



UNIVERSITI SAINS MALAYSIA

Second Semester Examination
2017/2018 Academic Session

May/June 2018

ESA251/3 – Control System Theory
[Teori Sistem Kawalan]

Duration : 3 hours
Masa : 3 jam

Please check that this paper contains **ELEVEN (11)** printed pages included **TWO (2)** pages appendix and **FOUR (4)** questions before you begin the examination.

*[Sila pastikan bahawa kertas soalan ini mengandungi **SEBELAS (11)** mukasurat bercetak termasuk **DUA (2)** mukasurat lampiran dan **EMPAT (4)** soalan sebelum anda memulakan peperiksaan].*

Instructions : Answer **ALL** questions.

Arahan : Jawab **SEMUA** soalan].

Appendix/Lampiran:

1. Appendix A : Laplace transform table. [1 page/mukasurat]
[Lampiran A : Jadual Laplace transform].
2. Appendix B: Second order time domain specification. [1 page/mukasurat]
[Lampiran B:Spesifikasi domain masa sistem tertib kedua]

You may answer all questions in **English** OR **Bahasa Malaysia** OR a **combination of both**.

*[Calon boleh menjawab semua soalan dalam **Bahasa Malaysia** ATAU **Bahasa Inggeris** ATAU **kombinasi kedua-duanya**].*

Answer to each question must begin from a new page.

[Jawapan untuk setiap soalan mestilah dimulakan pada mukasurat yang baru].

In the event of any discrepancies, the English version shall be used.

[Sekiranya terdapat sebarang percanggahan pada soalan peperiksaan, versi Bahasa Inggeris hendaklah diguna pakai].

1. **Figure 1** shows a set-up model for an automotive suspension system. Given, the spring constant is 5 N/m and the damper coefficient is 2 N-s/m and the mass is 1 kg, (ignore gravity effect) determine:

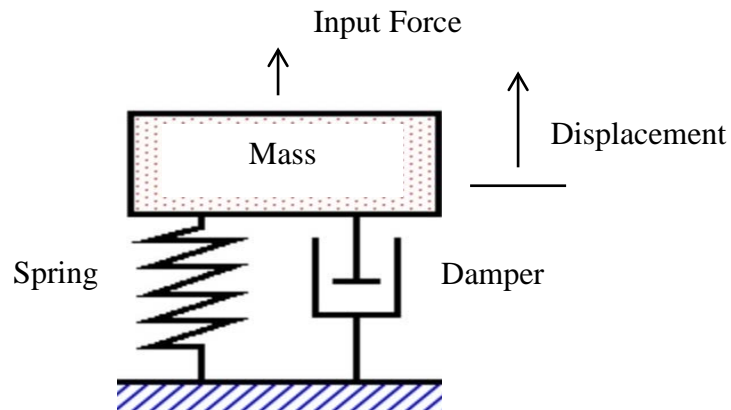


Figure 1

- [a] Using a free body diagram, model the system using ordinary differential equations and also state-space representation. **(20 marks)**
- [b] Find the system's transfer function that relates the output and the input of the system. Also solve for time domain response for a step input of $5 u(t)$ **(30 marks)**
- [c] Based on your transfer function in [b], determine the damping ratio (ζ), overshoot (OS%) and settling time (T_s) and sketch the response. Then, determine the steady state error (E_{ss}) if the system is supplied with a step input of $1 u(t)$. **(50 marks)**

2. **Figure 2** shows a system with a unity feedback. This system is controlled by a pure gain controller with gain K .

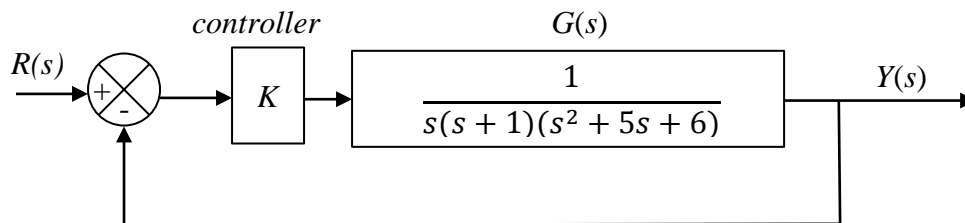


Figure 2 : A system with a unity feedback.

