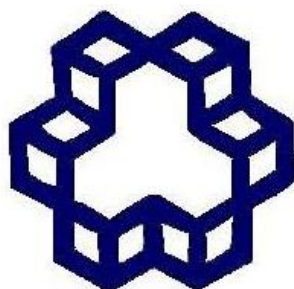


به نام یزدان پاک



K.N.Toosi University Of Technology
Faculty Of Electrical Engineering

پروژه دوم درس کنترل تطبیقی

رگولاتورهای خود تنظیم

استاد: دکتر علی خاکی صدیق

یزدان باتمانی

گسسته‌سازی سیستم پیوسته

تابع تبدیل سیستم داده شده بصورت زیر است:

$$H(s) = \frac{-0.9375(s + 0.1)(s + 0.8)}{(s - 0.25)(s^2 + s + 0.3)}$$

با انتخاب زمان نمونه‌برداری $T_s = 0.5$ و استفاده از دستور $c2d$ ، سیستم زمان گسسته زیر حاصل خواهد شد:

$$H(z) = \frac{-0.485z^2 + 0.786z - 0.3087}{z^3 - 2.681z^2 + 2.361z - 0.6873}$$

برای این سیستم زمان گسسته مقدار بهره DC برابر $H(z = 1) = 1.0548$ بوده که حدوداً برابر بهره DC سیستم پیوسته در زمان $H(s = 0) = 1$ است و معیاری از مناسب بودن زمان نمونه‌برداری انتخاب شده می‌باشد. صفرهای تابع تبدیل گسسته در زمان در 0.9513 و 0.6691 قرار داشته و قطب‌های آن نیز در 1.1331 و $0.7739 \pm j0.0869$ قرار دارند که منجر به یک سیستم زمان گسسته ناپایدار و حداقل فاز می‌شوند. با توجه به تابع تبدیل بدست آمده می‌توان نوشت:

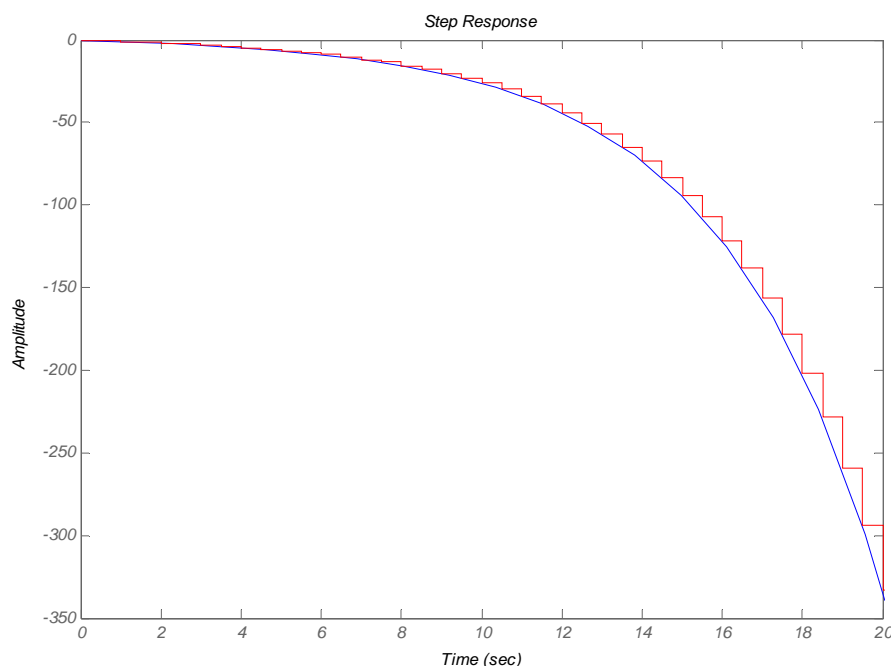
$$A(q)y(t) = B(q)u(t)$$

$$\begin{cases} A^*(q^{-1}) = 1 - 2.681q^{-1} + 2.361q^{-2} - 0.6873q^{-3} \\ B^*(q^{-1}) = -0.485q^{-1} + 0.786q^{-2} - 0.3087q^{-3} \end{cases}$$

که می‌توان آنرا بصورت زیر در نظر گرفت:

$$\begin{cases} A^*(q^{-1}) = 1 + a_1q^{-1} + a_2q^{-2} + a_3q^{-3} \\ B^*(q^{-1}) = b_1q^{-1} + b_2q^{-2} + b_3q^{-3} \end{cases}$$

در شکل (۱) پاسخ پله سیستم پیوسته در زمان و گسسته در زمان همراه با هم آورده شده‌اند:



شکل (۱): پاسخ پله سیستم پیوسته در زمان و گسسته در زمان.

در ادامه از این تابع تبدیل استفاده خواهیم کرد.

(۱) جاییابی قطب با فیدبک دینامیکی

برای انجام این قسمت از سیستم گسسته ناپایدار استفاده خواهیم کرد. ابتدا سیستم داده شده را با روش جاییابی قطب بدون حذف صفرهای سیستم کنترل خواهیم کرد. ابتدا درجات چند جمله‌ای‌های مسئله را برای دستیابی به یک کنترل حداقل مرتبه آورده می‌شود. با توجه به اینکه سیستم داده شده، سه قطب و دو صفر دارد، درجه چند جمله‌ای‌ها بصورت زیر خواهد بود:

$$\deg(A) = 3, \deg(B) = 2$$

و برای دستیابی به کنترل حداقل مرتبه لازم است که:

$$\deg(A_m) = \deg(A) = 3, \deg(B_m) = \deg(B) = 2$$

درجه چند جمله‌ای A_0 با توجه به وجود حذف یا عدم وجود حذف صفر و قطب تعیین خواهد شد.

۱-۱ جاییابی قطب بدون حذف صفر و قطب

در این حالت $\deg(B^+) = 0$ و بنابراین $\deg(B^-) = \deg(B) = 2$ خواهد بود. با توجه به monic بودن چند جمله‌ای B^+ و درجه صفر بودن آن $B^+ = 1$ و $B^- = B$ خواهد بود. بنابراین خواهیم داشت:

$$\deg(A_0) = \deg(A) - \deg(B^+) - 1 = 3 - 0 - 1 = 2$$

$$B_m = B^- B'_m \xrightarrow{\deg(B_m)=\deg(B^-)} \deg(B'_m) = 0 \rightarrow B'_m = \beta$$

که در آن:

$$\beta = \frac{A_m(1)}{B(1)}$$

با این مقدار β ، بهره حالت ماندگار تابع تبدیل حلقه بسته برابر واحد خواهد بود. برای بدست آوردن β لازم است که چند جمله‌ای $A_m(q)$ را داشته باشیم. با توجه به تابع تبدیل فرآیند داده شده، محل ریشه‌های این چند جمله‌ای را در 0.4، 0.8 و 0.6 قرار می‌دهیم. این انتخاب با توجه به دینامیک سیستم داده شده و زمان نمونه‌برداری انتخاب شده، صورت گرفته است. در واقع برای این محل قطب‌ها و محل صفرهای مطلوب حلقه بسته (یا حذف صفر داریم یا نداریم)، تا رسیدن پاسخ پله به حالت ماندگار خود (زمان نشست) حدود ۲۰ نمونه برداشته خواهد شد. قطب‌های روی‌تگر را نیز در نقاط ۰/۰۳ و -۰/۰۳ قرار می‌دهیم. این انتخاب‌ها با توجه به دینامیک سیستم و زمان نمونه‌برداری صورت گرفته است. با این فرضیات خواهیم داشت:

$$A(q) = q^3 - 2.681q^2 + 2.361q - 0.6873$$

$$B(q) = -0.485q^2 + 0.786q - 0.3087$$

$$A_0 = q^2 - 0.0009$$

$$A_m = (q - 0.4)(q - 0.6)(q - 0.8)$$

$$B^- = B = -0.485q^2 + 0.786q - 0.3087$$

با حل معادله دیوفانتین $AR + B^-S = A_0A_m$ ، چند جمله‌ای‌های زیر برای R و S بدست می‌آیند:

$$R(q) = q^2 - 15.30q - 9.92$$

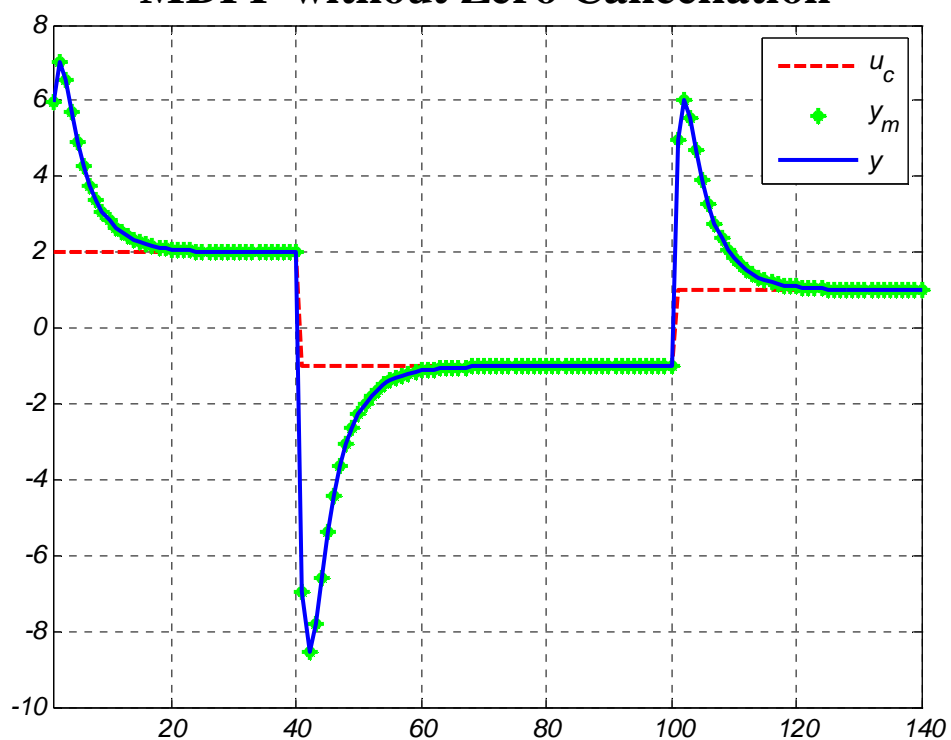
$$S(q) = -33.37q^2 + 53.70q - 22.08$$

و بنابراین چند جمله‌ای T برابر خواهد بود با:

$$T(q) = -6.14q^2 + 0.0055$$

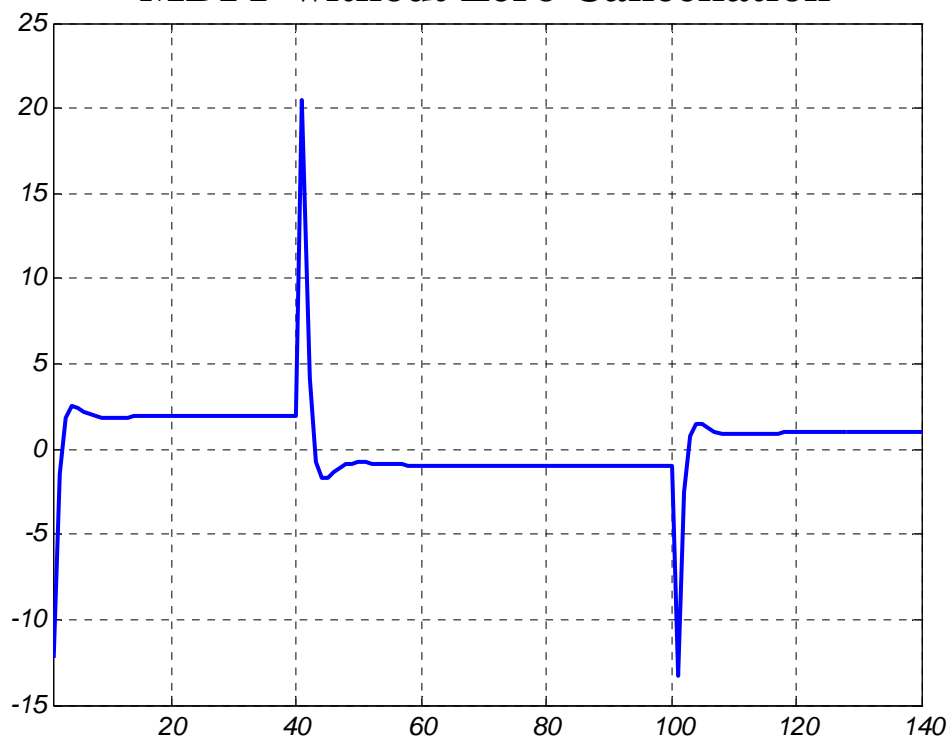
در شکل‌های (۲) و (۳) بترتیب خروجی سیستم حلقه بسته و سیگنال کنترلی تولید شده در این حالت برای ورودی داده شده آورده شده‌اند.

MDPP without Zero Cancellation



شکل (۲): خروجی سیستم حلقه بسته برای ورودی داده شده و کنترلر جایاب قطب حداقل مرتبه بدون حذف صفر.

MDPP without Zero Cancellation



شکل (۳): سیگنال کنترل برای ورودی داده شده و کنترلر جایاب قطب حداقل مرتبه بدون حذف صفر.

همان طور که مشاهده می‌شود در لحظات اولیه اعمال ورودی، پاسخ سیستم فراجهبش زیادی دارد که دلیل آن محل نامناسب صفرهای سیستم است که در طراحی حذف نشده‌اند و اثر نامناسبی بر روی پاسخ سیستم ایجاد می‌نمایند.

۲-۱- جایابی قطب با حذف صفر و قطب

همان طور که در قسمت قبل اشاره شد، در روش جایابی بدون حذف صفر و قطب ممکن است بواسطه وجود محل نامناسب صفرها، مشخصات پاسخ گذرای سیستم حلقه بسته چندان مناسب نباشد. اما در روش جایابی قطب با حذف صفر و قطب، امکان حذف کردن این صفرهای نامناسب به طراح داده می‌شود و مشاهده خواهیم کرد که پاسخ سیستم به دلیل حذف صفرهای نامناسب آن، بهتر خواهد شد. با توجه به محل صفرهای سیستم، هر دو صفر سیستم را حذف خواهیم کرد. مجدداً قطب‌های مطلوب حلقه بسته را در 0.8، 0.4 و 0.6 جایابی می‌کنیم. با این فرضیات خواهیم داشت:

$$A(q) = q^3 - 2.681q^2 + 2.361q - 0.6873$$

$$B(q) = -0.485q^2 + 0.786q - 0.3087$$

$$A_m = (q - 0.8)(q - 0.4)(q - 0.6)$$

$$\beta = \frac{A_m(1)}{B(1)} = -0.099$$

$$B^- = b_0 = -0.485$$

$$B^+ = q^2 - 1.6205q + 0.6366$$

$$\deg(A_0) = \deg(A) - \deg(B^+) - 1 = 3 - 2 - 1 = 0 \rightarrow A_0 = 1$$

با توجه به معادله دیوفانتین $AR' + B^-S = A_0A_m$ ، چند جمله‌ای $R' = 1$ بدست می‌آید. چند جمله‌ای S نیز براحتی با توجه به این معادله محاسبه می‌شود.

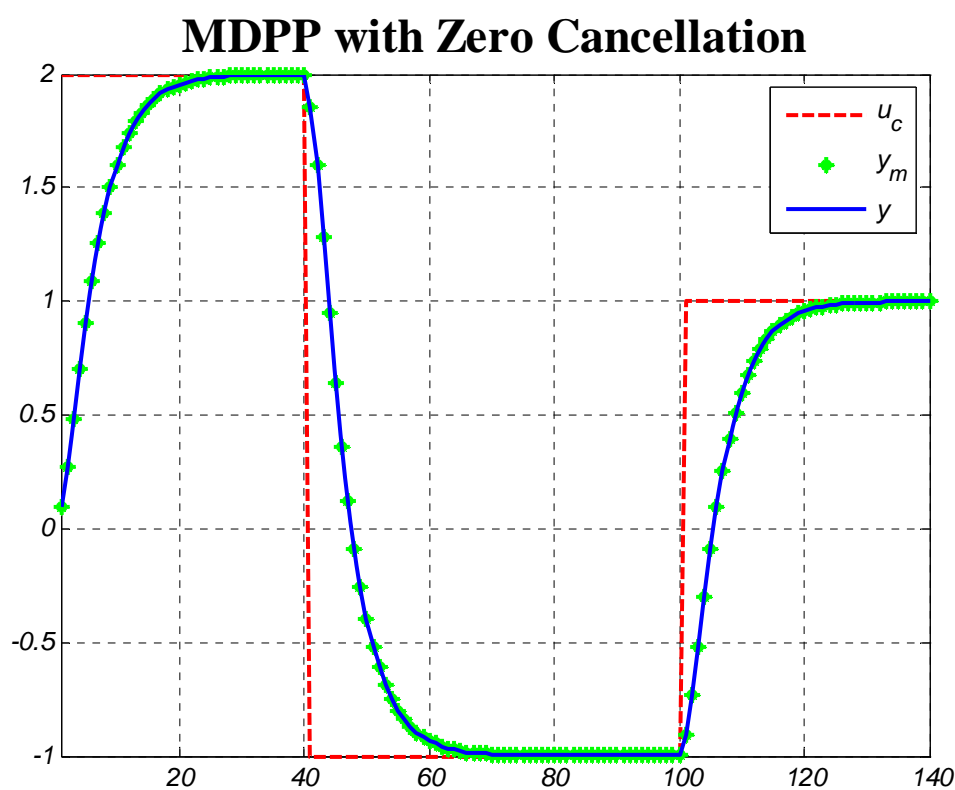
$$S(q) = -1.81q^2 + 2.72q - 1.02$$

و بنابراین چند جمله‌ای T برابر خواهد بود با:

$$T(q) = -0.099q$$

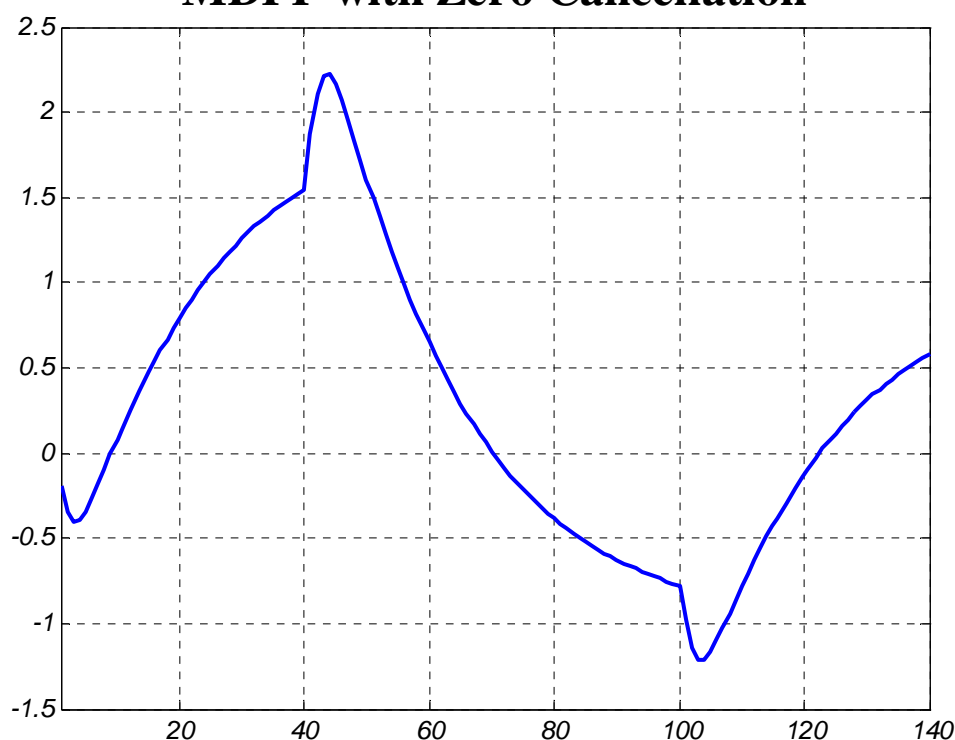
در واقع در این طراحی، قطب‌های سیستم حذف شده و قطب‌های مطلوب در مبداء جایابی می‌شوند.

در شکل‌های (۴) و (۵) بترتیب خروجی سیستم حلقه بسته و سیگنال کنترلی تولید شده در این حالت برای ورودی داده شده آورده شده‌اند.



شکل (۴): خروجی سیستم حلقه بسته برای ورودی داده شده و کنترلر جایاب قطب حداقل مرتبه با حذف صفر.

MDPP with Zero Cancellation



شکل (۵): سیگنال کنترل برای ورودی داده شده و کنترلر جایاب قطب حداقل مرتبه با حذف صفر.

۳-۱- مقایسه و نتیجه‌گیری

در مقایسه با پاسخ حاصل از کنترلر قسمت اول (بدون حذف صفر) پاسخ بدست آمده در قسمت دوم (با حذف صفر) بسیار مناسب‌تر می‌باشد که به دلیل حذف صفرهای نامناسب فرآیند می‌باشد. البته همان‌طور که از شکل (۵) دیده می‌شود در نتیجه حذف صفرهای فرآیند، سیگنال کنترلی رفتار نسبتاً نامناسبی خواهد داشت. البته پر واضح است که اگر محل اولیه صفرهای فرآیند مناسب باشد، روش اول مناسب‌تر خواهد بود. به منظور مقایسه کمی این دو روش، از دو معیار حداکثر فراجش و انتگرال خطا استفاده خواهیم کرد. نتایج در جدول یک آورده شده است.

جدول یک: مقایسه کمی روش جایابی قطب با حذف صفر و قطب و جایابی قطب بدون حذف صفر و قطب.

روش	حداکثر فراجش	انتگرال خطا
بدون حذف صفر	۲۵۱ درصد	۱۰۵/۸۳
با حذف صفر	صفر	۴۲/۲۰

مشاهده می‌شود که برای هر دو معیار، روش جایابی قطب با حذف صفر و قطب مناسب‌تر از روش جایابی قطب بدون حذف صفر و قطب است.

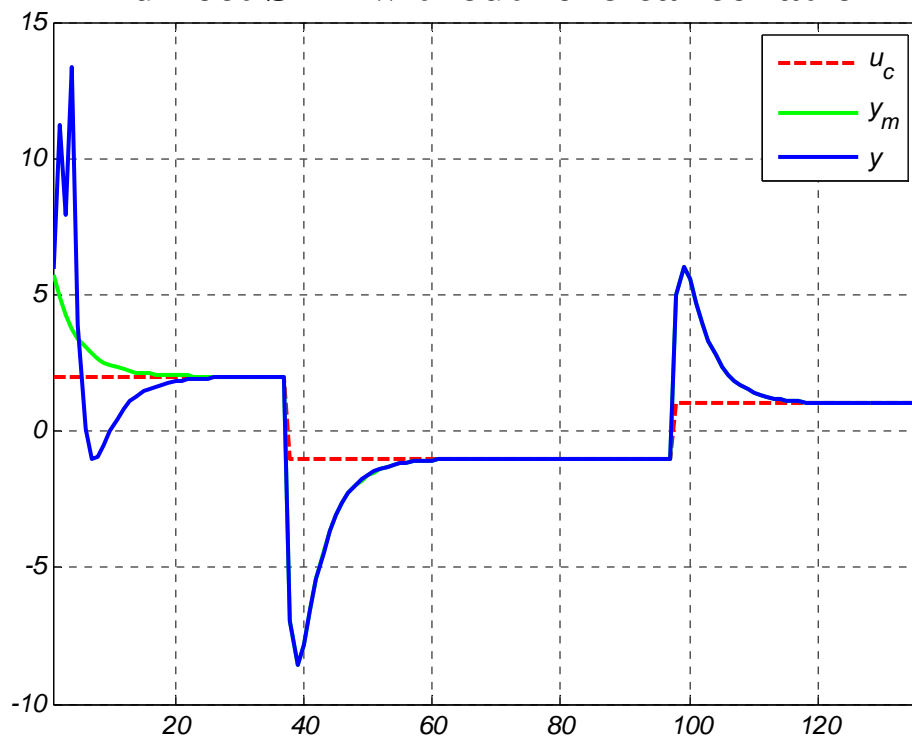
(۲) STR با جایابی قطب

۲-۱ - STR غیرمستقیم بدون حذف صفر و قطب

در این بخش از روش غیرمستقیم بدون حذف صفر و قطب استفاده خواهیم کرد. همان طور که می‌دانیم در این روش تطبیقی، داده‌های معلوم مسئله چند جمله‌ای‌های A_m ، B_m و A_0 هستند. در هر مرحله (هر زمان نمونه برداری) پارامترهای فرآیند (ضرایب چند جمله‌ای‌های A و B) با استفاده از روش‌های شناسایی سیستم (در اینجا RLS) تخمین زده می‌شوند و سپس با استفاده از این پارامترها، یک کنترلر تطبیقی با استفاده از روش جایابی قطب بدون حذف صفرهای سیستم طراحی خواهد شد. مانند بخش ۱-۱ وجود این صفرها ممکن است منجر به رفتار نامناسب سیستم حلقه بسته شود. مجدداً قطب‌های مطلوب حلقه بسته را در 0.8، 0.4 و 0.6 جایابی می‌کنیم. قطب‌های روی‌تگر در نقاط 0.3 و -0.3 قرار داده خواهند شد. برای شرایط اولیه زیر خروجی سیستم حلقه بسته همراه با خروجی مطلوب و ورودی مرجع در شکل (۶) آورده شده است.

$$\hat{\theta}_0 = [-2 \ 2 \ 0.5 \ -0.5 \ 0.5 \ -0.5]^T; P_0 = \text{diag}(10^5, 10^5, 10^5, 10^3, 10^3, 10^3),$$

