

Department of Chemical Engineering

Examination paper for TKP 4140 – Process Control

Academic contact during examination: Cristina Zotica Phone: 92290702

Examination date: 11 December 2018 Examination time (from-to): 09:00 – 13:00 Permitted examination support material: One (1) A4 double-sided piece of paper with your handwritten notes. Standard calculator.

Other information: State clearly all assumptions you make. You may answer in Norwegian or English

Language: English Number of pages (front page excluded): 5 (including Bode paper which may be handed in)

Informasjon om trykking av eksamensoppgave											
Originalen er:											
1-sidig 🛛	2-sidig □										
sort/hvit □	farger 🗆										
skal ha flervalgskjema 🗆											

Checked by:

Date

Signature

Problem 1 – Feedforward control (20%)

Feedforward control is frequently used in process control. It may however lead to problems if the model is wrong.

a) Make a block diagram with the feedforward controller $C_{\rm ff}$ included for the following case:



- b) In which situation is it advisable to use feedforward control? Also consider possible measurement delays associated with d and y.
- c) What is the transfer function for the perfect feedforward controller, C_{ff,ideal}? Why can you not always realize a perfect feedforward controller?
- d) Design a feedforward controller when the process models are G = 5 and $G_d = 3/(5s+1)$.
- e) Sketch the response in y to a step in d (d=1) for the following three cases
 - i. No control (u=0)
 - ii. With the feedforward controller from part d and no model error.
 - iii. With the feedforward controller from part d and the real plant has G = 8 and $G_d = 2/(5s+1)$.

Problem 2 . Size of mixing tank for disturbance rejection (15%).

Consider a sinusoidal temperature disturbance in the feed of magnitude ± 5 °C and frequency $\omega = 4 rad/min$, $T_F(t) = 5 \sin(\omega t)$ \Box The feed flow is $q = 1 m^3/min$. The tank is well mixed and the volume is kept constant (using a level controller which is not shown on the flowsheet). The temperature variations in the outlet flow should be less than $\pm 1^{\circ}$ C.



- a) (3%) Find the transfer function from T_F to T.
- b) (2%) What is the period P [min] of the oscillations?
- c) (10%) What should the volume of the tank be to satisfy the desired damping of the temperature disturbance?





- a) Consider the closed-loop response to a disturbance d. What are the closed-loop transfer functions from d to y and from d to u (using symbols for g and g_d)?
- b) In the following let:

$$g(s) = \frac{10 \ e^{-0.3s}}{(6s+1)^2}, \quad g_{d(s)} = k_d \ g(s)$$

Design a SIMC PI-controller for the process using "tight" tuning.

- c) Assume $k_d=1$, that is, $g_d=g$.
 - i. Plot the magnitude of g_d as a function of frequency (log-log-scale) (you may use the Bode magnitude template).
 - ii. Make a sketch of the input u(t) to a step disturbance d of magnitude 1 (|d|=1). What is the steady-state value of u?
- d) It is desired that the output change (y) should be less than 1) (|y|<1), but with the SIMC PI-controller, y(t) goes up to almost 4 before returning back to zero. Is it possible to retune the PI-controller to make y(t) acceptable? What about using PID-control?</p>

Problem 4. Mixing tank with changing control objective (40%)



You are mixing two streams. Stream 1 contains water (W), sugar (S) and some preservative (E). Your task is to mix the feed (stream 1) with pure water (stream 2) to get a product (stream 3) that satisfies:

Desired sugar content (want to keep product close to this value): $x_{s3} = 0.1$ Maximum E in product (required at all times): $x_{E3} \le 0.001$

Both these two mass fractions (x_{s3}, x_{E3}) are measured online, and the time delay for both measurements is 8 seconds. You can assume that stream 1 is the DV (disturbance) and stream 2 is the MV. The feed concentration (stream 1) varies, but nominally x_{s1} = 0.5 and x_{E1} = 0.002. The volumes of the pipes and mixer are small, so dynamics can be neglected (except for the measurement delay of 8 seconds).

- (a) (5%) Consider first the nominal case with $x_{s1}=0.5$ and $x_{E1}=0.002$. If $F_1=1$ kg/s, how large is the value of F_2 ? What are the corresponding concentrations of S and E in the product? (To solve this problem you need to make a steady-state model of the process)
- (b) (10%) Linearize the (steady-state) model of the system around the nominal point with $u = F_2$, $d = F_1$, $y_1 = x_{S3}$ and $y_2 = x_{E3}$. What are the steady-state gains from u to y_1 and y_2 ?
- (c) (5%) Suggest a control structure that handles the nominal case (draw a flow sheet).
- (d) (5%) What tunings do you suggest for a pure I-controller ($c_1 = K_I/s$) that uses u to control y_1 ?
- (e) (5%) The feed sugar concentrations has quite small variations. However, in the extreme case x_{E1} may get as high as 0.006. Consider the extreme case with x_{s1} = 0.5 and x_{E1} = 0.006. If F_1 = 1 kg/s, how large is the value of F_2 ? What are the corresponding concentrations of S and E in the product?
- (f) (10%) Suggest a control structure involving two composition controllers (for y₁ and y₂) which can handle both the nominal and extreme cases. Do you need to use anti windup?