- [a] Obtain the range of K for close-loop systems stability. **(20 marks)**
- [b] Find the value of K that causes the system to operate at marginally stable (continuous oscillations) and determine its oscillation frequency. **(30 marks)**
- [c] Using a root locus method, find the appropriate parameters. Based on the parameters, sketch a root locus of the system as K increases from 0 to infinity on the graph paper provided. **(50 marks)**

3. A plant for a unity feedback control system is given by,

$$G(s) = \frac{K}{s(s+3)(s+15)}$$

- [a] Construct a Bode-plot of the above system on the semi-log graph paper provided, assume the initial $K=45$ (starting frequency = 0.01 rad/s).

(20 marks)

- [b] From your Bode-plot, obtain the gain margin GM, and phase margin ΦM . Determine the range of K to keep the system stable.

(30 marks)

- [c] From your Bode-plot, determine the value of K and the frequency at which the Gain Margin = 20 dB and also determine the value of K and the frequency at which the Phase Margin = 45° .

(50 marks)

4. As a control engineer, you are tasked to design a closed-loop control system to control the deflection angle (δ) of an aircraft's rudder using a servomotor. The motor is driven by a controller G_c , and the rudder angle is monitored by an encoder $H_e(s)$. The transfer function of each component is given below.

Servomotor, $G(s) = \frac{1}{s^2+4s+1}$, Controller, $G_c = 4$, Encoder, $H_e(s) = 1$

- [a] Draw a control block diagram of the system and find the static error constant K_p and the system's steady state error (E_{ss}) if a step input $R(s) = \frac{5}{s}$ is applied to the system's input.

(20 marks)

- [b] Based on your diagram in [a], propose a simple modification of the controller $G_c(s)$ to completely eliminate system's steady state error (E_{ss}) for any step inputs. Prove your answer using a step input

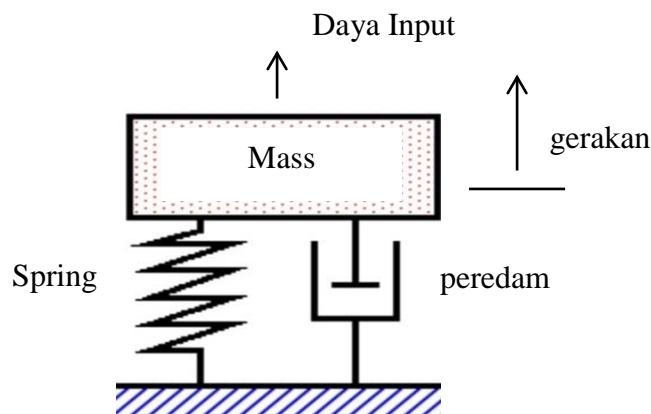
$$R(s) = \frac{10}{s}.$$

(30 marks)

- [c] If $G_c(s) = 4/(s^2+1)$, obtain the closed loop transfer function $T(s)$, then determine the stability of the system and justify your answer.

(50 marks)

1. **Gambarajah 1** menunjukkan satu sistem suspensi untuk sebuah kenderaan. Diberi, pemalar spring ialah 5 N/m dan peredam 2 N-s/m dan berat sebanyak 1 kg (abaikan kesan gravity), Kira:



Gambarajah 1

- [a] Dengan menggunakan gambarajah blok bebas, dapatkan model sistem tersebut menggunakan persamaan perbezaan dan juga dalam bentuk 'state space'.

