کنترل محرکه های الکتریکی

فصل ۷:
کنترل حلقه بسته حرکت در محرکه های الکتریکی

دانشگاه آزاد اسلامی واحد شبستر
دانشکده فنی
گروه برق

حسن علیپور

مقدمه

- منظور از کنترل حرکت، کنترل موقعیت، سرعت و گشتاور می باشد.

- کیفیت این سیستم های کنترل حرکت توسط دقت و سرعت پاسخ آن، مقاوم بودن نسبت به تغییر پارامترها (گشتاور، بار، لختی و ...) و نیز میزان نرخ تبدیل انرژی مشخص می شود.

- برای بررسی ساده تر روش های کنترل می توان از موتور dc آهنربای دایم استفاده کرد. این موتور دارای ثابت زمانی الکتریکی ($\tau_e=L/R$) کوچک در حد چند میلی ثانیه می باشد. همچنین در تمام گستره سرعت و حتی سرعت صفر، کنترل جریان آرمیچر(گشتاور) مستقل از کنترل میدان آهنربا انجام می شود. این جداسازی بدلیل عمود بودن دو میدان نسبت به هم می باشد.

کنترل حرکت متوالی

- یک نمونه از سیستم کنترل حرکت متوالی دارای ۳ حلقه کنترل گشتاور، کنترل سرعت و کنترل موقعیت می باشد.
- معادلات موتور:

$$V = Ri + L\frac{di}{dt} + \lambda_{PM}\omega_r$$

$$J\frac{d\omega_r}{dt} = T_e - T_L$$

$$\frac{d\theta_r}{dt} = \omega_r \qquad T_e = \lambda_{PM} i$$

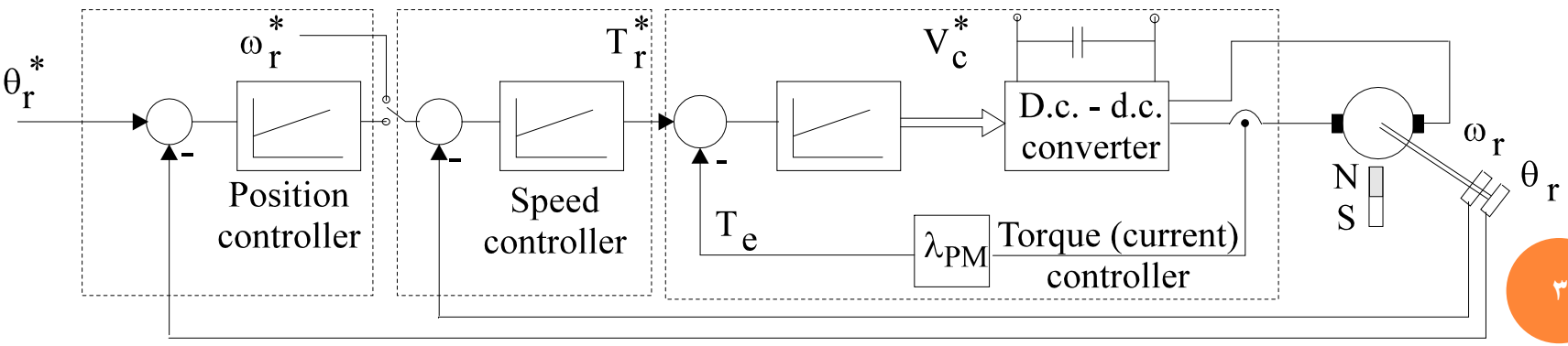

Figure 7.1. Typical cascaded motion control

کنترل حرکت متوالی (حلقه گشتاور)

- برای گشتاور ثابت (یا صفر) در موتور dc آهنربای دایم، تابع تبدیل جریان به ولتاژ به فرم زیر می باشد.

$$H_V(s)=\frac{i(s)}{V(s)}=\frac{s\tau_{em}}{\left(s^2\tau_{em}\tau_e+s\tau_{em}+1\right)R} \qquad \tau_{em}=\frac{JR}{\lambda_{PM}^{\ 2}}$$

