

۴

فصل

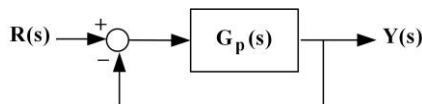
جبران سازها

خلاصه

اولین گام در ارزیابی عملکرد یک سیستم کنترلی اثبات پایداری آن است. اگر سیستم حلقه بسته مفروض ناپایدار باشد، باید ابزاری برای پایدار نمودن آن به خدمت گرفته شود و یا در صورت اطمینان از پایداری آن، باید بتوانیم با به خدمت گرفتن ابزاری به مشخصه‌های عملیاتی مطلوب برسیم. در این فصل با انواع جبران‌سازها به عنوان ابزاری برای دستیابی به اهداف فوق آشنا شده و ویژگی‌های هر کدام را فرا می‌گیرید.

۴-۱ مقدمه

سیستم‌های کنترلی طوری طراحی می‌شوند که عملکرد معینی را دارا باشند. عموماً شرایطی را که یک سیستم کنترلی باید داشته باشد، مشخصه عملکردی می‌نامند. مشخصه‌های عملکردی شامل پایداری نسبی، سرعت پاسخ و دقت آن می‌باشد. به هنگام طراحی سیستم همواره باید توجه کرد که آیا سیستم تحت بررسی، کلیه یا برخی از مشخصه‌های عملکردی را داراست؟ باید دانست که اکثر سیستم‌های تحت کنترل ($G_p(s)$ در شکل ۴-۱) شامل کلیه مشخصه‌های عملکردی مطلوب نمی‌باشند. از آنجایی که تغییر شکل و ترمیم کل ساختار سیستم تحت کنترل کار ساده‌ای نیست، این امر با افزودن المان‌هایی به سیستم اصلی ایجاد می‌شود که به این المان‌ها، جبران‌ساز و به این فرآیند جبران‌سازی می‌گویند.



شکل (۴-۱): سیستم کنترلی با فیدبک واحد

با توجه به این که جبران‌سازی بر اساس مشخصه‌های عملکردی انجام می‌شود، ضروری است که آن‌ها را فرا بگیریم. مشخصه‌های عملکردی سیستم‌های کنترلی در حوزه زمان به ورودی پله واحد عبارتند از: زمان اوج، ماکزیمم فراجهش، زمان استقرار و حداکثر خطای حالت ماندگار مجاز به سیگنال‌های آزمون استاندارد. مشخصه‌های عملکردی سیستم‌های کنترلی در حوزه فرکانس عبارتند از: حد بهره، حد فاز، ماکزیمم پاسخ فرکانسی حلقه بسته (اوج تشدید) و پهنای باند. بر اساس این که کدام مشخصه عملکردی داده شوند، از طراحی در همان حوزه استفاده می‌کنیم. این بدان معنی است که اگر مشخصات عملکردی حوزه زمان داده شوند، از طراحی در حوزه زمان و اگر مشخصات عملکردی در حوزه فرکانس داده شود، از طراحی در حوزه فرکانس استفاده می‌کنیم. یادآوری می‌کنیم

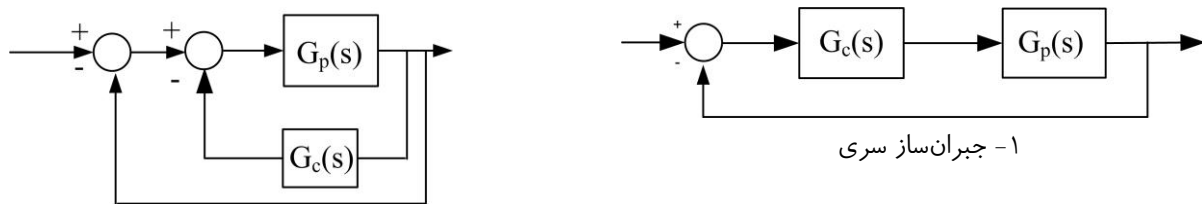
۱- طراحی در حوزه فرکانس به مراتب ساده‌تر از طراحی در حوزه زمان می‌باشد.

۲- با استفاده از روابط میان حوزه فرکانس و حوزه زمان می‌توان در انتخاب روش طراحی در حوزه، قدرت مانور داشته باشیم. به عبارت دیگر، با استفاده از روابط تقریبی میان مشخصه‌های حوزه فرکانس و حوزه زمان، می‌توانیم با دانستن مشخصه‌های عملکردی در حوزه زمان، مشخصه‌های عملکردی در حوزه فرکانس را بدست آورده و لذا از طراحی در حوزه فرکانس استفاده

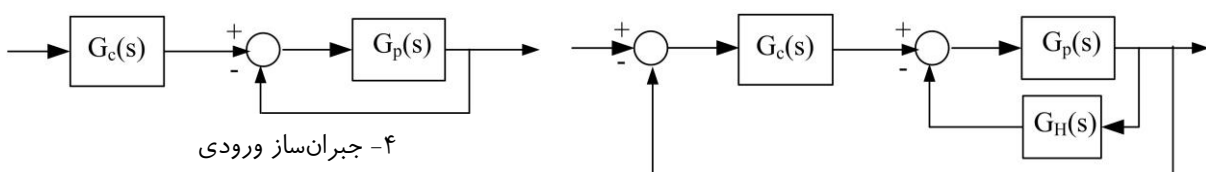
کنیم. به عنوان مثال برای سیستم مرتبه دوم نوعی داریم:

$$M_p = \frac{1}{2\xi\sqrt{1-\xi^2}}$$

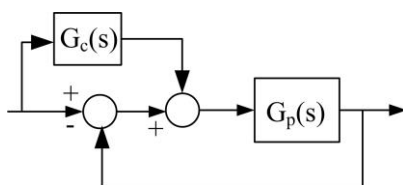
روش‌های متعددی برای اعمال تابع تبدیل سیستم جبران‌کننده به سیستم حلقه بسته (شکل ۴-۱) وجود دارند. به عنوان یک قاعده کلی، طراحی یک جبران‌ساز سری روندی ساده‌تر نسبت به سایر روش‌ها دارد، اگرچه عوامل دیگری چون ماهیت الکتریکی، ماهیت مکانیکی، محیط و ... در انتخاب نوع جبران‌ساز نیز دخیل می‌باشند. در این بحث نگاه خود را به جبران‌سازهای سری برای سیستم حلقه بسته با فیدبک واحد معطوف می‌کنیم.



