

Be chaîne d'acquisition et commande **numérique**

Projet : Asservissement de courant d'une **trottinette.**



Sommaire :

I. Introduction

II. Schéma blocs

III. Fonctions de transfert des différents blocs

1. Moteur +Hacheur

2. Filtre

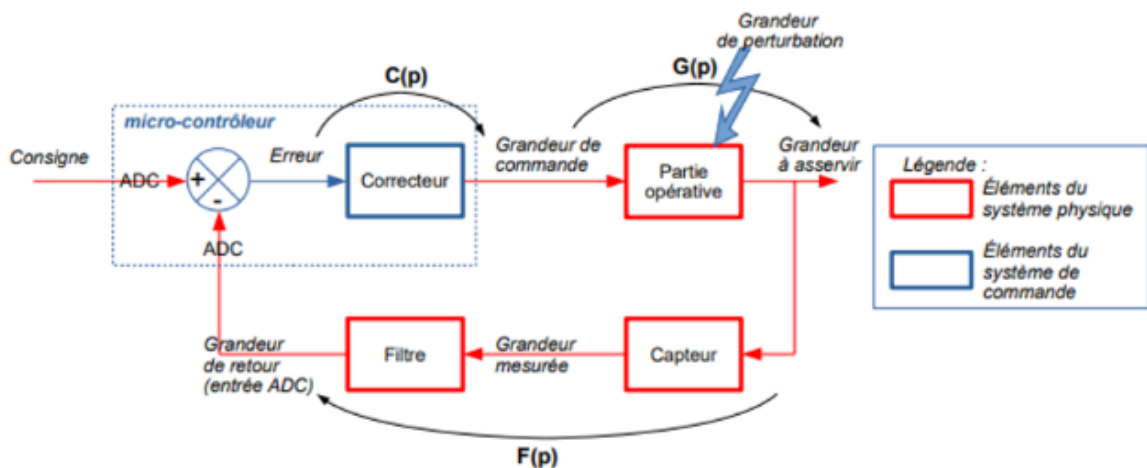
IV. Correcteur

I. Introduction :

Dans le cadre de ce bureau d'étude, nous allons travailler sur la commande d'une trottinette électrique commandée par deux commandes, soit par asservissement en vitesse ou bien asservissement en courant.

En lisant les documents fournis, nous comprenons de suite qu'on s'intéresse ici à l'asservissement en courant. Nous comprenons aussi que le but final est de mettre en place un correcteur pour commander le moteur de la trottinette à partir de l'erreur entre la consigne fournie et le résultat mesuré par le capteur de courant.

Pour ne pas parler dans l'abstrait, la figure ci-dessous montre le schéma fonctionnel de notre asservissement (les blocs détaillés seront présentés dans la partie II de ce compte rendu).



N.B :

Le correcteur qu'on va étudier ici est un correcteur numérique qui sera implanté directement dans le STM32 de la carte de puissance.

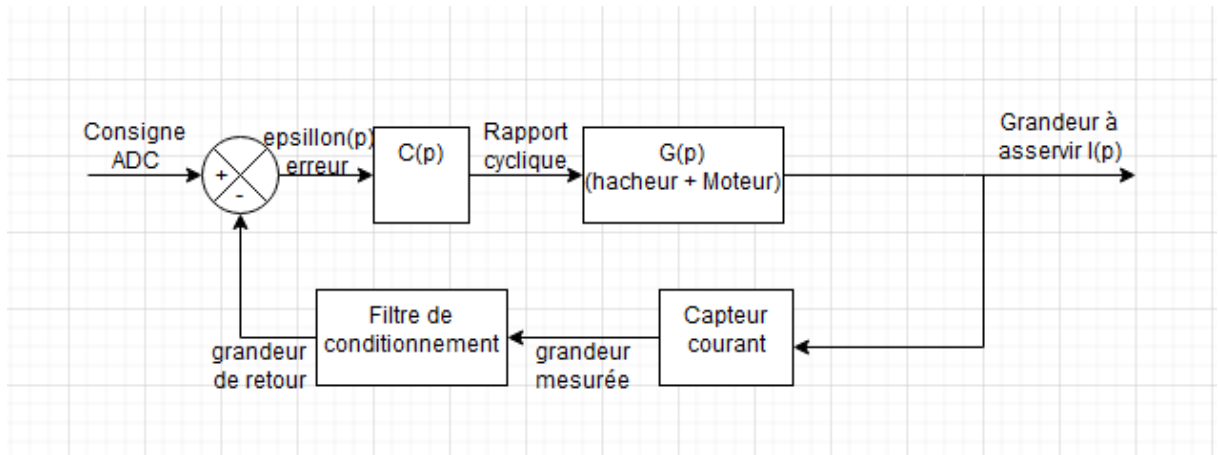
Guide de la méthode utilisé pour l'asservissement :

