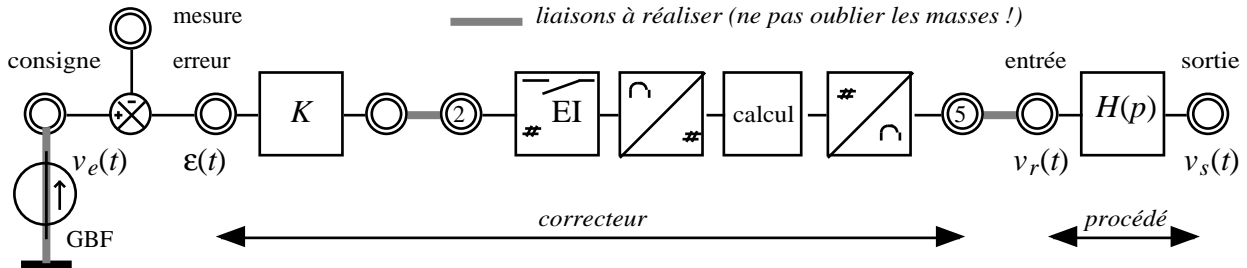


B22 - Transformée en z

But : réaliser par voie numérique la fonction régulateur analogique (P, I, PI) étudiée précédemment (voir partie A du programme, TP A22) à l'aide des techniques de Traitement Numérique des Signaux exposés dans le cours (cf §B22).

Le plan du TP est identique au TP A22, 1ère partie (on se limite ici à la correction numérique d'un système analogique du 1er ordre).

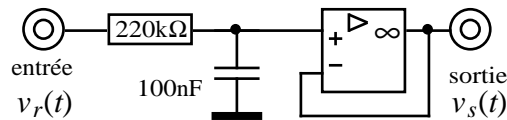
Matériel :



- Système analogique à corriger : on considère un système électrique dont la fonction de transfert $H(p)$, du premier ordre avec $\tau = R.C = 22\text{ms}$ est connue :

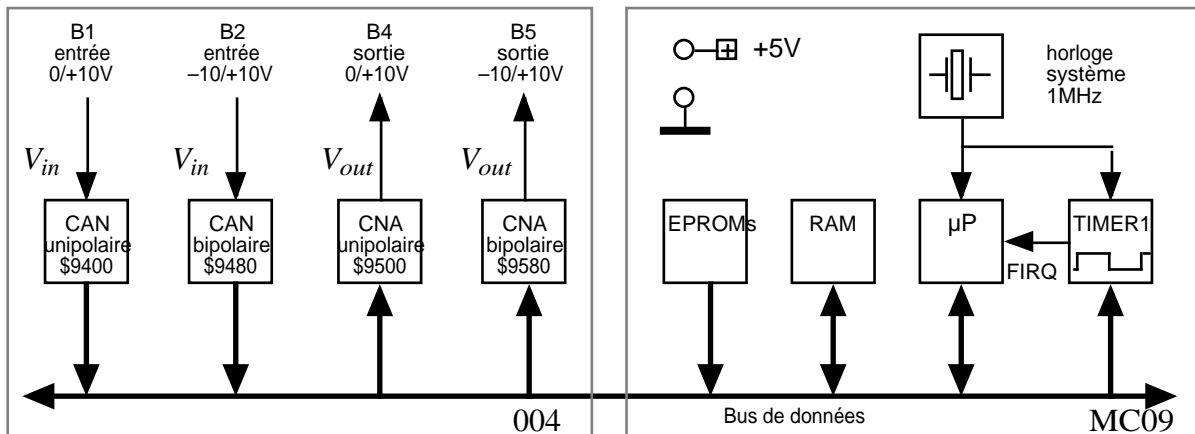
$$H(p) = \frac{V_s(p)}{V_i(p)} = \frac{1}{1 + \tau p}$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\tau}$$



- Comparateur : on dispose d'un comparateur analogique à AOP (cf TP A21) qui exécute l'opération $v_r(t) = K(v_s - v_e) = K.\epsilon$, où v_e est la "consigne" (signal d'entrée), v_s la "mesure" (signal de sortie) et v_r le signal réglant. Réaliser un amplificateur soustracteur de gain K .

- Correcteur : système numérique identique aux TP B21 et B23 :

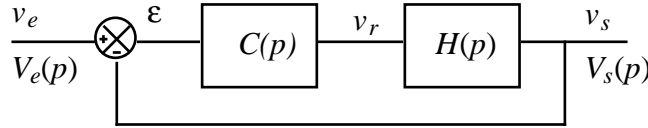


On note $C(p)$ la fonction de transfert du correcteur. Dans le TP B21 (discrétisation), on montre que le temps Δt d'acquisition et de calcul du système numérique doit être faible devant la période d'échantillonnage pour pouvoir être négligé. C'est pourquoi, pour gagner du temps, on décharge ici le microprocesseur d'une partie des calculs en reportant la multiplication par un coefficient (K) sur le comparateur analogique.