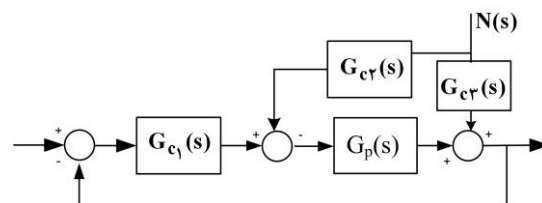
۲- جبران‌ساز موازی (فیدبکی)



۴- جبران‌ساز ورودی



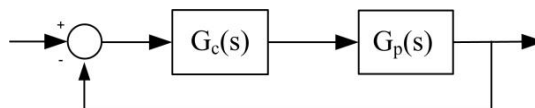
۶- جبران‌ساز پیش‌رو



۴-۲ جبران سازهای سری

در حالت کلی تابع تبدیل جبران ساز سری را به صورت زیر نمایش می‌دهیم.

$$G_c(s) = k_c \frac{\prod_{i=1}^m (s + z_i)}{\prod_{j=1}^n (s + p_j)}$$



k_c : ضریب بهره جبران ساز z_i : صفرهای جبران ساز p_j : قطب‌های جبران ساز

انواع جبران سازهای سری عبارتند از:

۴-۲-۱ جبران ساز تناسبی یا بهره ثابت (P)

فرم کلی جبران ساز تناسبی به صورت $G_c(s) = k_c$ است. اگرچه جبران ساز تناسبی، ساده‌ترین جبران ساز است، ولی به واسطه این که عموماً سیستم‌ها برای بهره‌های خاصی پایدارند، این جبران ساز در بسیاری از مواقع کارساز نمی‌باشد.

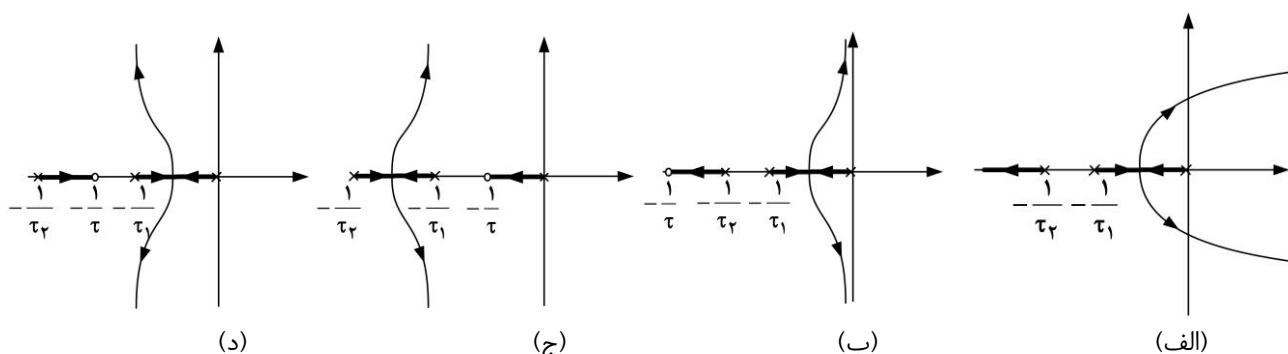
۴-۲-۲ جبران ساز تناسبی - مشتقی (PD)

فرم کلی جبران ساز PD به صورت $G_c(s) = k_p + k_D s$ است. مشاهده می‌شود که جبران ساز PD یک صفر به تابع تبدیل حلقه باز سیستم اضافه می‌کند. توجه دارید که اثر اضافه کردن یک صفر به تابع تبدیل حلقه باز عبارتست از کشیدن مکان هندسی ریشه‌ها به سمت چپ محور موهومی، پایدارتر نمودن سیستم و افزایش سرعت پاسخ سیستم. فرم دیگر نمایش جبران ساز نمایش جبران ساز PD به صورت $G_c(s) = 1 + \tau s$ می‌باشد.

برای یادآوری، فرض کنید که تابع تبدیل سیستم تحت کنترل به صورت $G_p(s) = \frac{k}{s(1 + \tau_1 s)(1 + \tau_2 s)}$ باشد. مکان هندسی ریشه‌های آن نشان می‌دهد که برای بهره‌های بالا، سیستم ناپایدار می‌شود (شکل ۴-۲-الف). تابع تبدیل حلقه باز سیستم با افزودن جبران ساز PD برابر است با:

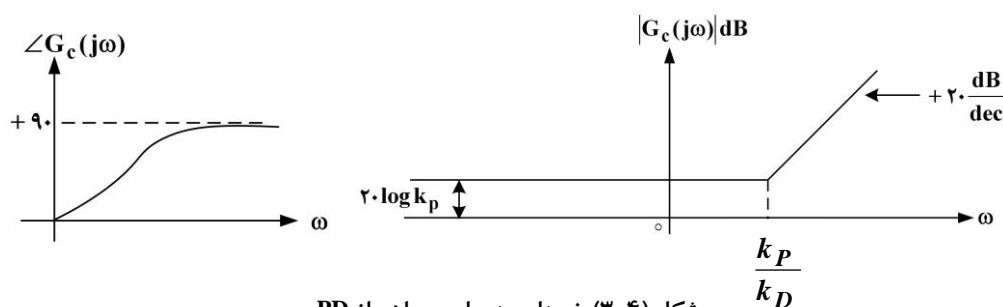
$$GH(s) = G_c(s)G_p(s) = \frac{k(1 + \tau s)}{s(1 + \tau_1 s)(1 + \tau_2 s)}$$

اثرات افزودن صفر توسط جبران ساز PD در شکل ۴-۲ آورده شده است.