1. Identification de la fonction de transfert qui donne la grandeur à asservir à partir de la grandeur de commande.
2. Identification de la fonction de transfert qui donne la grandeur mesurée et filtrée entrée dans l'ADC en fonction de la grandeur à asservir.
3. Synthèse du correcteur à la main en respectant les spécifications du système $C(p)$, et détermination de $C(z)$ par l'approximation de la transformée bilinéaire.
4. Simulation Matlab afin de confirmer les calculs et les affiner.
5. Test du correcteur PI par simulation sous KEIL
6. Implémentation de ce qu'on a fait sur la trottinette et test

Les différentes grandeurs physiques de la trottinette vont être rappelées au fur et à mesure dans les différentes sous parties. Pour plus d'informations, veuillez se référer au dossier de la trottinette ainsi que les autres ressources présentes sur Moodle.

II. Schéma blocs

Le schéma bloc du système détaillé tracé sur draw.io est le suivant :



Légende :

- **G(p)** : est la fonction de transfert qui donne la grandeur à asservir à partir de la grandeur de commande.
- **F(p)** : est la fonction de transfert du filtre de conditionnement.
- **C(p)** : Il s'agit du correcteur qu'on réalisera. Il s'insère entre la consigne, la grandeur de retour, et la commande du système.

N.B : On retracera le schéma blocs après chaque modification faite, notamment pour réduire la chaine de retour.

III. Fonctions de transfert des différents blocs

1. Moteur + hacheur :

Le modèle électrique du moteur à courant continu est le suivant :

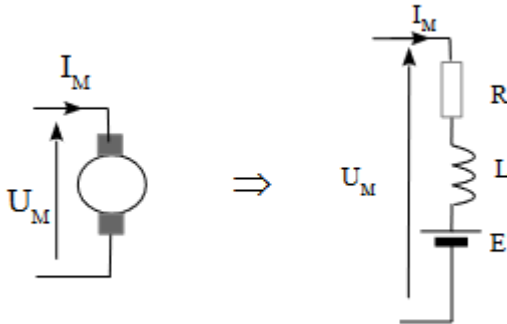
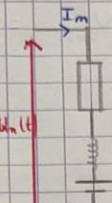


Figure 6 : Modèle de la MCC

Calcul pour trouver la fonction du transfert du moteur :

I - moteur

moteur à courant continu \Leftrightarrow  $\Leftrightarrow U_m(t) = R I_m(t) + L \frac{dI_m(t)}{dt} + E(t)$

$$\Rightarrow U_{m0} + \tilde{U}_m(t) = R (I_{m0} + \tilde{I}_m(t)) + E_0 + \tilde{E}(t) + L \frac{d\tilde{I}_m(t)}{dt}$$

Donc $U_{m0} = R I_{m0} + E_0$ et $\tilde{U}_m(t) = R \tilde{I}_m(t) + \tilde{E}(t) + L \frac{d\tilde{I}_m(t)}{dt}$

$$\frac{1}{L} (\tilde{U}_m(t) - \tilde{E}(t)) = \frac{R}{L} \tilde{I}_m(t) + \frac{d\tilde{I}_m(t)}{dt}$$