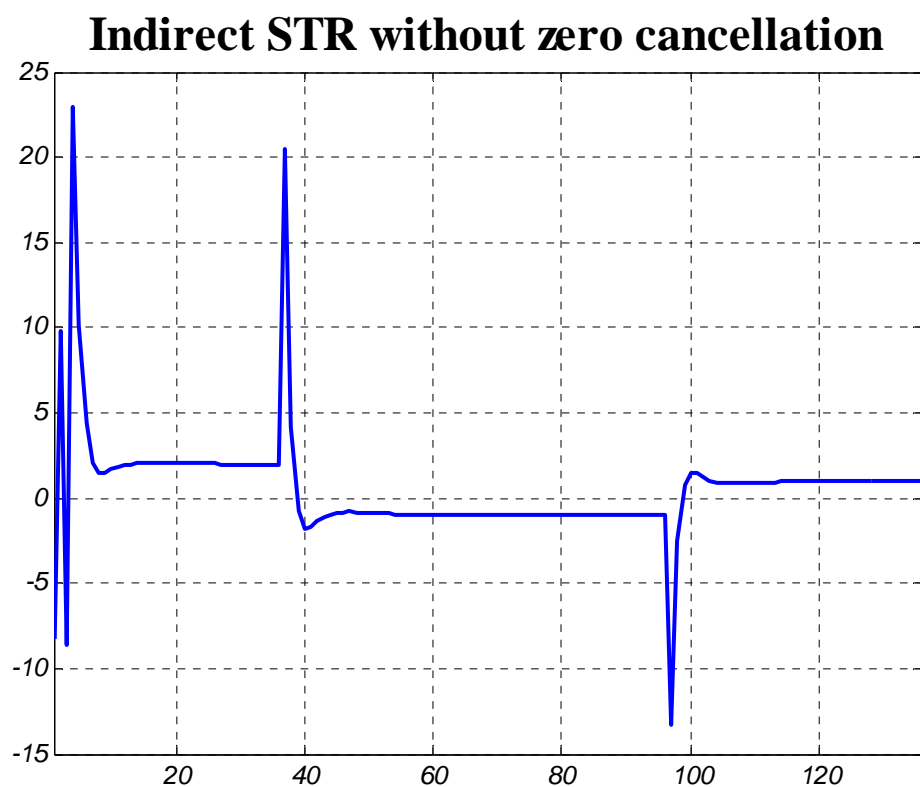
Indirect STR without zero cancellation



شکل (۶): خروجی سیستم با وجود کنترلر تطبیقی با روش STR غیرمستقیم بدون حذف صفر و قطب.

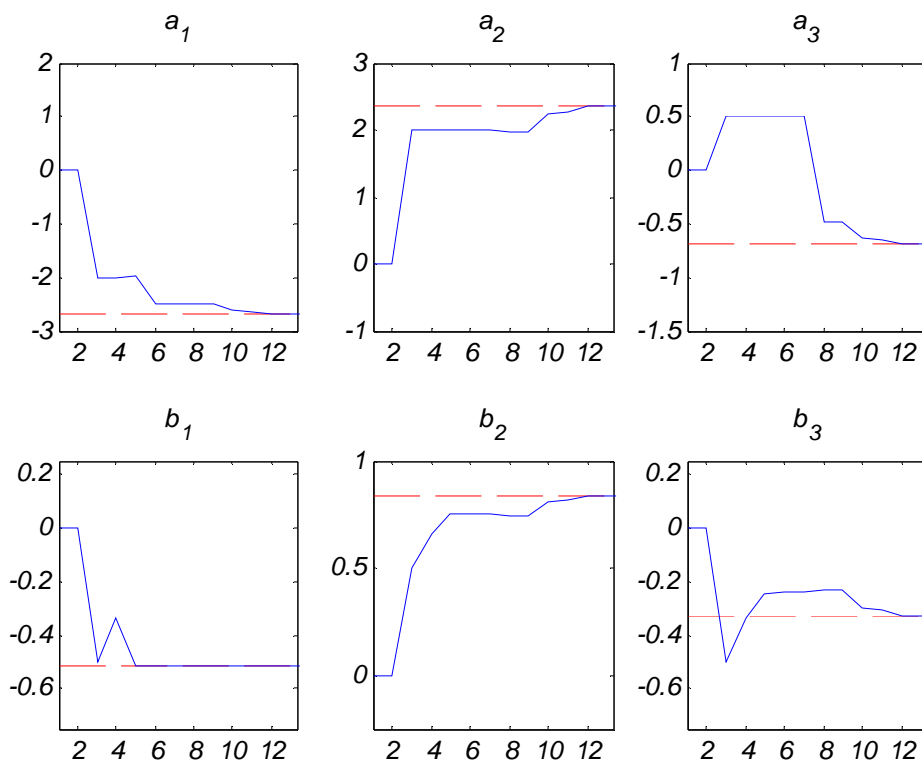
مشاهده می‌شود که در لحظات نخست که هنوز پارامترهای سیستم به خوبی تخمین زده نشده‌اند، سیستم رفتار مناسبی نداشته اما با گذشت زمان که پارامترها به مقادیر واقعی همگرا می‌شوند، کنترل‌کننده به خوبی سیستم را کنترل کرده و سیستم حلقه بسته ورودی مرجع را دنبال می‌کند. اما به دلیل حضور صفرهای نامناسب حلقه باز، پاسخ سیستم حلقه بسته چندان مناسب نمی‌باشد. نوساناتی که در خروجی دیده می‌شود بستگی به شرایط اولیه پارامترها و مقدار اولیه ماتریس کواریانس دارد.

لازم به ذکر است که چون ورودی اعمال شده در واقع دنباله‌ای از پله‌هاست و طراحی برای دنبال کردن پله صورت گرفته است، سیستم حلقه بسته توانایی دنبال کردن ورودی را دارد. برای ورودی‌های دیگر لازم است که طراحی متناسب با ورودی صورت گیرد. شکل (۷) سیگنال کنترلی را با این روش نشان می‌دهد.



شکل (۷): سیگنال کنترل برای ورودی داده شده و کنترلر STR بدون حذف صفر.

در شکل (۸) همگرایی پارامترهای سیستم به مقادیر واقعی نشان داده شده است.



شکل (۸): تخمین پارامترهای سیستم.

همان طور که انتظار داریم در لحظات اولیه پارامترهای سیستم بدرستی شناسایی نشده‌اند. اما بر اساس certainty equivalence principal طراحی با استفاده از همین اطلاعات غلط انجام گرفته و با همگرا شدن پارامترهای مدل فرآیند به مقادیر واقعی خود، پارامترهای کنترل کننده نیز به مقادیر بدست آمده در بخش ۱.۱ همگرا خواهند شد. با توجه به شکل (۸) می‌توان گفت که تقریباً ۱۲ مرحله طول می‌کشد تا پارامترهای فرآیند بدرستی تخمین زده شوند.

چند جمله‌ای‌های محاسبه شده برای R ، S و T عبارتند از:

$$R(q) = q^2 - 15.28q - 9.90$$

$$S(q) = -33.33q^2 + 53.62q - 22.04$$

$$T(q) = -6.14q^2 + 0.0055$$

که بسیار نزدیک به چند جمله‌ای‌های بدست آمده در بخش ۱.۱ می‌باشند.

۲.۱.۲. تغییر مرتبه مدل فرآیند

در این قسمت بدنبال یافتن اثر مرتبه مدل بر روی طراحی کنترلر و پاسخهای سیستم هستیم. ابتدا فرض می‌کنیم که فرآیند را یک مدل مرتبه یک در نظر گرفته باشیم. در این حالت، چند جمله‌ای مخرج را درجه یک و چند جمله‌ای صورت را درجه صفر فرض می‌کنیم و کنترلر STR غیرمستقیم را برای آن طراحی خواهیم کرد. با توجه به ساختار مدل انتخاب شده برای فرآیند، درجه کنترلر یک و چند جمله‌ای‌های S , R و T همگی مرتبه صفر خواهند بود. محاسبات مربوطه در زیر آورده شده‌اند.

$$A(q) = q + \hat{a}$$

$$B(q) = \hat{b}$$

$$A_m = q - 0.2$$

$$B_m = A_m(1) = 0.8$$

$$B^- = \hat{b}$$

$$B^+ = 1$$

$$\deg(A_0) = \deg(A) - \deg(B^+) - 1 = 1 - 0 - 1 = 0 \rightarrow A_0 = 1$$

با توجه به معادله دیوفانتین $AR' + B^-S = A_0A_m$ ، چند جمله‌ای $R' = 1$ بدست می‌آید. چند جمله‌ای S نیز براحتی با توجه به این معادله محاسبه می‌شود.