شکل (۴-۲): آثار افزودن صفر به تابع تبدیل حلقه باز بر روی مکان هندسی ریشه‌ها

همانطور که مشاهده می‌شود، با تغییر τ سه حالت رخ می‌دهد که در هر حالت مکان هندسی ریشه‌های جدید (سیستم جبران شده) نسبت به سیستم اصلی (سیستم جبران نشده) به سمت چپ انتقال داده می‌شود. نمودار بود یک جبران ساز PD در شکل ۴-۳ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که جبران ساز PD همانند یک فیلتر بالاگذر عمل کرده و در نتیجه عامل مزاحم (نویز) را تقویت می‌کند.



شکل (۳-۴): نمودار بود برای جبران‌ساز PD

همچنین زاویه فاز آن از صفر تا $+90^\circ$ تغییر کرده و همواره مثبت است. بنابراین در جبران‌ساز PD همواره خروجی نسبت به ورودی، پیش‌فاز است. از اینرو جبران‌سازهای پیش‌فاز (*Lead*) نامیده می‌شوند. واضح است که جبران‌ساز PD بر روی خطای حالت ماندگار اثری ندارد، زیرا نوع سیستم را افزایش نمی‌دهد. توجه داشته باشید که اگر خطای حالت ماندگار دارای تغییرات زمانی باشد، جبران‌ساز PD بر روی آن اثر خواهد گذاشت که در عمل چنین نیست. همچنین جبران‌ساز PD به واسطه افزودن صفر، سبب افزایش حد بهره و حد فاز سیستم حلقه بسته می‌شود.

جدول (۱-۴): اثرات جبران‌ساز PD

مزایا	معایب
۱- افزایش پایداری نسبی سیستم با افزایش حد بهره و حد فاز	۱- تقویت اغتشاش (نویز)
۲- افزایش سرعت پاسخ سیستم	۲- عدم تأثیر بر روی خطای حالت ماندگار
۳- افزایش پهنای باند سیستم	

۳-۲-۴ جبران‌ساز تناسبی - انتگرال گیر (PI)

فرم کلی جبران‌ساز PI به صورت $G_c(s) = k_p + \frac{k_I}{s}$ است. فرم دیگر نمایش جبران‌ساز PI به صورت $C_c(s) = \frac{1+\tau s}{s}$ می‌باشد.

مشاهده می‌شود که جبران‌ساز PI سبب اضافه کردن یک قطب در مبدأ و یک صفر در $s = -\frac{k_I}{k_p}$ به تابع تبدیل حلقه باز

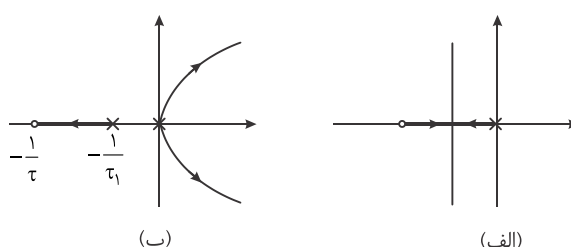
سیستم شده و لذا نوع سیستم را افزایش می‌دهد. بنابراین اگر خطای حالت ماندگار سیستم اصلی (جبران نشده) نسبت به سیگنال آزمون ثابت باشد، جبران‌ساز PI، خطای حالت ماندگار را به همان سیگنال آزمون صفر می‌کند. توجه دارید که در اثر افزایش نوع سیستم اگر k_p و k_I نامناسب انتخاب شوند، ناپایداری حاصل خواهد شد. جبران‌ساز PI به دلیل اضافه کردن قطب به تابع تبدیل حلقه باز سبب کشاندن مکان ریشه‌ها به سمت راست شده و پایداری سیستم را کاهش می‌دهد. برای یادآوری، فرض کنید که تابع

تبدیل سیستم تحت کنترل $G_p(s) = \frac{k}{s(s+\tau_1)}$ باشد. مکان هندسی ریشه‌های آن نشان می‌دهد که برای کلیه بهره‌ها، سیستم

پایدار است (شکل ۴-۴ الف). تابع تبدیل حلقه باز سیستم با افزودن جبران‌ساز PI برابر است با:

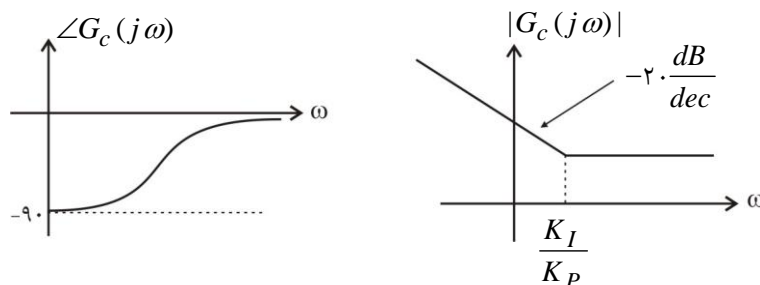
$$GH(s) = G_c(s)G_p(s) = \frac{k(1+\tau s)}{s^2(s+\tau_1)} \quad \tau_1 > \tau$$

اثرات افزودن قطب به تابع تبدیل حلقه باز نوعی توسط جبران‌ساز PI در شکل (۴-۴ ب) آورده شده است.