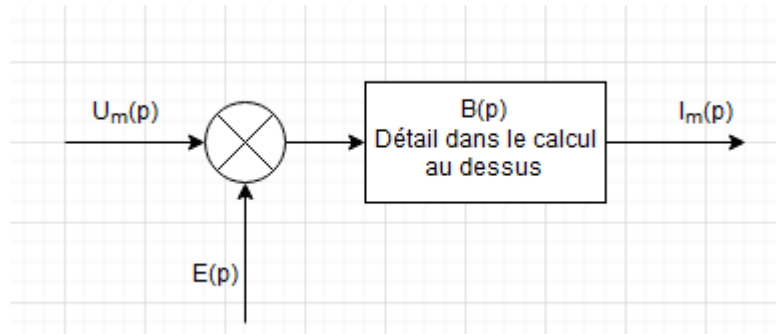
\Rightarrow On passe en p : $\frac{1}{L} (U(p) - E(p)) = \frac{R}{L} I_m(p) + I_m(p) \cdot p$

$$\underbrace{\frac{1}{L} (U(p) - E(p))}_{\text{entrée}} = \underbrace{I_m(p) \left(\frac{R}{L} + p \right)}_{\text{sortie}}$$

$$\Rightarrow \frac{U(p)}{L} - \frac{E(p)}{L} = I_m(p) \left(\frac{R+Lp}{L} \right) \Rightarrow I_m(p) = (U(p) - E(p)) \times \frac{1/R}{1 + L/R p}$$

donc au final on a $\frac{I_m(p)}{U(p) - E(p)} = \frac{1/R}{1 + \frac{L}{R} p} = B(p)$

Le schéma bloc qui caractérise la fonction de transfert du moteur est le suivant :



En ce qui concerne le hacheur, en s'appuyant sur la slide 9 du PDF sur l'introduction des hacheurs on a :

Pour le hacheur :

slide 9 : $V_{B0} = \alpha_B U_{BATT} = (1 - \alpha_A) U_{BATT}$

$$\Rightarrow U_M = V_{A0} - V_{B0} = \alpha_A U_{BATT} - (1 - \alpha_A) U_{BATT}$$

$$U_M = U_{BATT} (2\alpha_A - 1)$$

Au repos, on a $U_M = 0 \Rightarrow 2\alpha_A = 1 \Rightarrow \alpha_0 = 1/2$.

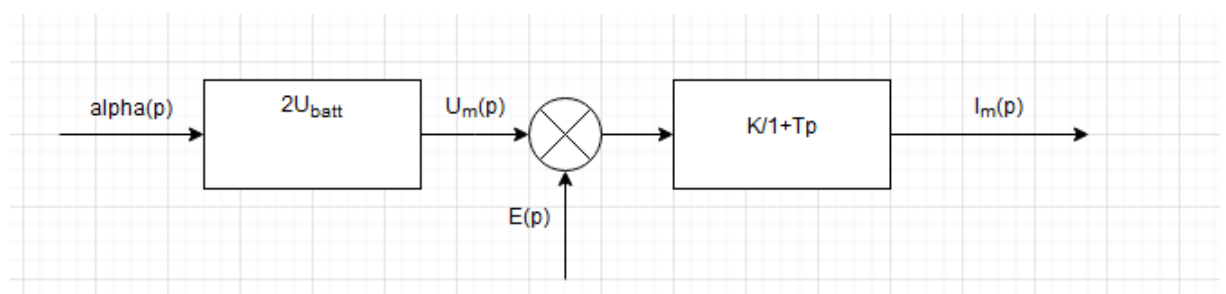
Or, $U_{m0} + \tilde{U}_m(t) = 2((\alpha_0 + \tilde{\alpha}(t)) - 1) U_{BATT}$

$$= 2(1/2 + \tilde{\alpha}(t) - 1) U_{BATT}$$

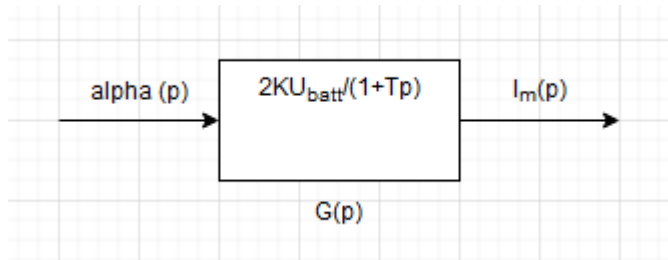
$$\Rightarrow \tilde{U}_m(t) = 2\tilde{\alpha}(t) U_{BATT}$$

$$\Rightarrow \frac{\tilde{U}_m(t)}{\tilde{\alpha}(t)} = 2U_{BATT} = H(p)$$

Le schéma bloc du hacheur est le suivant :



