не перетинала лінію  $\varphi(\omega) = -\pi$ , або перетинала її парне число разів.

Критичній межі стійкості відповідає випадок, коли при частоті зрізу  $\omega_3$  ( $L(\omega_3) = 0$ ) фазовий зсув  $\varphi(\omega_3) = -\pi$ .

Запас стійкості системи за фазою  $\Delta\varphi$  визначається за ЛФХ при частоті зрізу  $\omega_3$ :

$$\Delta\varphi = \pi - |\varphi(\omega_3)|. \quad (3.9)$$

Запас стійкості системи за амплітудою  $\Delta L$  визначається за ЛАХ при частоті  $\omega_\pi$ , при якій фазова характеристика перетинає лінію  $-\pi$ , тобто коли  $\varphi(\omega_\pi) = -\pi$ :

$$\Delta L = -L(\omega_\pi). \quad (3.10)$$

Для мінімально-фазових систем існує однозначний зв'язок між ЛАХ та ЛФХ, тому деякі судження про стійкість таких систем можна зробити за виглядом ЛАХ в області середніх частот, не будуючи ЛФХ:

- якщо на частоті зрізу, тобто при  $L(\omega_z) = 0$ , ЛАХ має нахил  $-20$  дБ/дек, то система є стійкою. Тому при синтезі систем методом логарифмічних частотних характеристик у так званої «бажаної» ЛАХ на частоті зрізу нахил завжди  $-20$  дБ/дек;
- якщо на частоті зрізу ЛАХ має нахил  $-60$  дБ/дек і більше, то система є нестійкою;
- якщо на частоті зрізу ЛАХ має нахил  $-40$  дБ/дек, то судити про стійкість системи тільки за ЛАХ не є можливим, оскільки така система може бути як стійкою, так і нестійкою. Однак, навіть коли система є стійкою, вона, як правило, має малий запас стійкості за фазою.

Перехід ЛФХ лінії  $-\pi$  при  $L(\omega) > 0$  знизу вверх вважається додатним, а зверху вниз – від'ємним.

Побудувати ЛАХ та ЛФХ можливо також, використовуючи програмний пакет Mathcad. Розглянемо вирішення цієї задачі на прикладі. Послідовність виконання задачі наступна (синтаксис програмного пакету Mathcad збережений):

1. Задаємо передатну функцією розімкненої системи

$$W(p) := \frac{10(0.01p + 1)}{(p + 1)^2(0.05p + 1)}.$$

2. Зробивши заміну виду  $p = i\omega$ , знаходимо функції для ЛАХ та ЛФХ:

$$\begin{aligned} L(\omega) &:= 20 \cdot \log|W(1i \cdot \omega)|; \\ \phi(\omega) &:= \operatorname{atan} \frac{\operatorname{Im}(W(1i \cdot \omega))}{\operatorname{Re}(W(1i \cdot \omega))}. \end{aligned} \quad (3.11)$$

3. Змінюючи частоту від 0 до нескінченності, в нашому випадку

$$\omega := 0, 0.1..1000$$

будуємо ЛАХ (рис. 3.7, а).

Завдяки деяким особливостям програмного пакету Mathcad за формулою (3.11) можливо знаходити лише аналітичний вираз ЛФХ. Для побудови графіка задану передатну функцію необхідно представити у вигляді набору елементарних ланок:

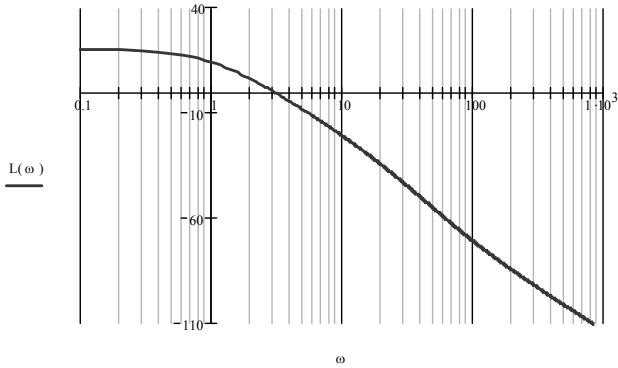
$$\begin{aligned} W1(p) &:= \frac{(0.01p + 1)}{(p + 1)}; \\ W2(p) &:= \frac{10}{(p + 1)}; \\ W3(p) &:= \frac{1}{(0.05p + 1)}, \end{aligned}$$