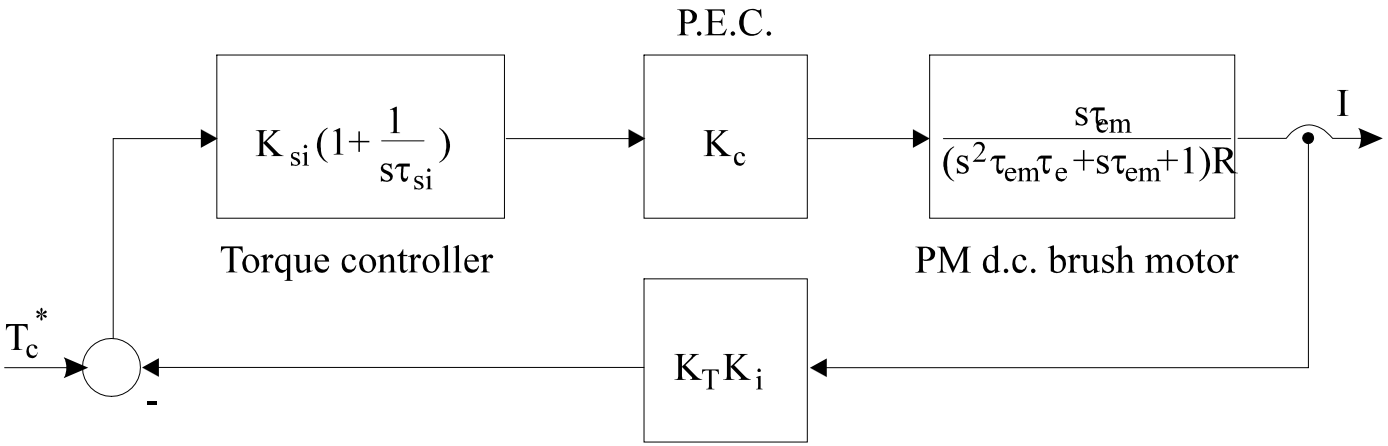

Figure 7.2. PI torque loop for a PM DC brush motor

کنترل حرکت متوالی (حلقه گشتاور)

- از تاخیر چاپر فرکانس بالا صرف نظر شده است و مدل آن به صورت بهره Kc در نظر گرفته شده است. همچنین $K_T=T_e/I=\lambda_{pm}$ ثابت گشتاور و K_I مربوط به ضریب تقویت حسگر جریان می باشد.
- کنترلر نوعی مورد استفاده یک کنترلر PI با بهره K_{si} و ثابت زمانی τ_{si} می باشد.

- در ادامه برای طراحی کنترلر از محدودیت های فرکانس بحرانی (ω_c) و حد فاز (φ_c) مربوط به تابع تبدیل حلقه باز استفاده می شود.
- برای فراهم نمودن پاسخ سریع گشتاور، فرکانس بحرانی باید مقداری بالا (حداکثر ۱ تا ۲ کیلوهرتز) باشد.

$$A(s)=\frac{K_{si}(1+s\tau_{si})}{s\tau_{si}R}\frac{K_C K_T K_I s\tau_{em}}{s^2\tau_{em}\tau_e+s\tau_{em}+1}$$

کنترل حرکت متوالی (حلقه گشتاور)

Let us have as a numerical example: A PM DC brush motor with the data: V_n=110V, P_n = 2kW, n_n = 1800rpm, R = 1Ω, L = 20mH, K_T = 1.1Nm/A, τ_{em}=0.1 sec., K_C = 25V/V, K_i = 0.5V/A, critical frequency f_c = 500Hz, and the phase margin φ_c = 47°.