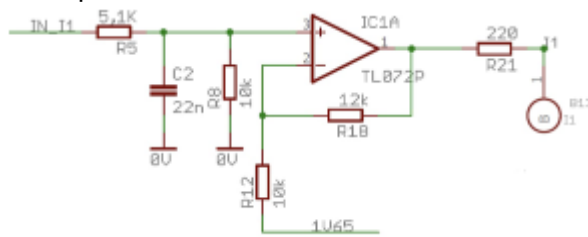
Qui peut se réduire en :



On trouve donc que la fonction de transfert du moteur + hacheur est : $G(p) = \frac{2U_{batt} \cdot K_0}{1 + \tau_0 \cdot p}$

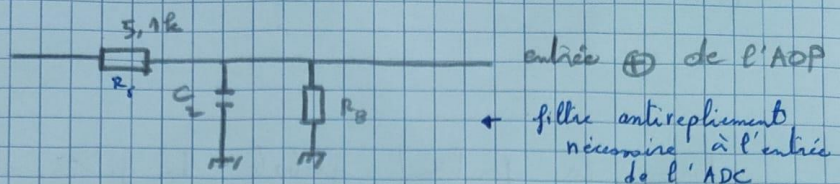
2. Filtre :

En ce qui concerne le filtre on se confie au schéma suivant :

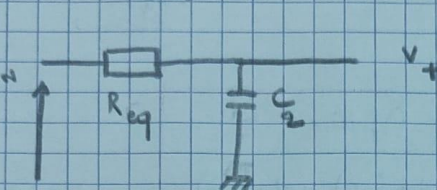


Le calcul de la fonction de transfert de ce filtre est comme suite :

• entrée \oplus du TL072P



→ filtre antirepliement
nécessaire à l'entrée
de l'ADC



$$\text{ici } R_{eq} = R_5 \parallel R_B$$

$$R_{eq} = \frac{R_5 R_B}{R_5 + R_B}$$

donc

$$V_+ = \frac{1}{1 + R_{eq} C_2 p} \times \frac{R_B}{R_5 + R_B} V_{IN}$$

• entrée \ominus du TL072P

Il s'agit d'une entrée non inverseuse du TL072P

$$V_- = \frac{R_{12}}{R_{12} + R_{18}} V_S$$

L'AOP est parfait donc $\epsilon = 0$ $\Rightarrow V_+ = V_-$

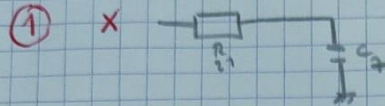
donc

$$\frac{R_{12}}{R_{12} + R_{18}} V_S = \frac{1}{1 + R_{eq} C_2 p} \times \frac{R_B}{R_5 + R_B} V_{IN}$$

donc ① $\frac{V_s}{V_{in}} = \frac{1}{(1 + R_{eq} C_2 p)} \times \frac{R_0}{R_3 + R_0} \times \left(1 + \frac{R_0}{R_2}\right)$