شکل (۴-۴): آثار افزودن قطب به تابع تبدیل حلقه باز بر روی مکان ریشه‌ها

همانطور که مشاهده می‌شود، مکان هندسی ریشه‌های سیستم جدید (سیستم جبران شده) نسبت به سیستم اصلی (سیستم جبران نشده) به سمت راست انتقال داده شده است. شکل ۴-۵ نمودار بود یک جبران‌ساز PI را نشان می‌دهد.



شکل (۴-۵): نمودار بود برای جبران‌ساز PI

مشاهده می‌شود که جبران‌ساز PI همانند فیلتر پایین‌گذر عمل کرده به طوری که در فرکانس پایین افزایش بهره را در پی خواهد داشت و در فرکانس‌های بالا به مقدار ثابتی معادل $20 \log k_p$ کاهش می‌یابد. همچنین زاویه فاز جبران‌ساز PI از 0° تا -90° تغییر می‌کند و همواره منفی است. بنابراین در جبران‌ساز PI همواره خروجی نسبت به ورودی پس‌فاز است. از اینرو جبران‌سازهای پس‌فاز (lag) نامیده می‌شوند. توجه داشته باشید که جبران‌ساز PI سیگنال‌های فرکانس بالا را تضعیف کرده و لذا باعث به وجود آمدن پاسخ‌های گذرا با جهش‌های کوچک و یا بدون جهش شده و زمان خیز را افزایش می‌دهد. همچنین پهنای باند سیستم کاهش می‌یابد.

جدول (۴-۲): اثرات جبران‌ساز PI

مزایا	معایب
۱- کاهش خطای حالت دائمی به سیگنال آزمون مناسب	۱- کاهش پهنای باند
۲- تضعیف اغتشاش (نویز)	۲- کاهش پایداری نسبی سیستم
۳- تصحیح میرایی و ماکزیمم فراجش	۳- کاهش سرعت سیستم

۴-۲-۴ جبران‌ساز PID

فرم کلی این جبران‌ساز به صورت $G_c(s) = k_p + k_D s + \frac{k_I}{s}$ است. این جبران‌ساز یک قطب در مبدأ و دو صفر که با تابع $k_D s^2 + k_p s + k_I = 0$ مشخص می‌شوند را به تابع تبدیل حلقه باز سیستم اضافه می‌کند. بنابراین مزایای جبران‌سازها PI و PD را همزمان داراست. این جبران‌ساز بسته به مقادیر پارامترهایش می‌تواند یک فیلتر میان‌گذر یا میان‌نگذر باشد.

۴-۳ طراحی در حوزه فرکانس

جبران‌سازها در حقیقت نوعی فیلتر می‌باشند که قادر به تغییر مشخصه‌های عملکردی سیستم می‌باشند. بنابراین ما در جبران‌سازی، به دنبال طراحی یک نوع فیلتر می‌باشیم. از یک سو تحقق جبران‌سازهای PI و PD به واسطه مشکل بودن ساخت انتگرال‌گیر و مشتق‌گیر و از سوی دیگر مشکل بودن سوئیچ کردن این دو جبران‌ساز به یکدیگر، ما را بر آن می‌دارد که به دنبال جبران‌سازهای دیگر می‌باشیم که ضمن برطرف کردن مشکلات مذکور، قادر به تغییر پاسخ فرکانسی باشند. این جبران‌سازها عبارتند از پیش‌فاز، پس‌فاز و پیش‌فاز - پس‌فاز. فرم کلی این جبران‌سازها به صورت $G_c(s) = k_c \frac{s+z}{s+p}$ می‌باشد. مشاهده می‌شود که با تغییر z و p می‌توانیم بین جبران‌سازهای PI و PD سوئیچ نماییم. به عبارتی دیگر، جبران‌ساز از حالت پس‌فاز به پیش‌فاز و بالعکس عملکرد دهد.

اطلاعات قابل حصول از پاسخ فرکانسی سیستم حلقه باز

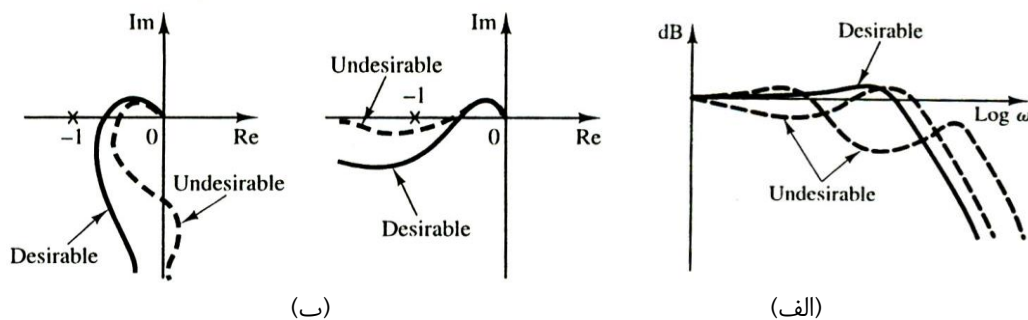
همانطور که قبلاً اشاره کرده‌ایم، ناحیه فرکانس پائین (ناحیه‌ای که زیر فرکانس گذر بهره است) رفتار حالت ماندگار سیستم حلقه بسته را نشان می‌دهد، در حالی که ناحیه فرکانس‌های میانی (ناحیه‌ای که نزدیک نقطه بحرانی $(-1 + j0)$ می‌باشد) پایداری نسبی و

ناحیه فرکانس‌های بالا (ناحیه‌ای که بالای فرکانس گذر بهره است) پاسخ گذرای سیستم و پیچیدگی آن را نشان می‌دهند. با توجه به مطالب اخیر، مشخصه عملکردی مناسب در حوزه فرکانس عبارتند از:

۱- بهره در فرکانس‌های پایین نسبتاً بزرگ باشد.