The phase margin φ_c of A(s) from (7.7), for the critical frequency $\omega_c = 2\pi f_c$, is:

$$\varphi_c = -180^0 + \mathrm{Arg}[A(j\omega_c)] =$$

$$= -180^0 + \tan^{-1}(\omega_c \tau_{si}) - \tan^{-1}\left(\frac{\omega_c \tau_{em}}{1-\omega_c{}^2 \tau_{em}\tau_e}\right)$$

Consequently:

$$\tan^{-1}(\omega_c \tau_{si}) = 180^0 + 47^0 + \tan^{-1}\frac{2\pi 500 \cdot 0.1}{1-(2\pi 500)^2 \cdot 0.1 \cdot 0.02} = 46^0$$

And thus:

$$\tau_{si} = \frac{\tan 46^0}{2\pi 500} = 0.3075\ \mathrm{ms} \qquad |A(j\omega_c)| = 1$$

$$K_{si} = \frac{0.3075 \cdot 10^{-3} \cdot 1}{25 \cdot 1.1 \cdot 0.5 \cdot 0.1} \cdot \sqrt{\frac{(10^3 \pi 0.1)^2 + (1-10^6 \pi^2 0.1 \cdot 0.01)^2}{1+0.965^2}} = 2.205$$

کنترل حرکت متوالی (حلقه سرعت)

❖ بلوک دیاگرام سیستم کنترل سرعت شامل حلقه کنترل گشتاور (جریان) نیز می باشد.

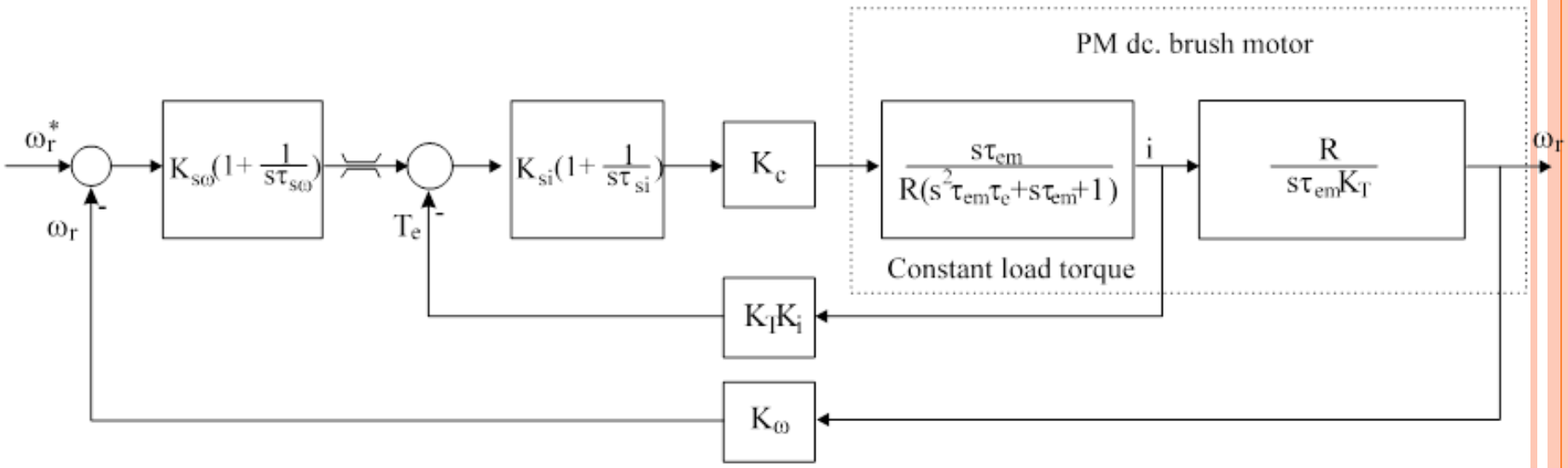

Figure 7.3. Speed control with torque (current) inner loop

کنترل حرکت متوالی (حلقه سرعت)

- فرض براین است که حلقه کنترل گشتاور مطابق روش قبل طراحی شده است و سپس به طراحی حلقه کنترل سرعت پرداخته می شود.