Notations

Rappel des notations en analogique (TP A22) :

- $H(p)$ fonction de transfert du système à corriger
- $C(p)$ fonction de transfert du correcteur
- $T(p) = C(p) \cdot H(p)$ fonction de transfert de la chaîne directe en boucle ouverte.
- $F(p) = \frac{T(p)}{1 + T(p)}$ fonction de transfert en boucle fermée.



En numérique :

- $H_B(z^{-1})$ fonction de transfert du système analogique à corriger avec BOZ
- $C_B(z^{-1})$ fonction de transfert du correcteur numérique avec BOZ
- $T_B(z^{-1}) = C_B(z^{-1}) \cdot H_B(z^{-1})$ fonction de transfert de la chaîne directe en b. ouverte avec BOZ
- $F_B(z^{-1}) = \frac{T_B(z^{-1})}{1 + T_B(z^{-1})}$ fonction de transfert en boucle fermée.

On pose : $\alpha = e^{-T_e/\tau}$.

Dans toute la manipulation, $v_e(t)$ est un signal carré de fréquence comprise entre 5 et 10 Hz. En boucle fermée, relier la sortie v_s à l'entrée de mesure.

I- Etude du système en BF, non corrigé : $C(p) = 1 \Rightarrow v_r(k) = \epsilon(k)$

Etude théorique :

- a) Exprimer $T_B(z^{-1})$.
- b) Exprimer $F_B(z^{-1})$ en fonction de α . On pose : $\lambda = 2\alpha - 1$.

Programmation : exécuter le programme \$AF00 (cf TP B21).

Rappel : pour saisir la période d'échantillonnage T_e , il faut inscrire (à l'aide du clavier) aux adresses \$0F00:\$0F01 (poids fort:poids faible) la quantité hexadécimale correspondant à $T_e - 1 \mu s$.

```

*          - recopie le signal d'entrée avec contrôle de
*          la période d'échantillonnage Te
*          - entrée : éch : [$00,$FF] <-> [+10V,-10V]
*              CAN : borne 2
*          - sortie : éch : [$00,$FF] <-> [+10V,-10V]
*              CNA : borne 5
itimer    EQU    $A880          sous-programme initialisation timer
cna_bi    EQU    $9580          CNA bipolaire -10/+10V (B5)
can_bi    EQU    $9480          CAN bipolaire -10/+10V (B2)
drtiml    EQU    $8802          registre de données timer 1
vfirq     EQU    $0F66          vecteur d'interruption rapide
Te        EQU    $0F00          adresse periode d'echantillonnage

AF00 30 8D 00 10      LEAX    spg5,PCR          adr s-p d'interruption
AF04 BF 0F 66        STX     vfirq          vecteur d'interruption
AF07 86 F2          LDA     #$F2          initialisation TIMER 1
AF09 BE 0F 00        LDX     $0F00
AF0C BD A8 80        JSR    itimer
AF0F 3C BF          loop5   CWAI    #10111111      autorisation et attente
AF11 20 FC          BRA     loop5          d'interruption
AF13 3F            SWI
AF14 BF 88 02      spg5   STX     drtiml          démarrage décompteur
AF17 B6 94 80      LDA     can_bi          lancement conversion CAN      5 µs
AF1A 12            NOP          attente fin conversion CAN
AF1B 12            NOP
AF1C 12            NOP
AF1D 12            NOP
AF1E 12            NOP
AF1F 12            NOP
AF20 12            NOP
    
```

AF21 12	NOP			+ 8 x 2
AF22 B6 94 80	LDA	can_bi	lecture CAN	+ 5
AF25 B7 95 80	STA	cna_bi	transfert CAN -> CNA	+ 5
AF28 3B	RTI		total :	$\Delta t = 31 \mu s$

Etude expérimentale :

Régler $K = 1$ sur le comparateur. $v_e \approx 2$ V crête à crête.

c) Soit $T_e = 0,125\tau$. Imprimer v_s . Mesurer l'erreur statique ϵ_{01} .

II- Correction proportionnelle P : $C(p) = K \Rightarrow v_r(k) = K.\epsilon(k)$ **Etude théorique :**

a) Exprimer $T_B(z^{-1})$.

b) Exprimer $F_B(z^{-1})$ en fonction de α . On pose : $\lambda = \alpha - K(1 - \alpha)$.

c) On sait (cf cours) que la condition de stabilité est que le module de la racine du dénominateur de F_B soit inférieure à 1, soit: $|\lambda| < 1 \Rightarrow -1 < K < \frac{1+\alpha}{1-\alpha}$.

Calculer les différentes valeurs limites de K pour $T_e = 0,125\tau$; $0,25\tau$; $0,5\tau$; τ .

Programmation : exécuter le programme \$AF00.

Etude expérimentale de la précision : influence de K

Soit $T_e = 0,125\tau$

d) Imprimer v_s et mesurer l'erreur statique ϵ_{01} pour $K = 1, 2, 4, 8, 16, 32$. Conclusion : à partir de quelle valeur de K le système devient-il instable ?

Etude expérimentale de la stabilité : influence de T_e

Soit $K = 4$.

e) Imprimer v_s pour $T_e = 0,125\tau$; $0,25\tau$; $0,5\tau$; τ . Conclusion : même question.

