



به نام خدا

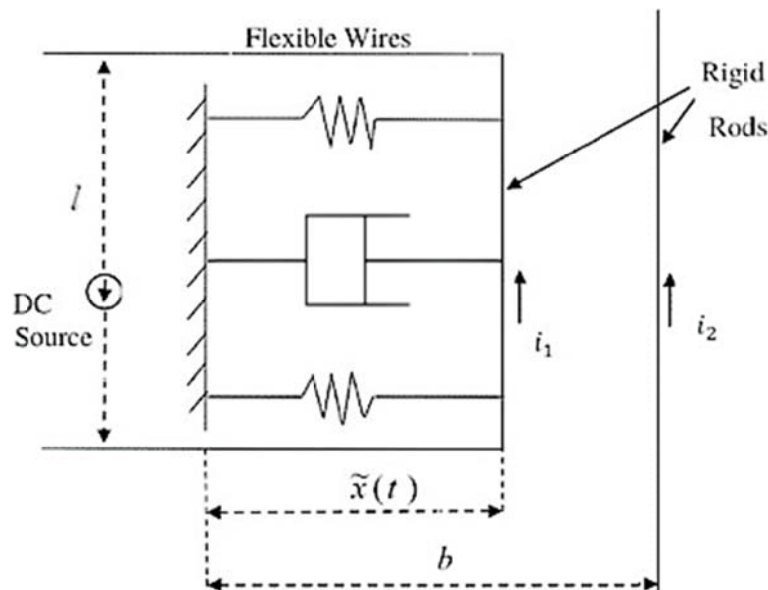
دانشگاه صنعتی شریف - دانشکده برق

گروه کنترل - کنترل دیجیتال

شبیه‌سازی چهارم

ارائه ۱۴۰۰/۱۰/۶ برگشت (سر جلسه امتحان)

سیستم میکرو الکترومکانیکی^۱ دارای سیم حامل جریان را مطابق شکل زیر در نظر بگیرید.



شکل ۱. شماتیک سیستم میکرو الکترومکانیکی [1].

در مگنتو استاتیک^۲، نیروی جاذبه یا دافعه بین دو سیم حامل جریان قانون نیروی آمپر نامیده می‌شود. منشأ این نیرو بخاطر ایجاد میدان مغناطیسی هر سیم حامل جریان و ایجاد نیروی مغناطیسی روی سیم حامل جریان دیگر است. این نیرو برای هر سیم به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$F = \frac{\mu_0 i_1 i_2 l}{2\pi(b-\tilde{x})} \quad (1)$$

μ_0 ثابت مغناطیسی، i_1 و i_2 جریان سیم‌ها و $b - \tilde{x}$ فاصله‌ی بین دو سیم است. این نیرو سبب حرکت یک سیم حامل جریان به طول l و با جرم M در میدان یک هادی حامل جریان و مهار شده توسط فنرهای خطی، می‌شود. حال می‌توان معادلات دینامیکی حاکم بر حرکت سیم را به صورت زیر در نظر گرفت.

$$M\ddot{\tilde{x}} + B\dot{\tilde{x}} + K\tilde{x} - \frac{\mu_0 i_1 i_2 l}{2\pi(b-\tilde{x})} = 0 \quad (2)$$

¹ MEMS

² Magnetostatics

با تغییر متغیرهای $x = \frac{\tilde{x}}{b}$ و $u = \frac{\mu_0 i_1 i_2 l}{2\pi M b^2}$ ، این معادله را می‌توان به صورت زیر بازنویسی کرد.