- به فرض طراحی کنترل کننده سرعت با فرکانس بحرانی ۱۰۰Hz و حد فاز ۶۰ درجه انجام شود. (فرکانس بحرانی بدلیل مکانیکی شدن سیستم کاهش می یابد)

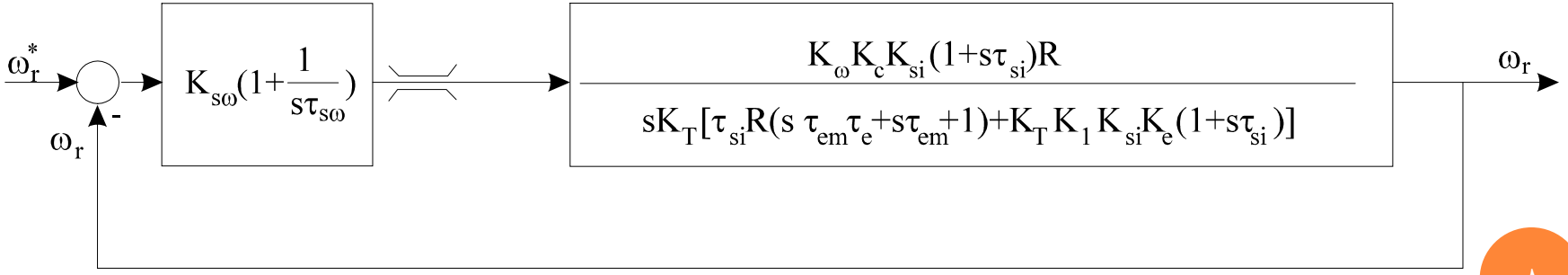

Figure 7.4. Simplified speed loop block diagram

کنترل حرکت متوالی

- به روش مشابه می توان حلقه کنترل کننده موقعیت را طراحی نمود و آن را به سیستم کنترل اضافه کرد.

- کنترل کننده متوالی در صورت تغییرات لختی و یا گشتاور بار و حتی تغییر پارامترها به خوبی عمل نمی کند.

کنترل موقعیت دیجیتال

❖ ساختار اصلی:

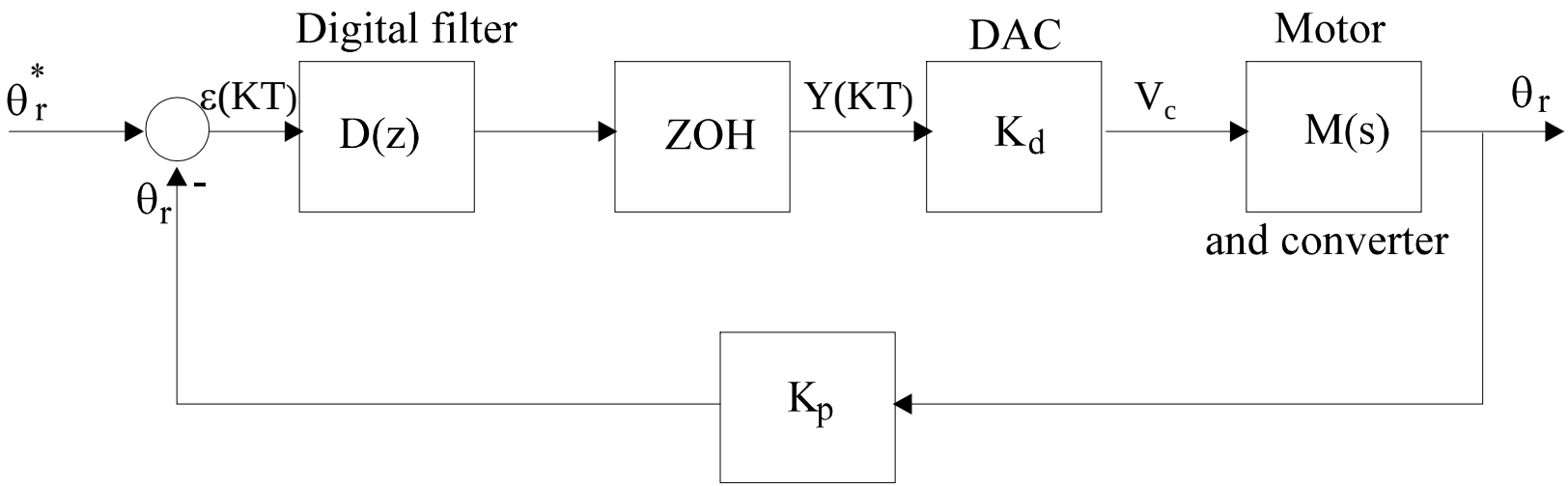

Figure 7.5. Basic digital position control system (digital to analog converter -DAC-, a sample and hold -ZOH-)

❖ مزایا: سرعت بالا، داشتن زبان منطقی، استفاده از نرم افزار بجای سخت افزار برای پروسه کنترل

کنترل موقعیت دیجیتال

Suppose only an 8 bit DAC with $V_d=\pm 10V$ is used. Consequently its amplification K_d is:

$$K_d = \frac{2V_d}{2^n} = \frac{20}{2^8} = \frac{20}{256} V/pulse$$

The amplification of the encoder K_p is:

$$K_p = \frac{4N}{2\pi} pulse/rad$$

$$\varepsilon(KT) = \theta_r^*(KT) - \theta_r(KT)$$

$$V_C = K_d \cdot Y(KT)$$

کنترل موقعیت دیجیتال

The command voltage V_c is kept constant during the discretization period T, the effect being known as ZOH (sample and hold). The digital filter may be expressed by finite difference equations of the type:

$$Y(KT) = 2\varepsilon(KT) - \varepsilon((K-1)T)$$

- The Z transform shifting property is:

$$f(K-m) \rightarrow Z^{-m} f(Z) \quad \text{with} \quad f(K) \rightarrow f(Z)$$

- Consequently $$Y(Z) = 2\varepsilon(Z) - Z^{-1}\varepsilon(Z)$$

The D(Z) is thus: $$D(Z) = \frac{Y(Z)}{\varepsilon(Z)} = \frac{2Z-1}{Z}$$

می توان طراحی را به صورت زمان پیوسته انجام داد و سپس به زمان گسسته تبدیل کرد.

$$H(s) = K_d \cdot K_p \cdot ZOH(s) \cdot M(s)$$

$$D(s) = K\frac{s+\omega_1}{s+\omega_2}$$

$$s = \frac{2}{T}\frac{Z-1}{Z+1}$$

کنترل موقعیت دیجیتال استاندارد

- معمولا کنترلرهای صنعتی موقعیت با پیاده سازی دیجیتالی از نوع P می باشند.