III- Correction intégrale pure I : $C(p) = \frac{K}{T_i p}$ **Etude théorique :**

a) Exprimer $C_B(z^{-1})$. On pose : $K' = K \cdot \frac{T_e}{T_i}$

b) En déduire l'algorithme de calcul : $v_r(k) = f(\epsilon(k-1), v_r(k-1))$.

c) Exprimer $T_B(z^{-1})$.

d) Exprimer $F_B(z^{-1})$ en fonction de α . On pose : $\lambda = \alpha + K'(1 - \alpha)$.

Programmation : exécuter le programme \$AF29.

Le début du programme (initialisation) est identique au programme \$AF00. Le sous-programme d'acquisition est modifié comme suit :

AF29 30 8D 00 10	LEAX	spg6,PCR	adr s-p d'interruption	
.../...	.../...			
AF3C 3F	SWI			
AF3D BF 88 02	spg6	STX	drtim1	démarrage décompteur
.../...	.../...			
AF4B B6 94 80	LDA	can_b	lecture CAN	26 μs
AF4E 88 80	EORA	00000000	conv bin décalé -> 2's comp	+ 2
AF50 BB 0F 02	ADDA	0F02	(variable interne)	+ 5
AF53 B7 0F 02	STA	0F02		+ 5
AF56 88 80	EORA	00000000	conv 2's comp -> bin décalé	+ 2
AF58 B7 95 80	STA	cna_bi	transfert CAN -> CNA	+ 5
AF5B 3B	RTI		total :	$\Delta t = 45 \mu s$

Etude expérimentale de la précision et du temps de réponse

e) On choisit $T_e = 0,125\tau$. En analogique (TP A22), on avait choisi $T_i = 10\tau$ et $K = 10$. Calculer K' . Régler K' à cette valeur sur le comparateur.

f) Choisir $5V < v_e$ crête à crête $< 10V$. Imprimer v_s et mesurer l'erreur statique ϵ_{01} , le dépassement D (en %) et le temps de réponse à 5% t_r . Conclusion.

g) *Stabilité* : on montre (voir cours) que le système est stable tant que $K' < 2 \frac{1+\alpha}{1-\alpha}$. Vérifier expérimentalement ce résultat théorique.

IV- Correction proportionnelle et intégrale PI : $C(p) = K \left(1 + \frac{1}{T_i p} \right)$

Etude théorique :

a) Exprimer $C_B(z^{-1})$

b) En déduire l'algorithme de calcul : $v_r(k) = f(\epsilon(k), \epsilon(k-1), v_r(k-1))$.

c) A.N. : pour limiter la complexité du programme de calcul, on choisit $\alpha = 7/8$. En déduire la valeur de T_e en fonction de τ .

d) Exprimer $T_B(z^{-1})$.

e) On choisit un réglage simple : $\alpha = 1 - \frac{T_e}{T_i}$. En déduire la valeur de T_i en fonction de τ et

l'expression simplifiée de $T_B(z^{-1})$.

f) Exprimer $F_B(z^{-1})$ en fonction de α . On pose : $\lambda = 1 - K(1 - \alpha)$.

g) Calculer la condition de stabilité sur K pour la valeur de T_e calculée en c), sachant que le système est stable si $K < \frac{2}{1-\alpha}$.

Programmation : exécuter le programme \$AF5C.

```

vk_1 EQU $0F02      adresse de Vi(k-1)
ek EQU $0F03        adresse de e(k)
ek_1 EQU $0F04      adresse de e(k-1)
uk_1 EQU $0F05      adresse de u(k-1) = Vi(k-1) - e(k-1) + e(k-1)/7
...
NOP
LDB can_bi          lecture CAN de e(k) 21
EORB #10000000     binaire decale -> compl. a 2 +5
STB ek              sauv. e(k) +2
ADDB uk_1          e(k) + u(k-1) +5
EORB #10000000     compl. a 2 -> binaire decale +2
STB cna_bi         transfert CAN -> CNA : Vi(k) +5 Δt = 50μs
LDA vk_1           Vi(k-1)
EORB #10000000     binaire decale -> compl. a 2
STB vk_1           sauv. Vi(k) à la place de Vi(k-1)
SUBA ek_1          Vi(k-1) - e(k-1)
ASR ek_1           /2 avec conservation du signe
ASR ek_1           /2
ASR ek_1           /2
ADDA ek_1          Vi(k-1) - e(k-1) + e(k-1)/8
STA uk_1           sauv. u(k-1)
LDA ek             Vi(k-1) - e(k-1) + e(k-1)/8
STA ek_1           sauv. e(k) à la place de e(k-1)
RTI

```

Etude expérimentale de la précision et de la stabilité : influence de K

(NB : ne pas oublier de saisir la valeur hexadécimale de T_e calculée en c)

h) Imprimer v_s et mesurer l'erreur statique ϵ_{01} , le dépassement D (en %) et le temps de réponse à 5% t_r pour $K = 1, 2, 4, 8, 16, 32$. Conclusion.

i) Vérifier expérimentalement la valeur maximale de K calculée en g) pour que le système reste stable.