$$S = -\frac{0.2 + \hat{a}}{\hat{b}}$$

و بنابراین چند جمله‌ای T برابر خواهد بود با:

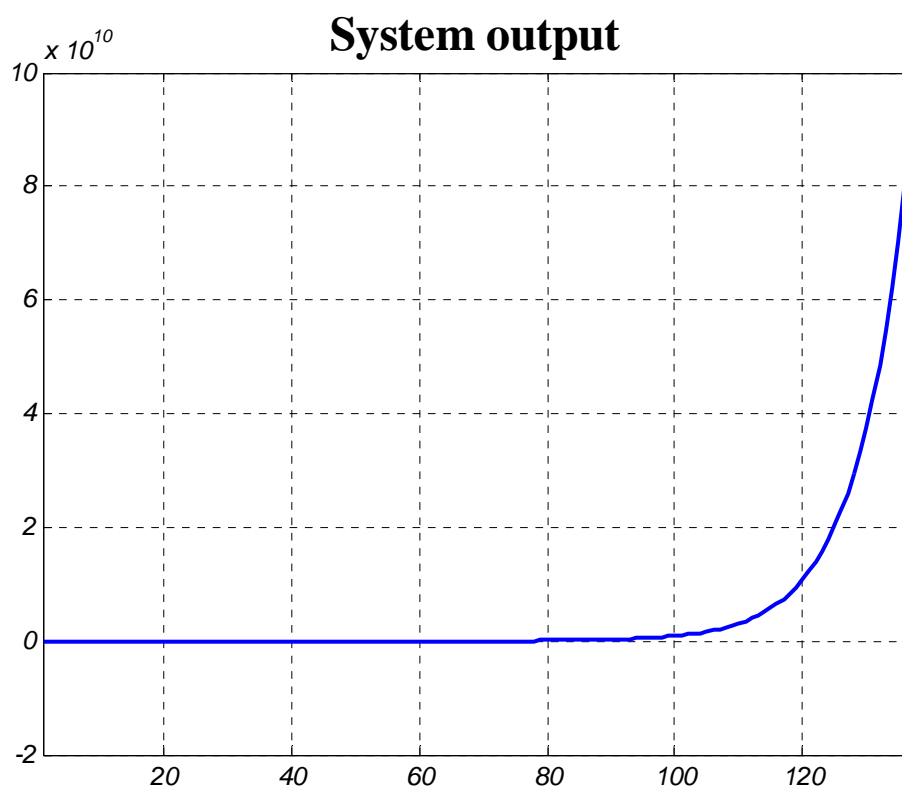
$$T = \frac{0.8}{\hat{b}}$$

و با این طراحی خواهیم داشت:

$$y(t) = \frac{0.8}{q - 0.2} u_c(t)$$

$$u(t) = \frac{0.8(q + \hat{a})}{\hat{b}(q - 0.2)} u_c(t)$$

که در این روابط \hat{a} و \hat{b} در هر مرحله با استفاده از روش شناسایی RLS بدست می‌آیند. در شکل (۹) خروجی سیستم حلقه بسته برای این کنترلر آورده شده است.



شکل (۹): خروجی سیستم حلقه بسته برای مدل مرتبه اول.

مشاهده می‌شود که خروجی سیستم به سمت ناپایداری پیش رفته که این موضوع به این دلیل است که سیستم در نظر گرفته شده قابل مدل شدن با یک مدل مرتبه اول نبوده و در نتیجه کنترلر به خوبی کار نمی‌کند. می‌توان گفت که اگر سیستم بگونه‌ای باشد که بتوان رفتار آنرا با یک مدل از درجه پایین‌تر مدل کرد، الگوریتم STR بخوبی عمل خواهد کرد. اما اگر سیستم بگونه‌ای باشد که نتوان با یک مدل پایین‌تر آنرا مدل کرد، الگوریتم STR جواب مناسبی نخواهد داشت.

در ادامه فرض می‌کنیم که مدل سیستم را یک مدل مرتبه پنج فرض کرده و الگوریتم STR را برای آن پیاده کنیم. پیش‌بینی می‌شود که کنترل‌کننده همچنان پاسخ خوبی داشته باشد. زیرا همان‌طور که در پروژه بخش شناسایی سیستم مشاهده شد، یک سیستم مرتبه پایین را می‌توان با یک مدل مرتبه بالاتر

بطور مناسبی مدل سازی کرد. شکل (۱۰) پاسخ سیستم حلقه بسته را برای مدل فرآیند مرتبه پنج با وجود کنترلر STR غیرمستقیم بدون حذف صفر و قطب را نشان می دهد. قطب های مطلوب حلقه بسته را در 0.6، 0.8، 0.4، 0.4 و 0.6 جایابی می کنیم. با این فرضیات خواهیم داشت:

$$\deg A_m = \deg A = 5$$

$$\deg B_m = \deg B = 4$$

$$B^+ = 1$$

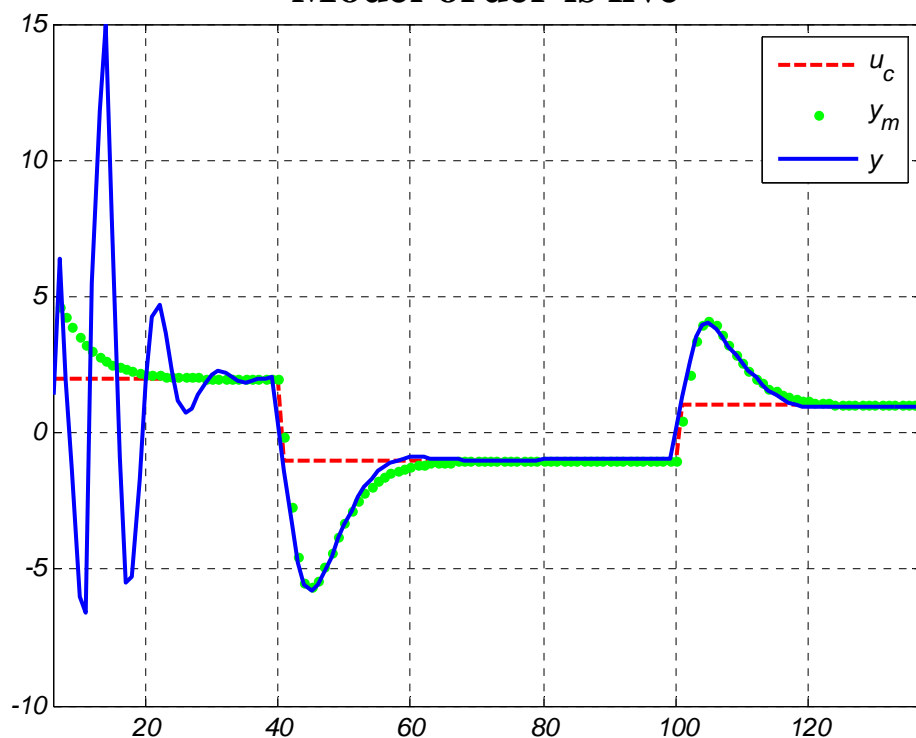
$$\deg(A_0) = \deg(A) - \deg(B^+) - 1 = 5 - 0 - 1 = 4$$

با توجه به این محاسبات لازم است که مرتبه رویتگر برابر چهار باشد. محل قطب های رویتگر را در ± 0.01

و ± 0.03 قرار می دهیم. محل مطلوب صفرهای سیستم حلقه بسته را هم در 0.6691، 0.9513، 0 و 0

قرار می دهیم. (دو مقدار اول همان صفرهای سیستم حلقه باز هستند).

Model order is five



شکل (۱۰): پاسخ سیستم حلقه بسته را برای مدل فرآیند مرتبه پنج با وجود کنترلر STR غیرمستقیم بدون حذف صفر و قطب.

از این شکل مشاهده می‌شود که با در نظر گرفتن مدل مرتبه پنج برای سیستم و طراحی کنترلر STR غیرمستقیم بدون حذف صفر و قطب، سیستم حلقه بسته قادر به دنبال کردن ورودی پله خواهد بود.

مقایسه و نتیجه‌گیری

همان طور که از نتایج این بخش مشاهده می‌شود اگر مرتبه مدل سیستم را کمتر از مرتبه واقعی مدل در نظر بگیریم، کنترلر خود تنظیم طراحی شده توانایی پایداری سازی سیستم را نخواهد داشت. حال آنکه اگر در تعیین مرتبه مدل برای سیستم، از مدلی با مرتبه بالاتر برای مدلسازی سیستم استفاده کنیم، کنترلر خود تنظیم توانایی پایداری سازی سیستم و دنبال کردن ورودی داده شده را دارد. بنابراین در تعیین مرتبه مدل لازم است دقت گردد.