Bode paper:

																											_									
=::::	1111	200	11	323	11	t::	:::	200	5::	: : :	53	10	See	:::	:::	:::	1::	55	: : :	1111	1: : :	:::	:::	1::	: ::	З	-20	2.5		12.5	:::	21	113	1:5	13	24
	111	200	 	323		C	:::	200	200	100	33		222		115		111	2.5	11	1111	200	:::	111	111	111	10	55	20		10	:::	č.,	1.1	110	11	11
	2.1	-j	} + }	-(-)	- 1 1	2.1.1		2.5.5	4	÷÷÷		· · ·	222		• • •]		÷ • •	200	٠÷٠		($\frac{1}{2}$ · · ·		23	-14	÷-				2.5	÷	: - }-	-11	-
	2.1.1				11						11			• • •	• • •:			:- ·:	• • •			• • •		: • •		1.1			• • •	:			111		11	17
	÷ • •								÷	÷		••••		• • •	• • •		÷		• • •			• • •		÷				÷-	• • •				÷ • •			-
	÷	i		11	11	÷		i	÷.	÷.	1.1						i	i. i	÷.		i .			i		1.1	11	i.				÷.,	i. i		11	÷.
	1.1		111	11	11			(T.	1.1		11		C C C					11		111						10	22	1				÷.	111	11		1
	1	1	: :	100	11			1	1	1	: :						:	: :	1	111	:			1	: :	11	11	1		:		:	: :	: :	11	1
	$\xi_{i,1} \in \mathcal{L}$	¹ .	6 I 6	$\mathcal{A} = \mathcal{A}$		S		5.2.2	2.5	х.,	5.2		e e e)		£	ч. н. 1		ere e				ε.,		C^{-1}	$\mathcal{F}_{\mathcal{F}}$	25				S.,	1.1	1.5	2.7	4
	:::					200	:::	222			2.2				:		:::		:::			:::		:::							:::	22				
	200		202	1.1.1	111	222			200	120	2.2				:		111	22.22	:::					:::		23				12		21	:::		11	22
• • • •								6 A A	2.2.2				·- ·- ·-		• • • •		<u>.</u>		· • ·					• • •				-1-				ч.н.				2-
	200	÷.	2.52	-1-1	99	2 Y Y		è n n	4.5	÷,	23		666		;		÷ • •	2.5	• • •		ç	• • •		÷ · ·		23	55	÷.	• • •	1	• • •	27	÷		-	÷.
	2.5.5	-0	2 - 2	-1-1	99	2.5.5		2.5.5	4.5	÷÷	23		222		· · ·;		÷	200	· ; ·		(÷		23	44	48	• • •			28	÷ - ;	:-;	33	÷-
	1	1	: :	1.1	11	1		1	1	1	11				- 1		1	11	1	111	;			1.1		11	11	1				1	1	: :	11	1
	1.1		11					577			11	÷.	111				200	÷.						1.1		11		2				2	111		11	1
	÷ .		: :	11	11			÷	÷								÷ .	: :			÷			÷ .				÷.,								1
	1		1.1												:		1	1 1						1		11							1.1		11	1
	<u>ç 1 1</u>	20 E.	939	220	199	911.	:::	5 C C.	200	: C C	12.2	11	999		111		111	22	: ; ;	1111	::::	111	111	511	111	23	22	22	:::	- 2	:::	91.	200	110	33	32
	£11.	201	<u> </u>	225	199	611.	:::	600.	200	101	10	10	999		111		111	2.25	111		211	111	111	<u>ş 1 1</u>	121	11	22	21		12	:::	61.	200	11	11	22
	c + c		e - e			e + +		0.5.5	n		1.1		e e e		,		· · ·	e 11	• • •							<u></u>	~ ~	·. ·	• • •			e 1	• • •		2.2	2.7
	200	0.5	272	100	22	222		2.5.5	100	2.1	23		222		;		: · ·	212	- : -	1111	(* * *			÷ · ·		23	20	11	• • •	12		27	111	(n)	11	11
	211	0.5	272	1110	22	222		200	111	÷.	23	101	222		· · ·;		5 F F	210	· : ·	0.000	(* * *	• • •		200		23	-212	11	• • •	12	· · ·	21	(÷ (112	11	17
	1		: : :		11				1	. :					:		:	::	. : .					1		11						<u>.</u>	1.1		11	1.
	:	1	: :	11	11	1		1	1	1	: :				- 1		:	: :	1	:::	1			1	: :	11	11	1		:		:	: :	: :	11	1
	÷	.)	2.5	440	11	2.1.1		2.2.2	÷.,	. j	44		222		;		;	5.5	.;.					÷		23	44	4.		;		2.5	; . ;	(-): 	44	닅
::::	611	se e	e e e	2,23	ιų.	611	:::	622	300	i di i	46	10	e e e		111	:::	111	e di			92.2.2	:::	2.2.2	111	111	- 65	25	22	:::	10	:::	с÷.	913	114	35	ЭĘ
	111	22.2	60 Q	223		C 1 1		022	500		20				111		111	60				111	C 1 1	111	000	0	22	22		10	:::	C.	515	10	55	17
	÷ · ·	-:	2 - 2	-1-1		200	• • •	2.5.5	÷	÷÷	23	· · · ·	222		· · ·;		÷÷÷	200	• : •			• • •		÷ • •		14	- 1	÷	• • •			28	(-	: - }	33	1-
	:		: : :	1.1	11				1.1		11				••••;		; • •	: ::	• • •					: • •	: -	11	11			;			:::	117	11	17
					11										• • •		•••		• : •			· · ·		· · ·		: 1					· · ·				11	;-
	1		1		11				1.	÷.	11						÷.,		. :		÷			1.		11	11	<u>.</u>				1			11	£
	111	217	: : <u>(</u>	200	11	6 T. T.		6.5.5	111	101	20		e e e				111	11	1	1111	1			511	1.11	10	22	1		10		£ 1.	111	200	11	27
	:	1	: :	11	11			1	1	1	: :				1		:	: :	1	: : :	:			1	: :	11	11	1		:		:	: :	: :	11	