(20 markah)

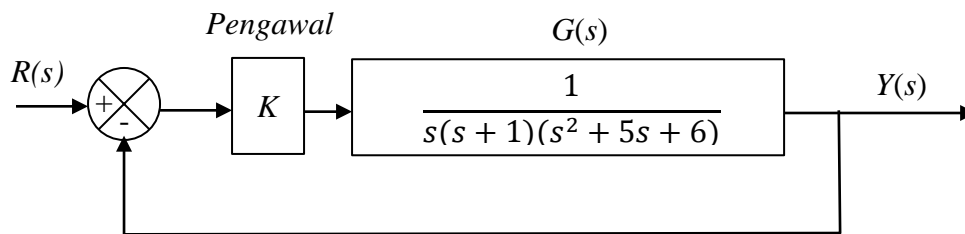
- [b] Dapatkan rangkap pindah yang mengaitkan keluaran dan masukan sistem tersebut. dan juga, hitungkan sambutan domain masa untuk masukan langkah sebanyak $5 u(t)$.

(30 markah)

- [c] Berdasarkan rangkap pindah anda di [b], dapatkan nisbah redaman (ζ), 'overshoot' (OS%) dan 'settling time' (T_s) dan lakarkan sambutan tersebut. Kemudian, uji ralat keadaan mantap (E_{ss}) jika sistem tersebut di bekalkan dengan masukan langkah sebanyak $1 u(t)$.

(50 markah)

2. **Gambarajah 2** menunjukkan satu sistem dengan suapbalik uniti. Sistem ini dikawal oleh pengawal gandaan $G_c(s)$ dengan gandaan K .



Gambarajah 2 : Sistem suapbalik uniti.

- [a] Dapatkan julat gandaan K untuk kestabilan gelung tutup.
(20 markah)
- [b] Hitungkan nilai gandaan K yang menyebabkan sistem ini beroperasi pada kestabilan marginal (ayunan berterusan) dan tentukan nilai frekuensi ayunan.
(30 markah)
- [c] Dengan menggunakan kaedah londar punca, dapatkan parameter yang berkaitan. Berdasarkan parameter tersebut, lakarkan londar punca sistem tersebut untuk nilai K bermula dari 0 sehingga infiniti.
(50 markah)

3. Satu pelan kawalan suapbalik uniti diberi seperti dibawah,

$$G(s) = \frac{K}{s(s+3)(s+15)}$$

- [a] Bina lakaran Bode-plot untuk sistem tersebut diatas kertas graf semi-log yang disediakan, anggapan gandaan mula $K=45$. (frekuensi mula $=0.01$ rad/s)

(20 markah)

- [b] Daripada lakaran Bode-plot, Hitungkan jidar gandaan, GM dan jidar fasa ϕM . Kirakan juga julat K untuk kestabilan sistem.

(30 markah)

- [c] Tentukan nilai K dan frekuensi untuk mencapai jidar gandaan $= 20$ dB dan tentukan juga nilai K dan frekuensi untuk mencapai jidar fasa $= 45^\circ$

(50 markah)

4. Sebagai jurutera kawalan, kamu ditugaskan untuk merekabentuk sebuah pengawal gelung tertutup bagi mengawal sudut pautan (δ) rudder sebuah kapal terbang menggunakan servomotor. Motor tersebut dikawal oleh sebuah pengawal G_c , dan sudut pautan sebenar rudder tersebut dipantau oleh sebuah enkoder $H_e(s)$. Rangkap pindah bagi komponen sistem tersebut diberi seperti dibawah.

Servomotor, $G(s) = \frac{1}{s^2+4s+1}$, Pengawal, $G_c = 4$, Enkoder, $H_e(s) = 1$

[a] Lukiskan gambarajah blok kawalan sistem tersebut dan kirakan nilai pemalar ralat static K_p dan ralat keadaan mantap (E_{ss}) sistem tersebut, jika satu masukan langkah $R(s) = \frac{5}{s}$ dikenakan pada masukan.

(20 markah)

[b] Berpandukan gambarajah anda dalam [a], cadangkan satu modifikasi terhadap pengawal $G_c(s)$ untuk menghapuskan ralat keadaan mantap (E_{ss}) sistem tersebut untuk sebarang masukan langkah. Buktikan jawapan anda dengan menggunakan masukan input langkah $R(s) = \frac{10}{s}$.