۲- در نزدیکی فرکانس گذر بهره شیب منحنی لگاریتمی دامنه در نمودار بود برابر $-20 \frac{dB}{dec}$ باشد. این شیب باید در باند فرکانسی نسبتاً وسیعی موجود باشد تا از وجود حد فاز مناسب مطمئن شویم.

۳- به منظور تضعیف نویز در فرکانس‌های بالا، بهره در فرکانس‌های بالا کم باشد.
در شکل ۴-۶، نمونه‌هایی از منحنی‌های پاسخ فرکانسی مطلوب و نامطلوب حلقه باز و حلقه بسته آورده شده است.

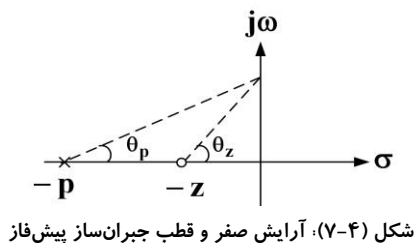


شکل (۴-۶): (الف) نمونه‌ای از منحنی‌های پاسخ فرکانسی حلقه بسته مطلوب و نامطلوب، (ب) نمونه‌ای از منحنی‌های پاسخ فرکانسی حلقه باز مطلوب و نامطلوب

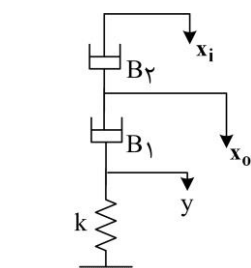
حال به بررسی هر کدام از جبران‌سازها می‌پردازیم.

۴-۳-۱ جبران‌ساز پیش‌فاز (Lead)

فرم کلی جبران‌ساز پیش‌فاز به صورت $G_c(s) = k_c \frac{(s+z)}{(s+p)}$ $p > z > 0$ است. محل قرار گرفتن صفر و قطب تابع تبدیل این جبران‌ساز به شکل ۷-۴ است. واضح است که θ_z همواره از θ_p بزرگ‌تر می‌باشد. لذا فاز جبران‌ساز همواره مثبت بوده و به همین دلیل به آن جبران‌ساز پیش‌فاز (Phase Lead) می‌گویند. مدار الکتریکی و مدار مکانیکی معادل جبران‌ساز پیش‌فاز به صورت زیر است.

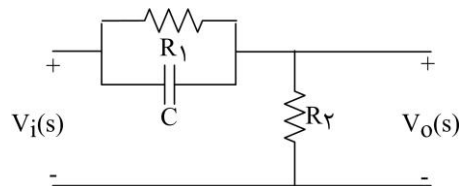


شکل (۷-۴): آرایش صفر و قطب جبران‌ساز پیش‌فاز



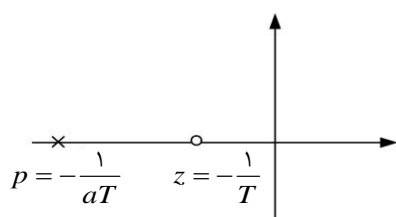
$$\frac{X_o(s)}{X_i(s)} = \frac{s + \frac{1}{T}}{s + \frac{1}{aT}}, \quad a < 1$$

(ب) معادل مکانیکی معادل

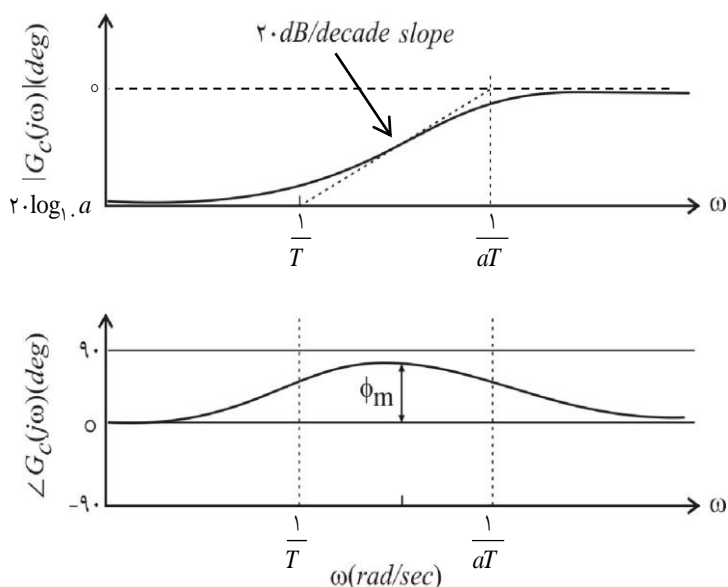


$$\frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{s + \frac{1}{T}}{s + \frac{1}{aT}}, \quad a < 1$$

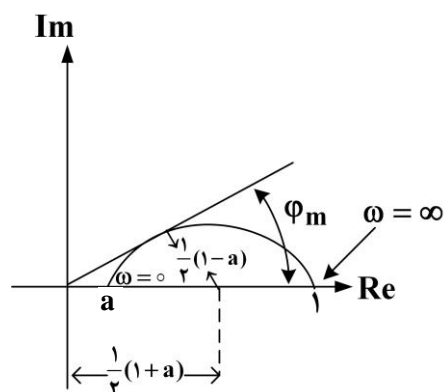
(الف) مدار الکتریکی معادل



در این حالت آرایش صفر و قطب این جبران‌ساز به صورت روبرو است که مشاهده می‌شود، صفر آن نسبت به قطبش به مبدأ نزدیک‌تر است. نمودار بود و نمودار قطبی جبران‌ساز *Lead* در شکل‌های ۴-۸ و ۴-۹ آورده شده است.