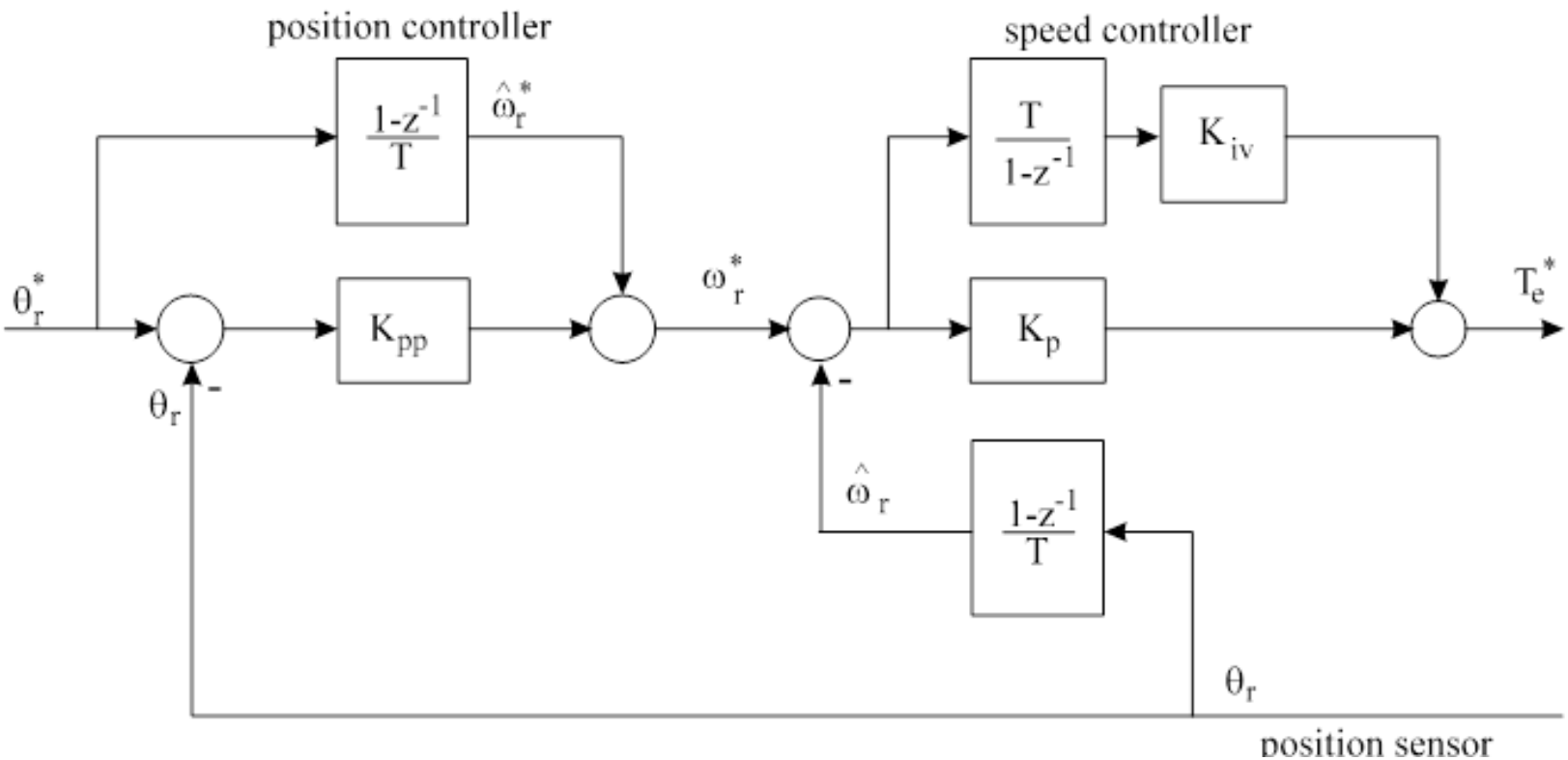

Figure 7.6. Standard digital position control system with inner speed loop

کنترل موقعیت دیجیتال استاندارد

- در حالت کلی پاسخ این کنترلر تنها برای فرمان های با دینامیک پایین (پایینتر از فرکانس کنترلر موقعیت که معمولا بین ۰/۵ تا ۱۰ هرتز است) مناسب است. به همین دلیل در صورت وجود تغییرات گشتاور بار و لختی موتور در حالت گذرا برای تعقیب صحیح موقعیت هدف از کنترل فضای حالت استفاده می شود.

کنترل حرکت در فضای حالت

It should be noted that the friction torque coefficient b_p as well as the inertia J have to be known with good precision.