۲.۱.۳. اثر نویز سفید و رنگی

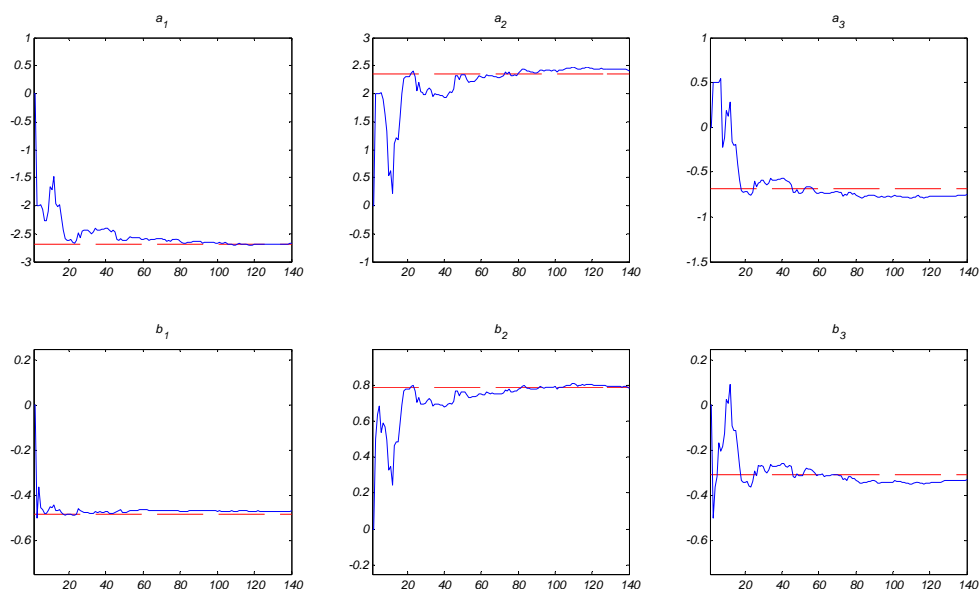
همان طور که در پروژه بخش شناسایی دیده شد، روش RLS در حضور نویز سفید پارامترهای سیستم را بدون بایاس تخمین می‌زند. حال آنکه در حضور نویز رنگی پارامترهای مدل را بصورت بایاس‌دار تخمین خواهد زد. در نتیجه کنترلی که با استفاده از این پارامترهای طراحی خواهد شد عملکرد مناسبی نخواهد داشت. برای داشتن نویز رنگی، نویز سفید را از یک فیلتر عبور می‌دهیم. برای فیلتر $C(q^{-1}) = 1 - 0.5q^{-1}$ بوده و فرض می‌کنیم که نویز سفید با انحراف استاندارد ۰.۱ در ورودی فیلتر وجود داشته باشد. در شکل (۱۱) پاسخ سیستم حلقه بسته همراه با خروجی مطلوب و ورودی مرجع در حضور نویز سفید و روش شناسایی RLS آورده شده‌اند.

Indirect STR without zero cancellation



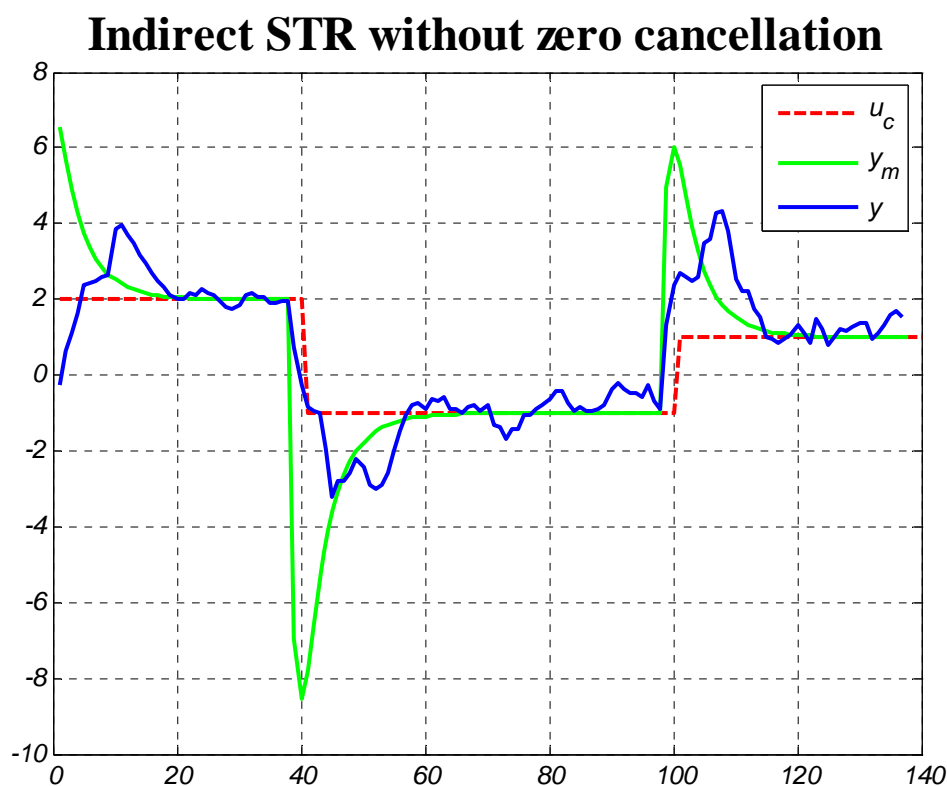
شکل (۱۱): پاسخ سیستم حلقه بسته همراه با خروجی مطلوب و ورودی مرجع در حضور نویز سفید و روش شناسایی RLS.

در شکل (۱۲) پارامترهای تخمینی همراه با مقادیر واقعی در حضور نویز سفید و روش شناسایی RLS آورده شده‌اند.



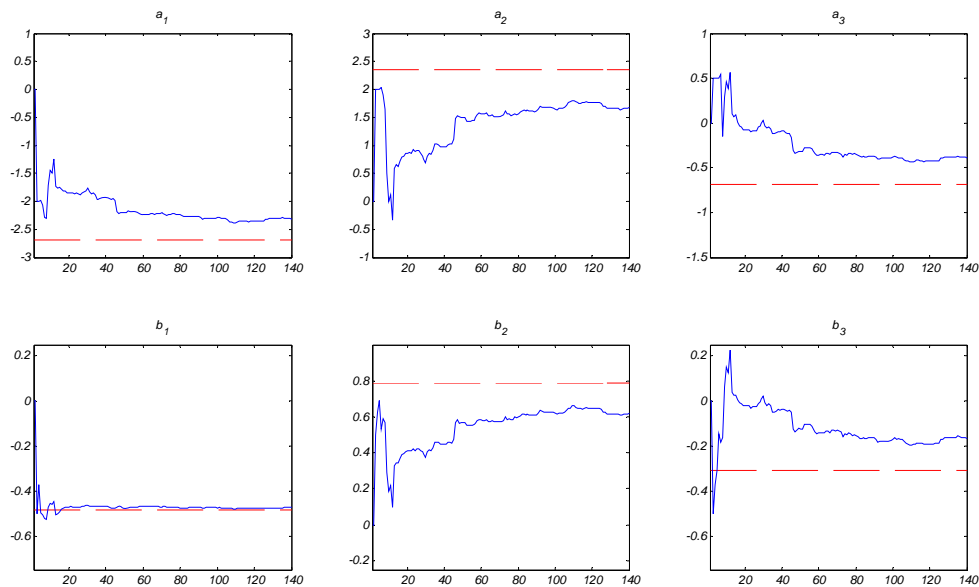
شکل (۱۲): پارامترهای تخمینی همراه با مقادیر واقعی در حضور نویز سفید و روش شناسایی RLS.

در شکل (۱۳) پاسخ سیستم حلقه بسته همراه با خروجی مطلوب و ورودی مرجع در حضور نویز رنگی و روش شناسایی RLS آورده شده‌اند.