شکل (۴-۹): نمودار جبران‌ساز پیش‌فاز



شکل (۴-۸): نمودار قطبی جبران‌ساز پیش‌فاز

توجه کنید که رفتار دامنه این جبران‌ساز مطلوب نمی‌باشد. زیرا فرکانس‌های پایین را تضعیف کرده و در فرکانس‌های بالا تغییری نمی‌دهد که این به واسطه حضور نویز مطلوب نمی‌باشد. با این حال رفتار فاز این جبران‌ساز مطلوب می‌باشد. بنابراین استراتژی ما در استفاده از این جبران‌ساز، افزایش زاویه پیش‌فازی در نزدیکی فرکانس گذر بهره برای دستیابی به حد فاز مطلوب می‌باشد. می‌توان نشان داد

۱- مقدار ماکزیمم فاز در فرکانسی که واسطه هندسی بین صفر و قطب جبران‌ساز می‌باشد، رخ می‌دهد.

$$\omega_m = \sqrt{zp} = \frac{1}{T\sqrt{a}}$$

۲- اگر مقدار فاز ماکزیمم را با ϕ_m نمایش دهیم، داریم:

$$\sin \phi_m = \frac{1-a}{1+a}$$

ویژگی‌های جبران‌ساز پیش‌فاز عبارتند از:

- ۱- بهبود حد فاز سیستم حلقه بسته
 - ۲- افزایش پهنای باند سیستم حلقه بسته
 - ۳- افزایش سرعت سیستم (کاهش زمان خیز)
 - ۴- کاهش زمان استقرار سیستم
 - ۵- افزایش پایداری نسبی سیستم
- و معایب آن عبارتند از:

- ۱- تقویت نویز (افزایش بهره در فرکانس‌های بالا)
- ۲- امکان ناپایدار ساختن سیستم حلقه بسته با افزایش بهره اضافی
- ۳- ایجاد سیگنال‌های بزرگ در سیستم که این امر می‌تواند سبب اشباع شدن سیستم گردد.

این جبران‌ساز در موارد زیر غیرقابل اعمال است:

۱- زمانی که بخواهیم خطای حالت ماندگار را کاهش دهیم.

۲- زمانی که شیب فاز در حوالی فرکانس گذر بهره زیاد باشد. این بدان معنی است که به تنهایی با استفاده از یک پیش‌فاز نمی‌توان به مشخصات عملکردی مطلوب دست یافت. این واقعیت به واسطه آن است که فاز جبران‌ساز پیش‌فاز ϕ_m تابعی از a

می‌باشد (شکل ۴-۸). از سویی دیگر چون مقدار a وابسته به مقاومت‌های R_1 و R_2 است $(a = \frac{R_2}{R_1 + R_2})$ برای این که

مقاومت‌های R_1 و R_2 مقادیر معقولی باشند، a را نمی‌توان بیش از حد بزرگ انتخاب کرد.

* نکته: از یک جبران‌ساز پیش‌فاز، حداکثر حدود ۶۰ تا ۷۰ درجه فاز مثبت می‌توان گرفت.

* نکته: به طور کلی، شرایط زیر ممکن است سبب شود که فاز تابع تبدیل حلقه باز در نزدیکی فرکانس گذر بهره

به سرعت تغییر کند:

۱- تابع تبدیل حلقه باز دو یا چند قطب نزدیک به هم و نزدیک به فرکانس گذر بهره داشته باشد.

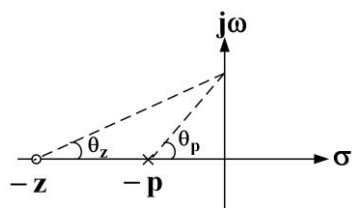
۲- تابع تبدیل حلقه باز یک یا چند زوج قطب مزدوج مختلط در نزدیک فرکانس گذر بهره داشته باشد.

۳- سیستم اصلی (جبران نشده) ناپایدار باشد و یا پایدار باشد ولی حاشیه پایداری آن کم باشد.

۴-۳-۲ جبران‌ساز پس‌فاز (Lag)

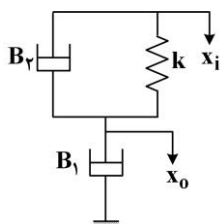
فرم کلی جبران‌ساز پس‌فاز به صورت $z > p > 0$ $G_c(s) = k_c \frac{(s+z)}{(s+p)}$ است.

محل قرار گرفتن صفر و قطب این جبران‌ساز به شکل زیر است:



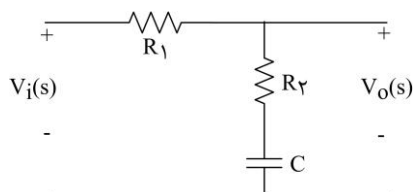
شکل (۴-۱۰): آرایش صفر و قطب جبران‌ساز

واضح است که θ_p همواره از θ_z بزرگ‌تر می‌باشد و لذا فاز جبران‌ساز همواره منفی بوده و به همین دلیل به آن جبران‌ساز پس‌فاز (Phase Lag) می‌گویند. مدار الکتریکی و مدار مکانیکی معادل جبران‌ساز پس‌فاز به صورت زیر است.



$$\frac{X_o(s)}{X_i(s)} = \frac{1}{a} \frac{s + \frac{1}{T}}{s + \frac{1}{aT}}, \quad a > 1$$