$$R_{eq} = \frac{R_0 R_1}{R_0 + R_1}$$

Après l'AOP on a un filtre cascadié avec adaptation de tension



donc on peut multiplier les fonctions de transfert

donc la fonction globale du filtre est

$$F(p) = ① \times \frac{1}{1 + R_2 C_2 p}$$

on pose $\tau_2 = R_2 C_2$

$$\tau_1 = R_{eq} C_1$$

$$F(p) = \frac{K_{\text{filtre}}}{(1 + \tau_1 p)(1 + \tau_2 p)}$$

$$K_{\text{filtre}} = \frac{R_0}{R_3 + R_0} \left(1 + \frac{R_0}{R_2}\right)$$

Pour réduire le retour on associe les deux blocs



↓ devient

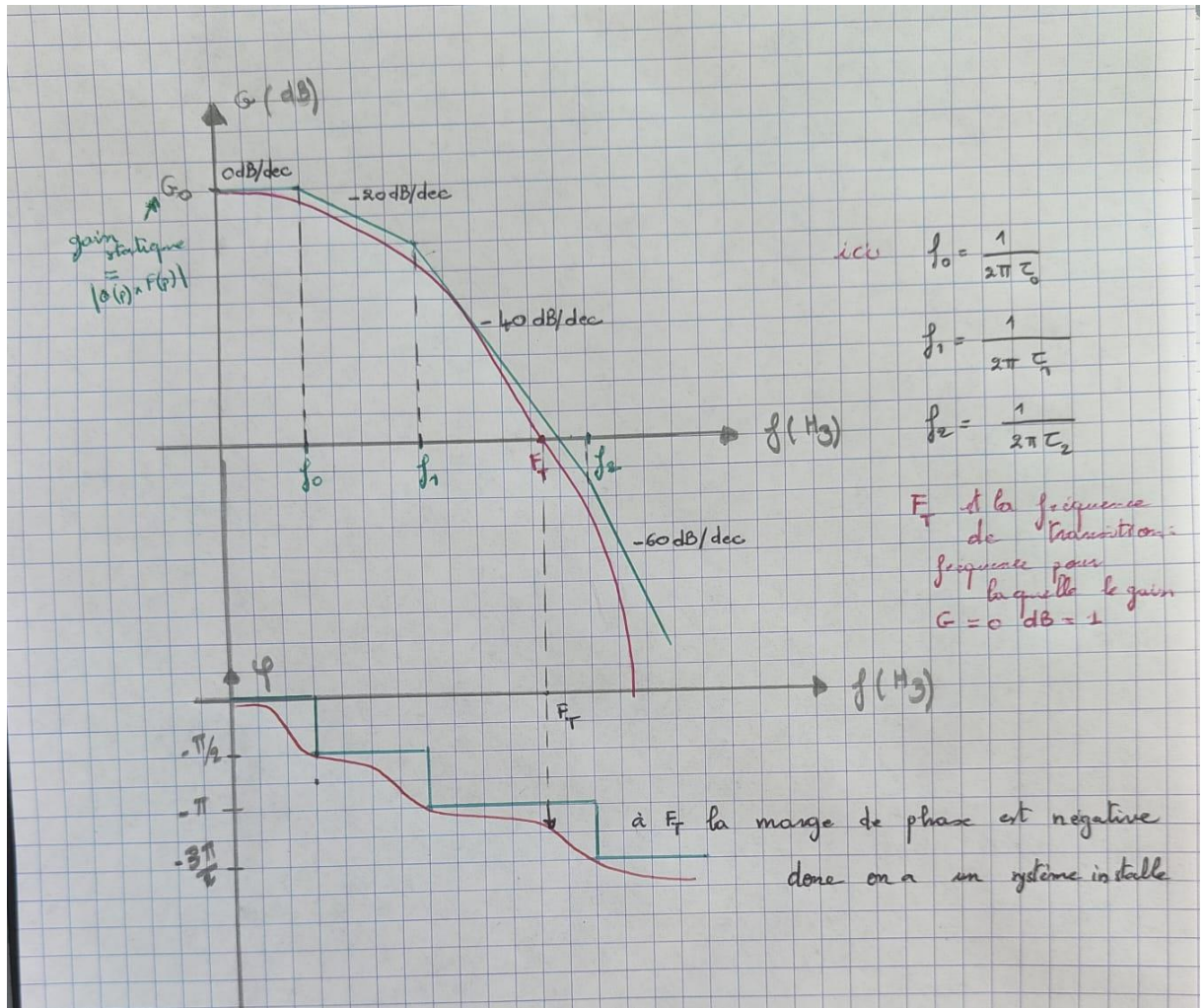


ici $R(p) = F(p) \times \text{sensibilité capteur}$

$$R(p) = \frac{K_{\text{filtre}}}{(1 + \tau_1 p)(1 + \tau_2 p)} \times S$$

IV. Correcteur :

Pour étudier la stabilité de notre système on trace le diagramme de bode de la fonction de transfert du système complet sans correcteur (c'est-à-dire $\mathbf{G(p)*F(p)}$).



Vu que le système est instable on décide d'utiliser un correcteur.

Question : Quel correcteur ?

1^{ère} approche : On décide dans un premier lieu d'utiliser un simple gain K comme correcteur tel que $C(p)=K$. On calcule alors l'erreur à l'infini et on utilise le théorème des valeurs finales.