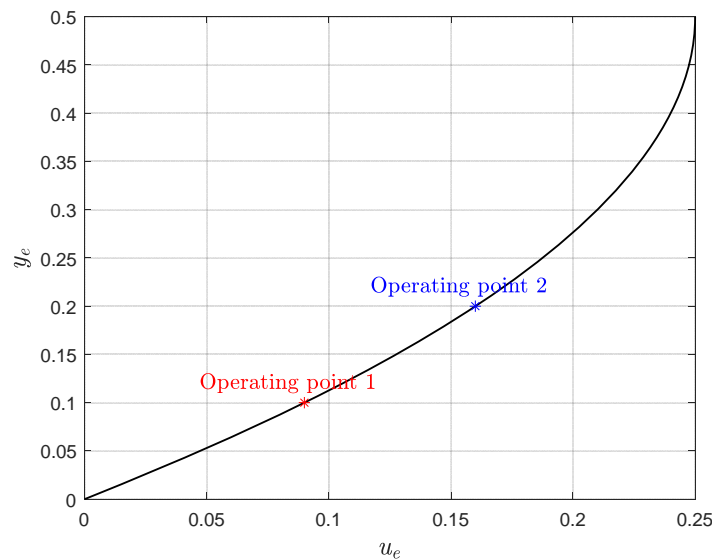
$$\ddot{x} + \frac{B}{M} \dot{x} + \frac{K}{M} x - \frac{u}{1-x} = 0 \quad (3)$$

که در آن، u ورودی و x خروجی سیستم است. با فرض $M = 1$ ، $B = 1$ و $K = 1$ و تعریف حالت‌های $x_1 = x$ و $x_2 = \dot{x}$ ، معادلات حالت سیستم به صورت زیر خواهد بود.

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = -x_1 - x_2 + \frac{u}{1-x_1} \\ y = x_1 \end{cases} \quad (4)$$

رابطه ورودی-خروجی در حالت ماندگار (مشتقات در رابطه‌ی (۴) صفر فرض شده و متغیر x_2 از معادلات حذف می‌شود) به صورت زیر بدست می‌آید.

$$u_e = y_e - y_e^2 \quad (5)$$



شکل ۲. نمودار خروجی به ورودی حالت ماندگار سیستم.

شکل ۲ نمودار خروجی به ورودی سیستم میکرو الکترومکانیکی دارای سیم حامل جریان در حالت ماندگار را نمایش می‌دهد. نقاط کار زیر را در نظر بگیرید:

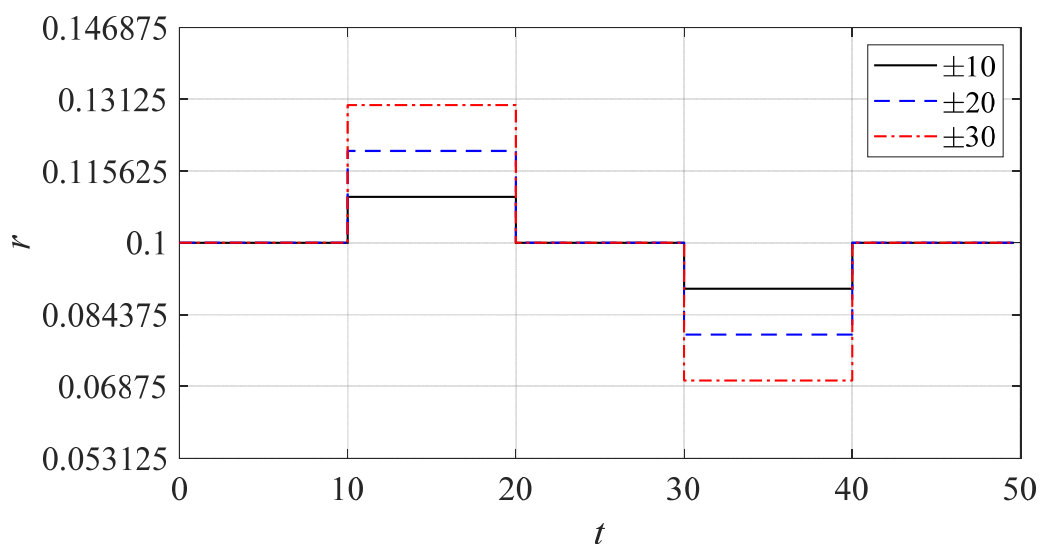
$$\text{Operating point 1: } \begin{cases} u_e = 0.09 \\ x_{1e} = 0.1 \\ x_{2e} = 0 \end{cases} \quad \text{and} \quad \text{Operating point 2: } \begin{cases} u_e = 0.16 \\ x_{1e} = 0.2 \\ x_{2e} = 0 \end{cases}$$