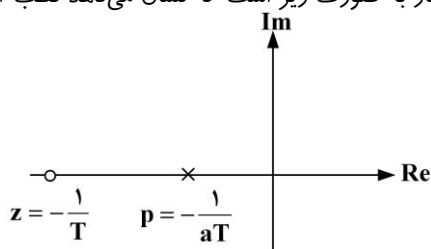
(ب) مدار مکانیکی معادل



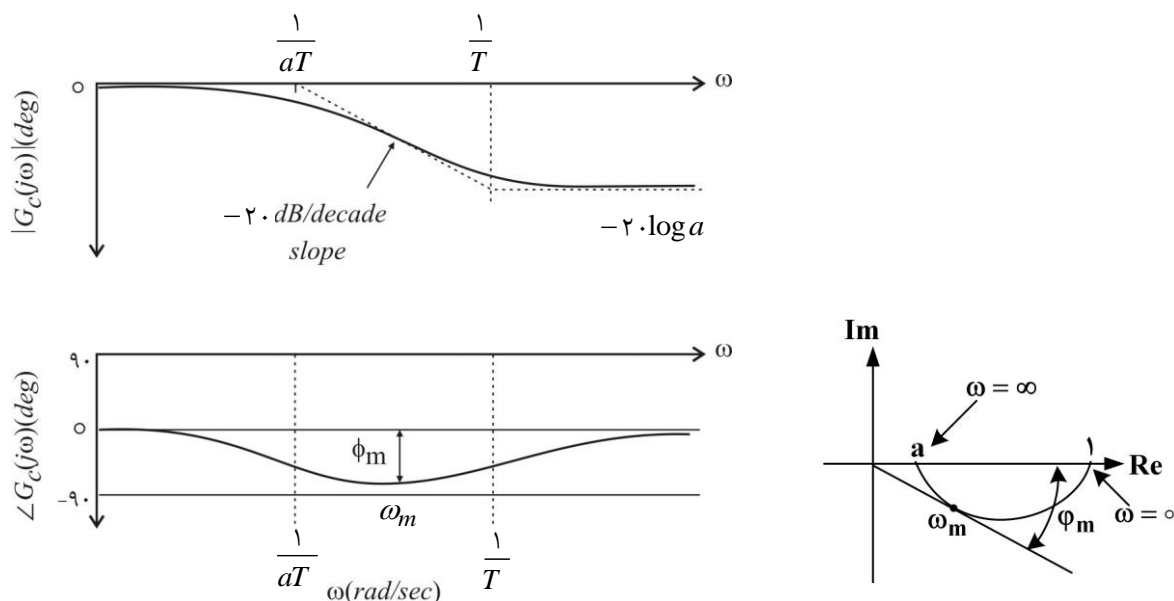
$$\frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{1}{a} \frac{s + \frac{1}{T}}{s + \frac{1}{aT}}, \quad a > 1$$

(الف) مدار الکتریکی معادل

در این حالت آرایش صفر و قطب این جبران‌ساز به صورت زیر است که نشان می‌دهد قطب آن نسبت به صفرش به مبداء نزدیک‌تر است.



نمودار بود و نمودار قطبی جبران‌ساز log در شکل‌های ۴-۱۱ و ۴-۱۲ آورده شده است.



شکل (۴-۱۱): نمودار قطبی جبران‌ساز پس‌فاز

شکل (۴-۱۲): نمودار بودی جبران‌ساز پس‌فاز

توجه کنید که رفتار فاز این جبران‌ساز مطلوب نمی‌باشد. زیرا سبب ناپایداری سیستم حلقه بسته می‌شود. در حالی که رفتار دامنه این جبران‌ساز مطلوب می‌باشد. زیرا فرکانس‌های پایین را تقویت و فرکانس‌های بالا را بدون تغییر از خود عبور می‌دهد. همانند

جبران‌ساز پیش‌فاز، مقدار فاز منفی ماکزیمم جبران‌ساز پس‌فاز در فرکانس ω_m رخ می‌دهد.

توجه دارید برای این که فاز منفی جبران‌ساز پس‌فاز، حد فاز سیستم را به صورت قابل ملاحظه‌ای کاهش ندهد، عموماً صفر جبران‌ساز را به مراتب پایین‌تر از فرکانس گذر بهره (ω_1) قرار می‌دهند. با یک قاعده سرانگشتی صفر جبران‌ساز را ۱۰ تا ۲۰ برابر

کوچک‌تر از فرکانس گذر بهره قرار می‌دهند.

مزایای جبران‌ساز پس‌فاز عبارتند از: ۱- بهبود خطای حالت ماندگار ۲- تضعیف نویز و معایب آن عبارتند از:

۱- کاهش پهنای باند سیستم حلقه بسته ، ۲- کند کردن سرعت سیستم ، ۳- مشکل بودن تحقق‌پذیری آن (ممکن است برای تحقق نیاز به R و C های بزرگ داشته باشیم.) و ۴- کاهش پایداری نسبی سیستم

توجه کنید در مواردی که بازه فرکانسی پایین وجود نداشته باشد که حد فاز با حد فاز مطلوب برابر باشد، نمی‌توان از این جبران‌ساز استفاده کرد.

*** نکته:** اگر سیستمی دارای خروجی اشباع یا محدود باشد و در جبران‌سازی از جبران‌ساز پس‌فاز استفاده کنیم، احتمال دارد که وضعیت پایداری مشروط رخ دهد. با بروز اشباع یا محدودیت در خروجی سیستم، بهره مؤثر حلقه کاهش می‌یابد و بدین ترتیب سیستم از پایداری کمتری برخوردار می‌شود و حتی ممکن است ناپایدار گردد. برای جلوگیری از این رخداد، سیستم باید طوری طراحی گردد که جبران‌ساز پس‌فاز زمانی تأثیر داشته باشد که دامنه ورودی عنصر اشباع شونده کوچک باشد.