The estimated and reference speeds and the reference acceleration are all given as time functions:

$$\hat{\omega}_r = \frac{\theta_r(k) - \theta_r(k-1)}{T}$$

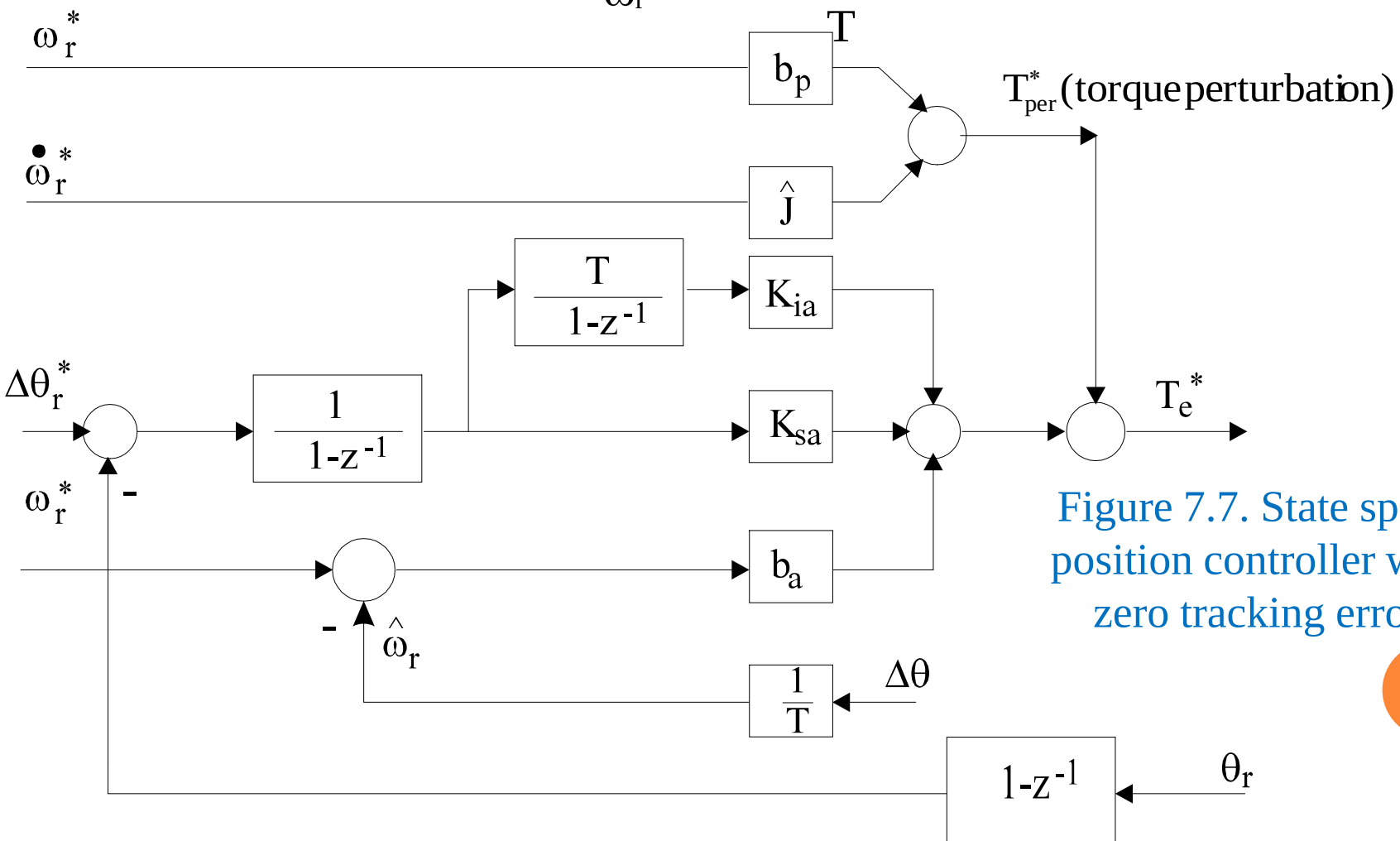