(30 markah)

[c] Jika $G_c(s) = 4/(s^2+1)$, Dapatkan rangkap pindah bagi gelung tutup $T(s)$, kemudian tentukan kestabilan sistem tersebut dan terangkan kewajaran tentang jawapan anda.

(50 markah)

APPENDIX A/ *LAMPIRAN A* : LAPLACE TRANSFORM TABLE

<i>Laplace transform</i>	<i>Time function</i>	<i>Description of time function</i>
1		A unit impulse
$\frac{1}{s}$		A unit step function
$\frac{e^{-st}}{s}$		A delayed unit step function
$\frac{1 - e^{-st}}{s}$		A rectangular pulse of duration T
$\frac{1}{s^2}$	t	A unit slope ramp function
$\frac{1}{s^3}$	$\frac{t^2}{2}$	
$\frac{1}{s + a}$	e^{-at}	Exponential decay
$\frac{1}{(s + a)^2}$	$t e^{-at}$	
$\frac{2}{(s + a)^3}$	$t^2 e^{-at}$	
$\frac{a}{s(s + a)}$	$1 - e^{-at}$	Exponential growth
$\frac{a}{s^2(s + a)}$	$t - \frac{(1 - e^{-at})}{a}$	
$\frac{a^2}{s(s + a)^2}$	$1 - e^{-at} - at e^{-at}$	
$\frac{s}{(s + a)^2}$	$(1 - at) e^{-at}$	
$\frac{1}{(s + a)(s + b)}$	$\frac{e^{-at} - e^{-bt}}{b - a}$	
$\frac{ab}{s(s + a)(s + b)}$	$1 - \frac{b}{b - a} e^{-at} + \frac{a}{b - a} e^{-bt}$	
$\frac{1}{(s + a)(s + b)(s + c)}$	$\frac{e^{-at}}{(b - a)(c - a)} + \frac{e^{-bt}}{(c - a)(a - b)} + \frac{e^{-ct}}{(a - c)(b - c)}$	
$\frac{\omega}{s^2 + \omega^2}$	$\sin \omega t$	Sine wave
$\frac{s}{s^2 + \omega^2}$	$\cos \omega t$	Cosine wave
$\frac{\omega}{(s + a)^2 + \omega^2}$	$e^{-at} \sin \omega t$	Damped sine wave
$\frac{s + a}{(s + a)^2 + \omega^2}$	$e^{-at} \cos \omega t$	Damped cosine wave
$\frac{\omega^2}{s(s^2 + \omega^2)}$	$1 - \cos \omega t$	
$\frac{\omega^2}{s^2 + 2\zeta\omega s + \omega^2}$	$\frac{\omega}{\sqrt{1 - \zeta^2}} e^{-\zeta\omega t} \sin[\omega\sqrt{1 - \zeta^2}t]$	
$\frac{\omega^2}{s(s^2 + 2\zeta\omega s + \omega^2)}$	$1 - \frac{1}{\sqrt{1 - \zeta^2}} e^{-\zeta\omega t} \sin[\omega\sqrt{1 - \zeta^2}t + \phi]$	
with $\zeta < 1$	with $\zeta = \cos \phi$	

APPENDIX B/ LAMPIRAN B: SECOND ORDER TIME DOMAIN SPECIFICATION
(SPESIFIKASI DOMAIN MASA SISTEM TERTIB KEDUA)

% Overshoot,
$$\% C_p = 100e^{-\left[\frac{\zeta\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}\right]}$$

Peak Time, *Masa puncak*,
$$t_p = \frac{\pi}{\omega_n \sqrt{1-\zeta^2}}$$

Settling time, *Masa pengenapan*,
$$t_s = \frac{4}{\zeta\omega_n}$$

Error Steady State, *Ralat keadaan mantap*,
$$e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{sR(s)}{1 + G(s)H(s)}$$

-000000000-