۴-۳-۳ جبران‌ساز پیش‌فاز - پس‌فاز (Lead-Lag)

در شرایطی که بهبود عملکرد سیستم در حالت ماندگار و گذرا همزمان مورد توجه قرار گیرد، بایستی از هر دو جبران‌ساز پس‌فاز و پیش‌فاز استفاده کنیم. از جبران‌ساز پیش‌فاز که در حقیقت مانند یک مشتق‌گیر در محدوده‌ای از حوزه فرکانس عمل می‌کند، برای بهبود حد فاز سیستم و بدست آوردن رفتار مناسب در حوالی گذر بهره (ω_1) استفاده می‌کنیم و از جبران‌ساز پس‌فاز که در

محدوده‌ای از حوزه فرکانسی همانند یک انتگرال‌گیر عمل می‌کند، برای بهبود مسأله دقت سیستم در دنبال کردن ورودی مبنا (کاهش خطای حالت ماندگار) و بزرگ کردن اندازه پاسخ فرکانسی در فرکانس‌های پایین استفاده می‌کنیم. فرم کلی این جبران‌ساز به صورت

$$G_c(s) = k_c \frac{(s + \frac{1}{T_1})}{(s + \frac{1}{aT_1})} \frac{(s + \frac{1}{T_2})}{(s + \frac{1}{aT_2})} \quad a > 1 \quad T_2 > T_1$$

آرایش صفر و قطب این جبران‌ساز به شکل (۴-۱۳) است.

جزء $\frac{(s + \frac{1}{T_1})}{(s + \frac{1}{aT_1})}$ در حقیقت یک جبران‌ساز پیش‌فاز و جزء $\frac{(s + \frac{1}{T_2})}{(s + \frac{1}{aT_2})}$ یک جبران‌ساز پس‌فاز می‌باشد. به عبارتی دیگر، این جبران‌ساز

ساز در محدوده فرکانس‌های پایین همانند یک جبران‌ساز پس‌فاز عمل می‌کند و در محدوده فرکانس‌های بالا همانند جبران‌ساز پیش‌فاز عمل می‌کند.

✱ نکته: ممکن است که در بسیاری از مسائل مجبور به استفاده از جبران‌سازهای پس‌فاز و پیش‌فاز با ضرائب a

متفاوت باشیم که در این صورت بایستی از اتصال سری این دو جبران‌ساز استفاده کنیم.

معادل الکتریکی این جبران‌ساز به صورت زیر است:

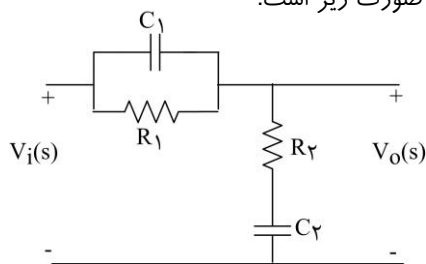
$$T_2 > T_1$$

$$T_1 = R_1 C_1$$

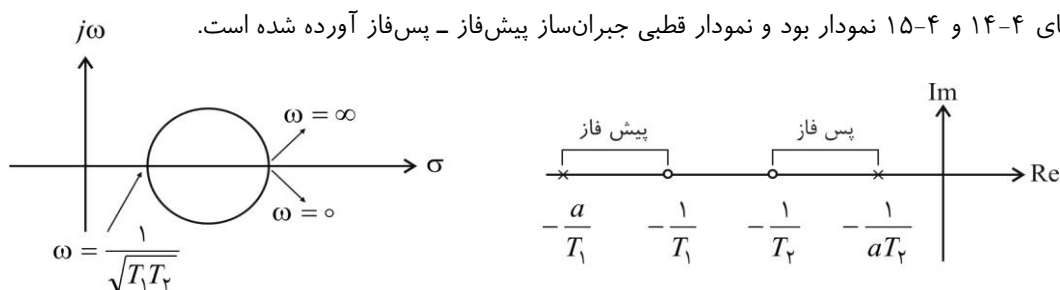
$$T_2 = R_2 C_2$$

$$a > 1$$

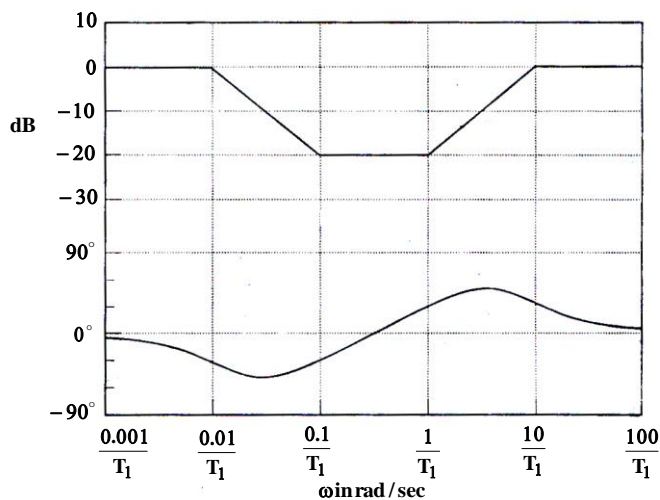
$$\frac{T_1}{a} + aT_2 = R_1 C_1 + R_2 C_2 + R_1 C_2$$



در شکل‌های ۴-۱۴ و ۴-۱۵ نمودار بود و نمودار قطبی جبران‌ساز پیش‌فاز - پس‌فاز آورده شده است.



شکل (۴-۱۳): آرایش صفر و قطب جبران‌ساز پیش‌فاز - پس‌فاز شکل (۴-۱۴): نمودار قطبی جبران‌ساز پیش‌فاز - پس‌فاز



شکل (۴-۱۵): نمودار بود جبران‌ساز پیش‌فاز - پس‌فاز با فرض $k_c = 1$ ، $a = 10$ و $T_2 = 10 \cdot T_1$