Figure 7.7. State space position controller with zero tracking error

کنترل حرکت در فضای حالت

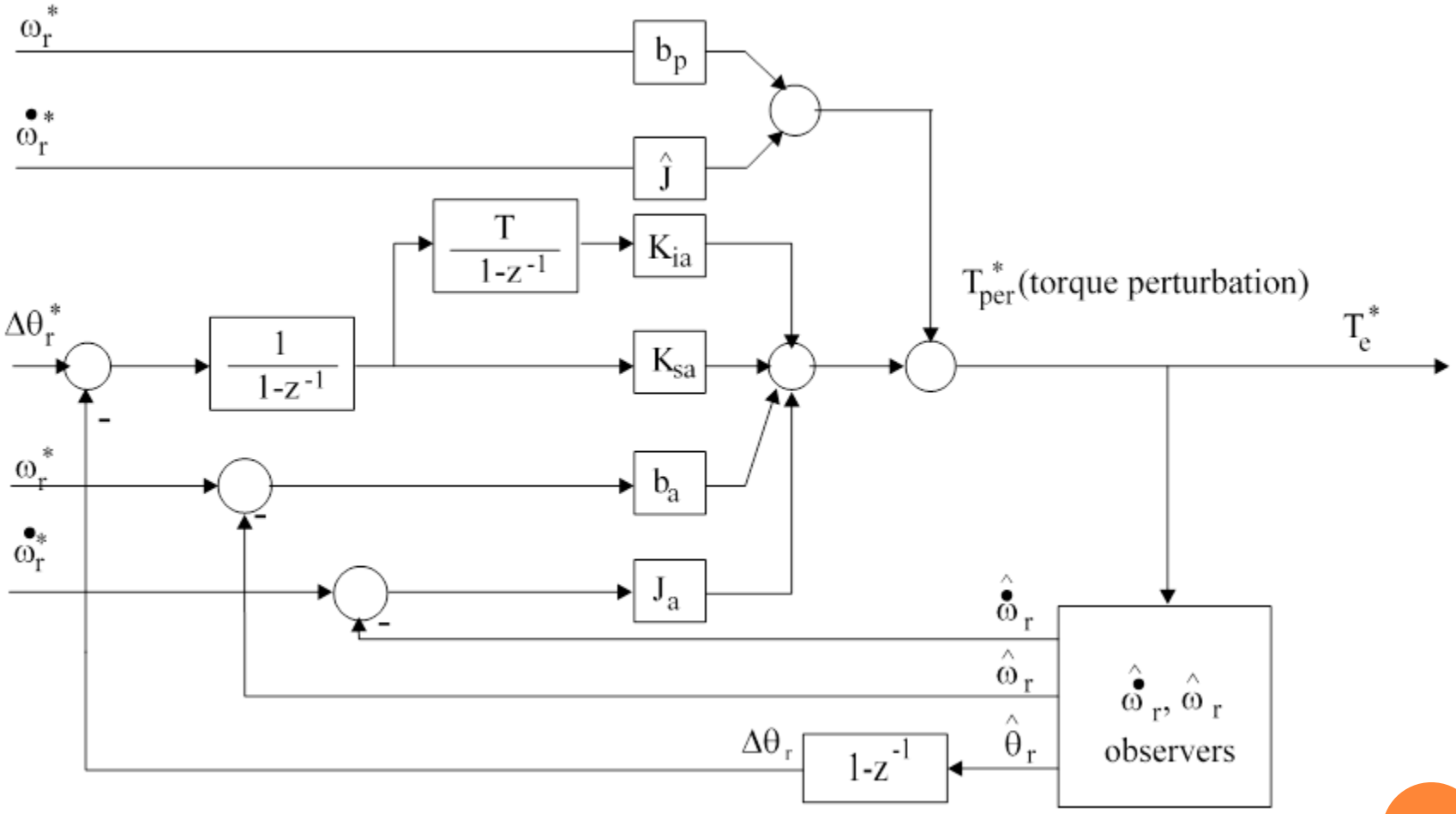

Figure 7.9. Position controller with observers and loops for speed and acceleration and reference torque feed-forward signal