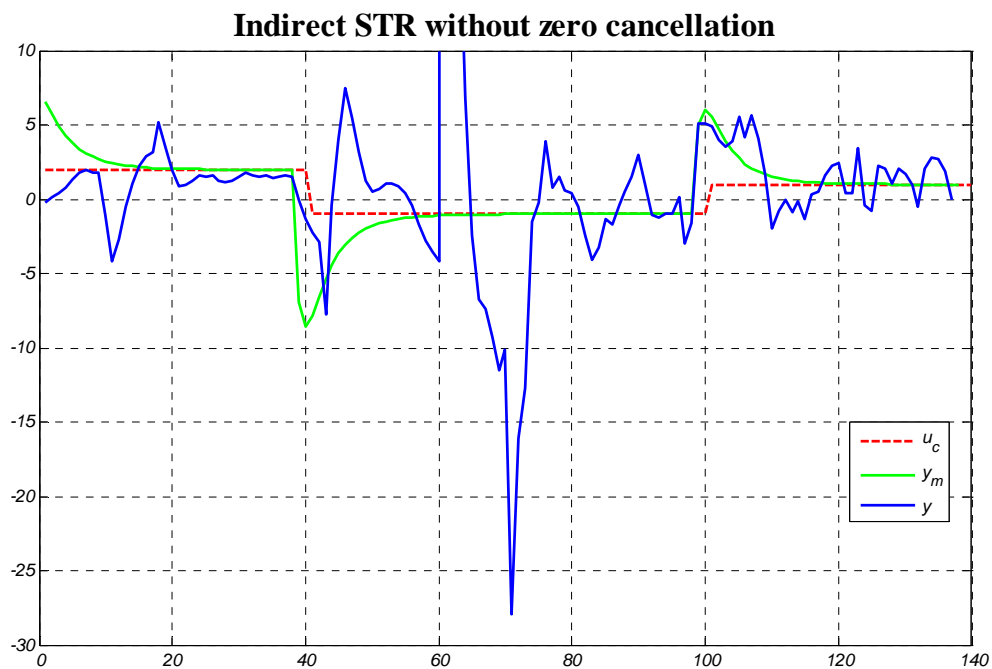
شکل (۱۳): پاسخ سیستم حلقه بسته همراه با خروجی مطلوب و ورودی مرجع در حضور نویز رنگی و روش شناسایی RLS.

در شکل (۱۴) پارامترهای تخمینی همراه با مقادیر واقعی در حضور نویز رنگی و روش شناسایی RLS آورده شده‌اند.

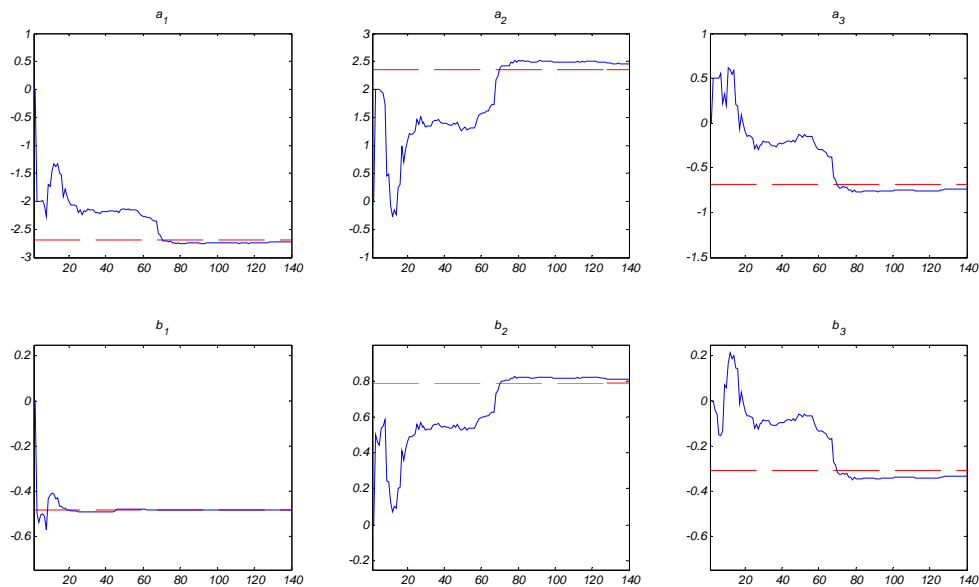


شکل (۱۴): پارامترهای تخمینی همراه با مقادیر واقعی در حضور نویز رنگی و روش شناسایی RLS.

برای حل این مشکل از روش ELS برای تخمین پارامترهای مدل استفاده می‌کنیم. شکل‌های (۱۵) و (۱۶) بترتیب خروجی سیستم حلقه بسته و تخمین پارامترها را نشان می‌دهد.



شکل (۱۵): پاسخ سیستم حلقه بسته همراه با خروجی مطلوب و ورودی مرجع در حضور نویز رنگی و روش شناسایی ELS.



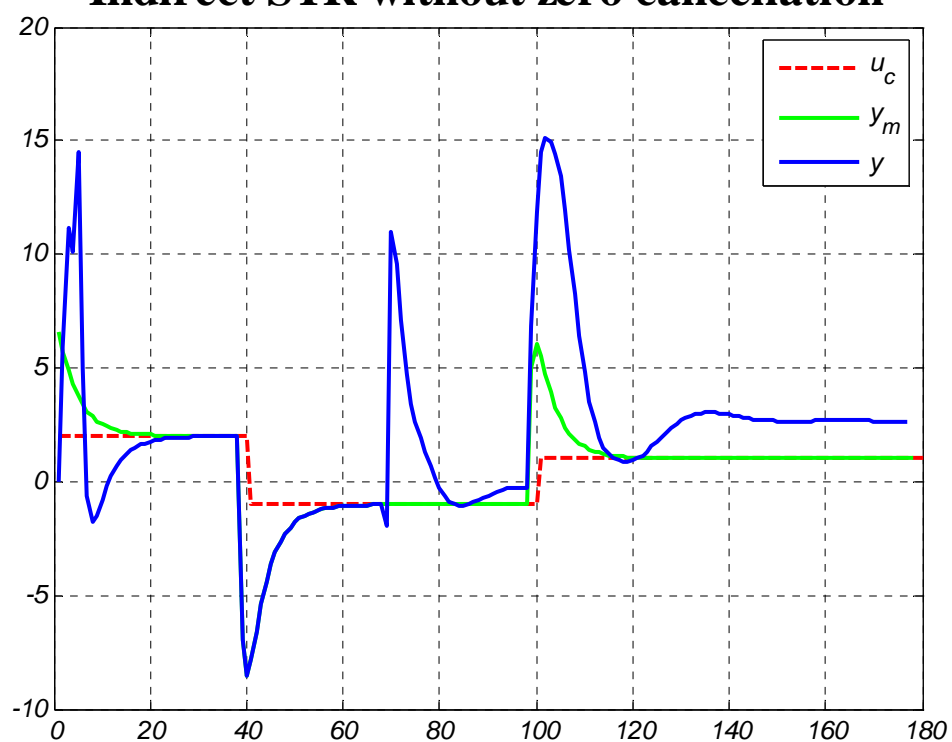
شکل (۱۶): پارامترهای تخمینی همراه با مقادیر واقعی در حضور نویز رنگی و روش شناسایی ELS.

از شکل‌های فوق می‌توان گفت که با استفاده از روش ELS تخمین پارامترها بدرستی انجام می‌گیرد.

۲.۱.۴. اثر اغتشاش

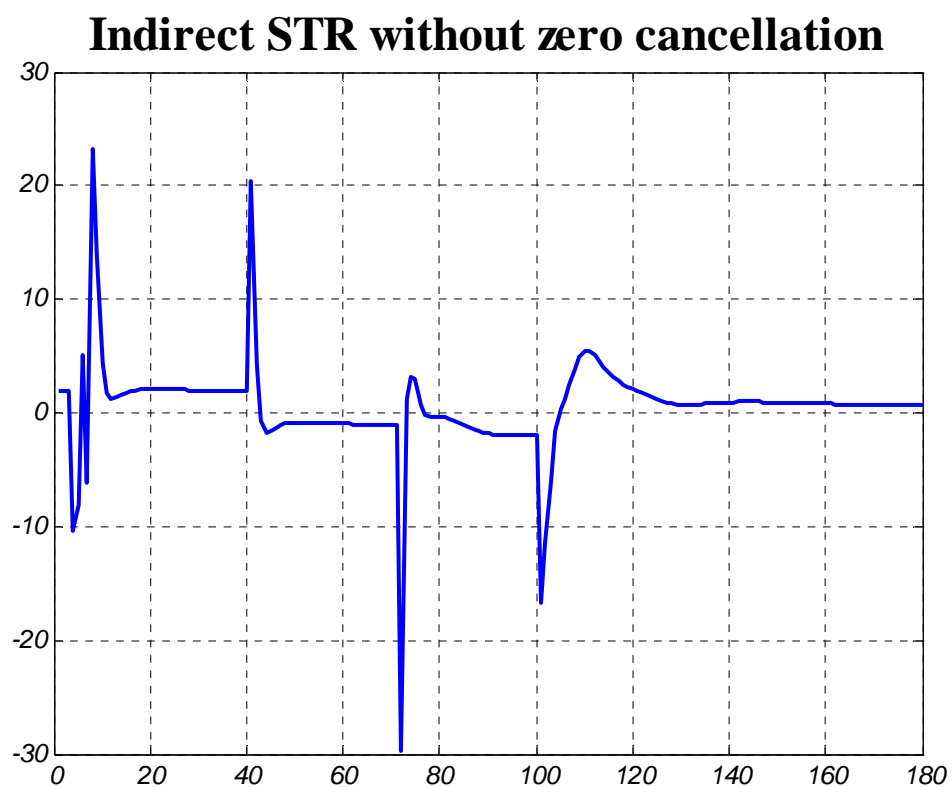
فرض کنیم که اغتشاش ثابت $v = 2$ در لحظه $t = 35$ که معادل نمونه هفتادم می‌باشد به سیستم اعمال شود. در شکل (۱۷) پاسخ سیستم حلقه بسته با کنترلر STR غیرمستقیم بدون حذف صفر و قطب آورده شده است.