نقطه کار **اول** برای شماره دانشجویی با **شماره سمت راست فرد** و **دوم** برای **بقیه**. ورودی مرجع r را به فرم شکل ۳ (موج مربعی با سه دامنه مختلف برای تغییرات) برای نقطه کار اول و شکل ۴ برای نقطه کار دوم در نظر بگیرید و کارهایی خواسته شده زیر را انجام دهید.

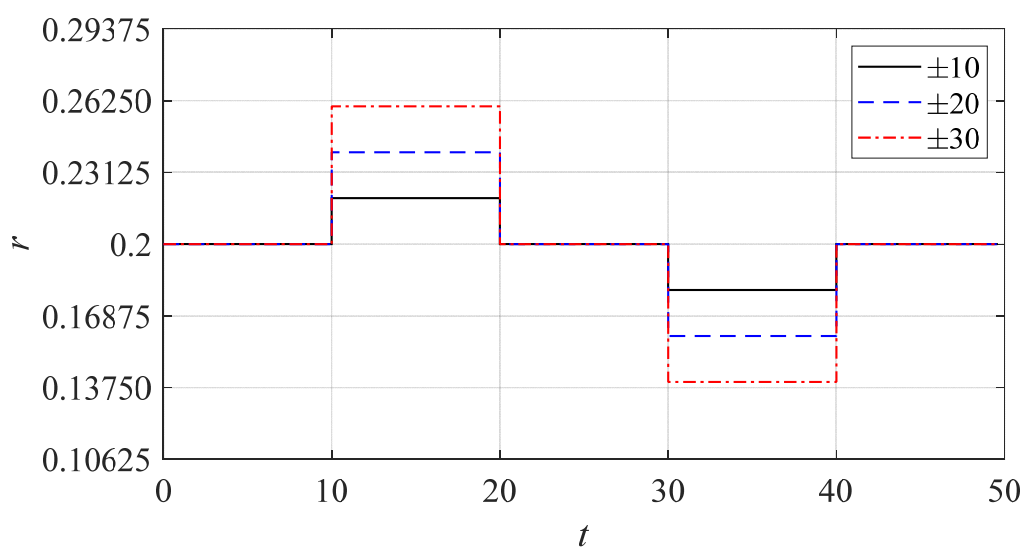
۱- با استفاده از تابع تبدیل مدل خطی گسسته، کنترل کننده IMC مناسب را طراحی کنید.

۲- کنترل کننده حاصل را به مدل خطی گسسته اعمال کنید.

۳- کنترل کننده حاصل را به مدل غیرخطی گسسته اعمال کنید.



شکل ۳: شکل موج مربوط به ورودی مرجع سیستم حلقه بسته برای نقطه کار اول.



شکل ۴: شکل موج مربوط به ورودی مرجع سیستم حلقه بسته برای نقطه کار دوم.

۴- کنترل کننده حاصل را به مدل غیرخطی پیوسته اعمال کنید.

۵- پاسخها را در موارد ذکر شده بالا و به ازای β های (قطب فیلتر نرم کننده یا مقاوم کننده $F(z)$)

۰٫۱، ۰٫۵ و ۰٫۹۵ با هم مقایسه کنید و نتایج مقایسه را توضیح دهید.

- [1] J.H. He, D. Nurakhmetov, P. Skrzypacz and D. Wei, "Dynamic pull-in for micro-electromechanical device with a current-carrying conductor", *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, vol. 40, pp. 1059-1066, 2021.