тоді вираз для ЛФХ можна представити у вигляді

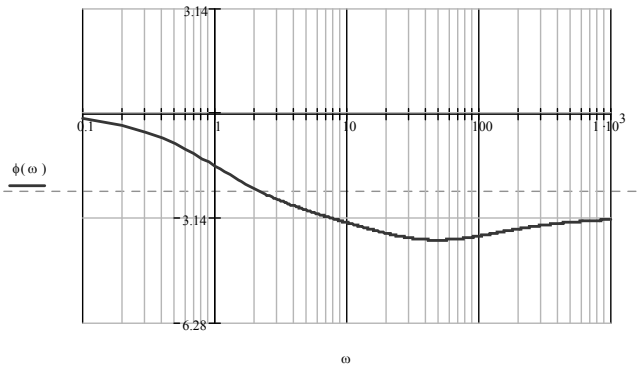
$$\begin{aligned} \phi(\omega) &:= \operatorname{atan} \frac{\operatorname{Im}(W1(1i \cdot \omega))}{\operatorname{Re}(W1(1i \cdot \omega))} + \operatorname{atan} \frac{\operatorname{Im}(W2(1i \cdot \omega))}{\operatorname{Re}(W2(1i \cdot \omega))} + \\ &+ \operatorname{atan} \frac{\operatorname{Im}(W3(1i \cdot \omega))}{\operatorname{Re}(W3(1i \cdot \omega))}. \end{aligned} \quad (3.12)$$

За виразом (3.12) будуємо ЛФХ (рис. 3.7, б).





*a*



*б*

*Рис. 3.7. До побудови ЛАХ та ЛФХ при використанні програмного пакету Mathcad: а – ЛАХ, б – ЛФХ*

4. Для знаходження запасів стійкості за фазою та амплітудою, знайдемо частоту зрізу  $\omega_3$ , при якій  $L(\omega) = 0$ , та частоту  $\omega_\pi$ , при якій  $\varphi(\omega) = -\pi$ :

$$L(\omega) \text{ solve}, \omega \rightarrow 2.9824538077092825183 ;$$

$$\varphi(\omega) - \pi \text{ solve}, \omega \rightarrow 7.2324057067957897914 .$$

5. Знайдемо запаси стійкості системи за амплітудою  $\Delta L$  та фазою  $\Delta \varphi$ , використовуючи наступні вирази:

$$\Delta L := -L(7.2324057067957897914) \rightarrow 15.047$$

$$\Delta \varphi := \left( \varphi(4472.1190728003873583) \right) \cdot \frac{180}{\pi} \rightarrow 30.299$$

Тобто задана система є стійкою і має запас стійкості за амплітудою  $\Delta L \approx 15\text{дБ}$  та запас стійкості за фазою  $\Delta \varphi \approx 30^\circ$ .

### Порядок виконання роботи

1. Запустити програму Mathcad та відкрити файл **Tau\_lab3.mcd**.
2. Згідно з варіантом завдання, визначити передатну функцію замкненої системи, а також її характеристичний поліном для системи з передатною функцією розімкнутої системи виду:

$$W1(s) := \frac{K1}{(T1 \cdot s + 1) \cdot (T2 \cdot s^2 + T3 \cdot s + 1)}$$

3. Знайти дійсну та уявну частини характеристичного поліному замкненої системи у частотній формі, та визначити стійкість САК за критерієм Михайлова.
4. Використовуючи функцію **coeffs** з отриманого характеристичного поліному виділити коефіцієнти характеристичного поліному та визначити стійкість САК за критерієм Гурвіца для отримання уяви о стійкості замкненої САК.
5. Знайти дійсну та уявну частини передатної функції розімкнутої системи у частотній формі, та визначити амплітудно-частотну та фазо-частотну функції системи.
6. Визначити частоту, при якій годограф перетинає дійсну піввісь комплексної площини, та визначити запас стійкості замкненої системи за амплітудою.
7. Визначити частоту зрізу та запас стійкості замкненої системи за фазою.
8. Зробити висновок о стійкості замкненої системи за критерієм Найквіста.
9. Побудувати ЛАХ та ЛФХ розімкнутої системи та знайти запаси стійкості.

10. Для підтвердження стійкості замкненої САК визначити вагову функцію системи та побудувати вагову характеристику.
11. Порівняти результати, отримані при виконанні пп. 3, 8, 9 та зробити висновки.

### **Контрольні запитання**

1. Сформулюйте критерій стійкості Михайлова.
2. Приведіть приклади кривих Михайлова для стійкої та нестійкої систем, а також систем, що знаходяться на коливальній межі стійкості.
3. Сформулюйте критерій стійкості Найквіста.
4. Що таке “амплітудно-фазова характеристика розімкнутої системи”?
5. Що називається запасом стійкості системи за фазою та амплітудою, і як ці величини можуть бути визначені за амплітудно-фазовою характеристикою розімкнутої системи?
6. Визначте поняття логарифмічної амплітудної частотної характеристики (ЛАХ) та логарифмічної фазової частотної характеристики (ЛФХ) розімкнутої системи.
7. Побудуйте ЛАХ та ЛФХ типових динамічних ланок.
8. Розкрийте методику побудови ЛАХ та ЛФХ за заданою передатною функцією розімкнутої системи.
9. Як досліджується стійкість системи за її ЛАХ та ЛФХ?
10. Як знайти запас стійкості системи за фазою та амплітудою за її ЛАХ та ЛФХ.