On sait que $E(p) = V_{\text{consigne}}(p) - V_{\text{retour}}(p)$ ①

or $V_{\text{retour}}(p) = E(p) \times C(p) \times G(p) \times R(p)$

on remplace dans ①.

$$E(p) = V_{\text{consigne}}(p) - E(p) \times G(p) \times C(p) \times R(p)$$

alors $V_{\text{consigne}}(p) = E(p) (1 + C(p) \times G(p) \times R(p))$

$$\Rightarrow E(p) = \frac{V_{\text{consigne}}(p)}{1 + C(p) \times G(p) \times R(p)}$$
$$\Rightarrow \lim_{p \rightarrow 0^+} p E(p) = \lim_{t \rightarrow \infty} E(t) = \lim_{p \rightarrow 0} p \frac{V_{\text{consigne}}(p)}{1 + C(p) \times G(p) \times R(p)}$$

Annotations: $\frac{V_0}{p}$ points to $V_{\text{consigne}}(p)$; K_c points to $C(p)$; $2KU_{\text{Batt}}$ points to $G(p)$; $\frac{K_{\text{filte}} s}{1 + \tau s}$ points to $R(p)$.

$$\Rightarrow E(p) = \frac{V_0}{1 + K_c \times 2KU_{\text{Batt}} \times \frac{K_{\text{filte}} s}{1 + \tau s}}$$

ici $E(p) \rightarrow 0$ si K_c est très grand (si $K_c \rightarrow +\infty \Rightarrow$ on aura un pb de stabilité car la fréquence de transition F_T va se décaler vers la droite.

Donc correcteur simple $C(p) = K$ ne convient pas.

2^{ème} approche : Au lieu de choisir un correcteur simple de type gain on prend un PI

$$C(p) = \left(\frac{K_i}{p} + K_0 \right)$$

On pose alors

on pose $C(p) = \frac{K_i}{p} + K_0$

Donc il doit être de la forme suivante : $C(p) = \frac{1 + \tau_3 p}{\tau_4 p}$

on cherche maintenant à trouver la valeur de τ_3 et τ_4

on sait que la fonction de transfert en BO s'écrit

$$HBO = C(p) \times G(p) \times R(p)$$

$$HBO = \frac{1 + \tau_3 p}{\tau_4 p} \times \overset{\text{2^{ème} ordre}}{G_0} \times \frac{K_{f, \text{filte}} s}{(1 + \tau_1 p)(1 + \tau_2 p)}$$

On souhaite éliminer les pôles dominants (les pôles lents) on prend

alors $\tau_3 = \tau_0$

la fonction de transfert en BO devient

$$HBO = \frac{G_0 \times K_{f, \text{filte}} \times s}{\tau_4 p (1 + \tau_1 p) (1 + \tau_2 p)}$$

\downarrow inconnus \downarrow sont connus

But : trouver τ_4

on a $f_1 = \frac{1}{2\pi \tau_1} = 2,14 \text{ kHz}$

$f_2 = \frac{1}{2\pi \tau_2} = 32,8 \text{ kHz}$

on a $HBO(p) = HBO(j2\pi f) = \frac{G_0 \times K_{f, \text{filte}} \times s}{(j2\pi f \tau_4) (1 + j2\pi f \tau_1) (1 + j2\pi f \tau_2)}$

donc $HBO(j2\pi f) = \frac{G_0 \times K_{f, \text{filte}} \times s}{(j \frac{f}{f_4}) (1 + j \frac{f}{f_1}) (1 + j \frac{f}{f_2})}$

donc $|HBO(j2\pi f_T)| = \frac{G_0 \times K_{f, \text{filte}} \times s}{\frac{f_T}{f_4} \sqrt{1 + \left(\frac{f_T}{f_1}\right)^2} \sqrt{1 + \left(\frac{f_T}{f_2}\right)^2}} = 1$

donc $f_4 = \frac{f_T}{G_0 \times K_{f, \text{filte}} \times s} \quad \text{Eq} \quad f_T = 4 \times 10^3 \text{ Hz}$

Alors $C(p)$ est de la forme:

$$C(p) = \frac{1 + C_3 p}{C_4 p}$$

avec $C_3 = C_0 = \frac{L}{R}$

et $C_4 = \frac{1}{2\pi f_u} = \frac{2U_{Batt} K \times K_{p, \text{pilot}} \times s}{2\pi f_T}$

$$C_4 = \frac{U_{Batt} \times K \times K_{p, \text{pilot}} \times s^2}{\pi f_T}$$