:::	: :::	de e	:::	(z)	11	200	:::	à s s	ie :	: : :	63	:::	222		::::		:::	25	: : :	i de la la	::::	:::		÷ : :	t de	11	33	de.	:::	: 5	:::	21	111	1:2	33	늪
:::	<u>, 11</u>	28 E	s i i		÷ċ.	<u>, 11</u>	: : :	5 E E	211	: 63	d î		cëč		11	: ÷ ÷	: : :	сË	: : :			: 55	: : :	:::	: ::	ŝ	- 22	εĒ.	: : :	15	:::	ςΞ.	212	12	12	25
		4.1		-122		2.1											• • •											-1-				2				
	111	200				111		1.1	200	1	11		222				111	20	11	1111				1		÷	22	21		1		2	11	117	11	j-
	111		11	11	11			577	1.1		11		111					11						1.1		10	10	1				£ 1.				1
	111				111			2.5.5	1.1.1		11		 					11						1.1		11	11	1				67	111	11	11	1
	$\frac{1}{2} + \frac{1}{2} + \frac{1}{2}$		5 - 5	(\cdot,\cdot)	33	5 A A		$\{ i \in \mathcal{I} \}$	$\frac{1}{2} = 1$	÷.	2.3		555		:		÷	5-10	. ÷ .					÷ • •		2.3	< <	44				5.5	<u> </u>	÷	$\pm \pm$	4-
	÷ .	1	: :	11	11				÷.,	÷.,	: :		:::		- 1		1	: :	1	:::	÷ .			1		11	11	÷.,					: :		11	1
	1	1	: :	11.1	11	i i		1	1	1	11		111		- 1		1	: :	1	111	ì			1	1	11	11	i.					1 1	: :	11	1
	!	!			11	İ		ŗ	:	!	: :				:		!	: :	-		1			:				ļ				!	: :	: :		
	-	-						!	1				: :		-																					-
						!																						!								
						!																				· · ·										
									-																											· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
																																				F
	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·								· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·																											
	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·																																			
																	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·				· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·															
									· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·																											
																																				· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
																																				· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
																																				· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
																																				·····
																																				· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
																																				· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
																						· · · · ·														
																						· · · · ·														
																																				······
																															- · · · ·					
· · · ·																						· · · ·									- · · · ·					
																· · · · ·						· · · · ·														
																						· · · · ·														
																						· · · · ·														
																· · · · ·						· · · ·														
																															· · · · ·					
																· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·						· · · · ·									· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·					
																· · · · ·						· · · · ·														
																· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·						· · · · ·									- · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·					
· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·																						· · · · ·														
· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·																						· · · · ·														
· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·																						· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·														<u> </u>
· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·																																				
· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·																																				