Indirect STR without zero cancellation



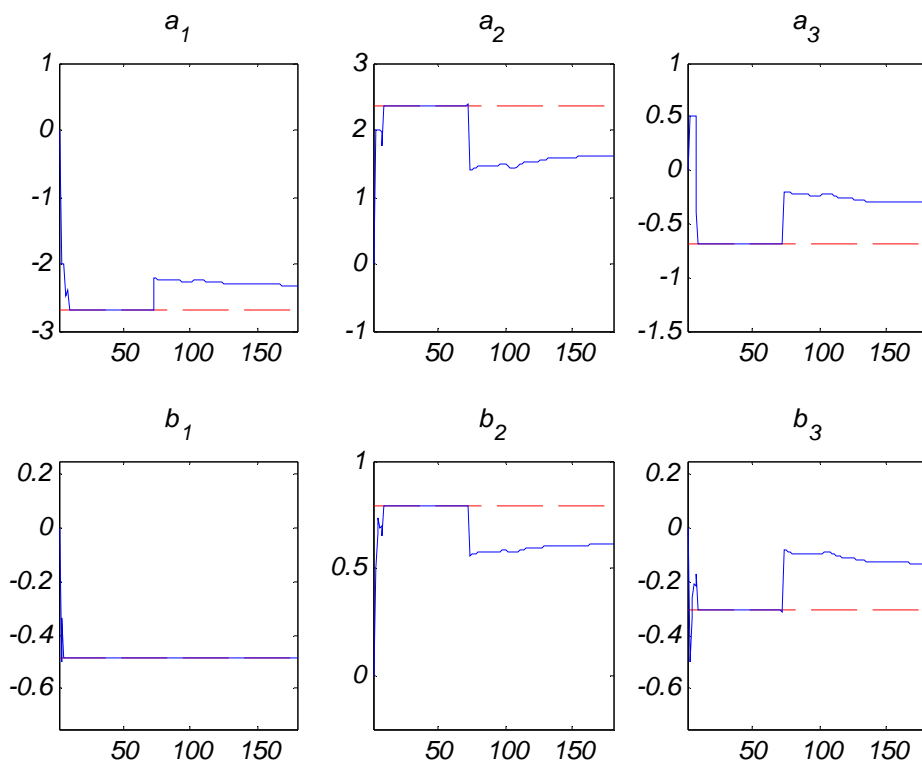
شکل (۱۷): پاسخ سیستم حلقه بسته با کنترلر STR غیرمستقیم بدون حذف صفر و قطب در حضور اغتشاش.

شکل (۱۸) سیگنال کنترل برای این حالت را نشان می‌دهد.



شکل (۱۸): سیگنال کنترل با کنترلر STR غیرمستقیم بدون حذف صفر در حضور اغتشاش.

همان طور که از شکل (۱۷) مشخص است خروجی سیستم حلقه بسته تا قبل از وقوع اغتشاش بخوبی ورودی مرجع را دنبال می‌کند. حال آنکه پس از وقوع اغتشاش، سیستم حلقه بسته توانایی دنبال کردن ورودی را از دست خواهد داد. در شکل (۱۹) نمودار تخمین پارامترهای مدل در این حالت آورده شده است.



شکل (۱۹): تخمین پارامترهای مدل.

همان طور که از این شکل مشخص است، پارامترهای مدل تا قبل از وقوع اغتشاش بخوبی به مقادیر واقعی خود همگرا شده‌اند. با وقوع اغتشاش، شناسایی پارامترها با مشکل مواجه شده و به مقادیر نادرستی همگرا می‌شوند. دلیل این موضوع نیز این است که ورودی فرآیند، مجموع سیگنال کنترلی و اغتشاش می‌باشد. حال آنکه در شناسایی پارامترها تنها از اطلاعات سیگنال کنترل استفاده می‌شود. با پی بردن به این موضوع، دلیل اینکه سیستم حلقه بسته توانایی حذف اغتشاش را نداشت چنین می‌توان توجیه کرد که پارامترهای فرآیند نادرست تخمین زده شده‌اند. هرچند ساختار کنترلر نیز توانایی حذف اغتشاش پله‌ای را دارا نمی‌باشد. حال بدنبال تغییر کنترلر و اصلاح تخمینگر به منظور دفع اثر اغتشاش هستیم. برای این منظور از کنترلر انتگرالی استفاده می‌کنیم. برای از بین بردن اثر اغتشاش ثابت در خروجی سیستم، لازم است که کنترلر جایاب قطب طراحی شده بگونه‌ای باشد که $R(1) = 0$ باشد. زیرا خروجی ناشی از اغتشاش عبارت است از:

$$y(t) = \frac{BR}{AR + BS} v(t)$$

که در آن $R = XR_0 + YB$ است. برای صفر کردن اثر اغتشاش در خروجی، طبق قضیه مقدار نهایی در حالت گسسته در زمان لازم است که شروط زیر برآورده شوند:

• پایداری چند جمله‌ای مخرج $AR + BS = XA_c$ که اگر اغتشاش ثابت باشد، $X = x_0 + q$ در

نظر گرفته می‌شود و با انتخاب A_c پایدار و $|x_0| < 1$ ، این شرط همواره برقرار است.

• $B(1)R(1) = 0$: با توجه به این شرط، می‌توان نتیجه گرفت که برای از بین بردن اثر اغتشاش

ثابت در خروجی سیستم، لازم است که کنترلر جاباب قطب طراحی شده بگونه‌ای باشد که

$R(1) = 0$ باشد. در کنترل انتگرالی، $Y = y_0$ انتخاب شده و با توجه به شرط $R(1) = 0$

رابطه زیر برای آن بدست می‌آید.

$$y_0 = \frac{-(1 + x_0)R_0(1)}{B(1)}$$

با توجه به تاثیرات نامناسب اغتشاش بار بر روی ویژگی‌های فرکانس پایین مدل فرآیند، برای تخمین از

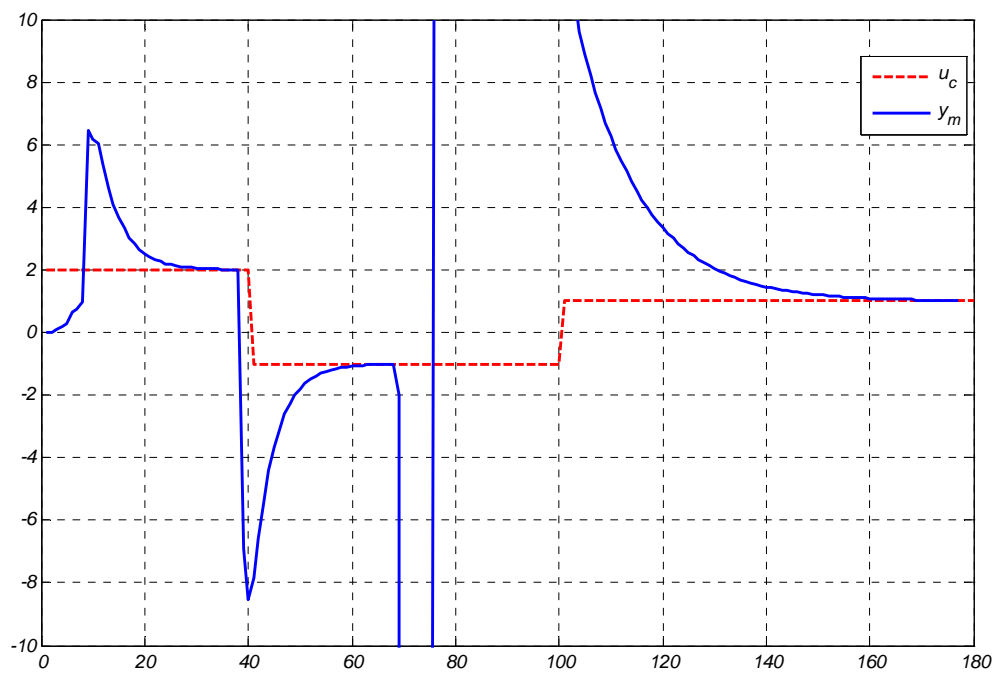
سیگنال‌های فیلتر شده بصورت زیر استفاده می‌کنیم:

$$y_f(t) = A_d y(t), u_f(t) = A_d u(t)$$

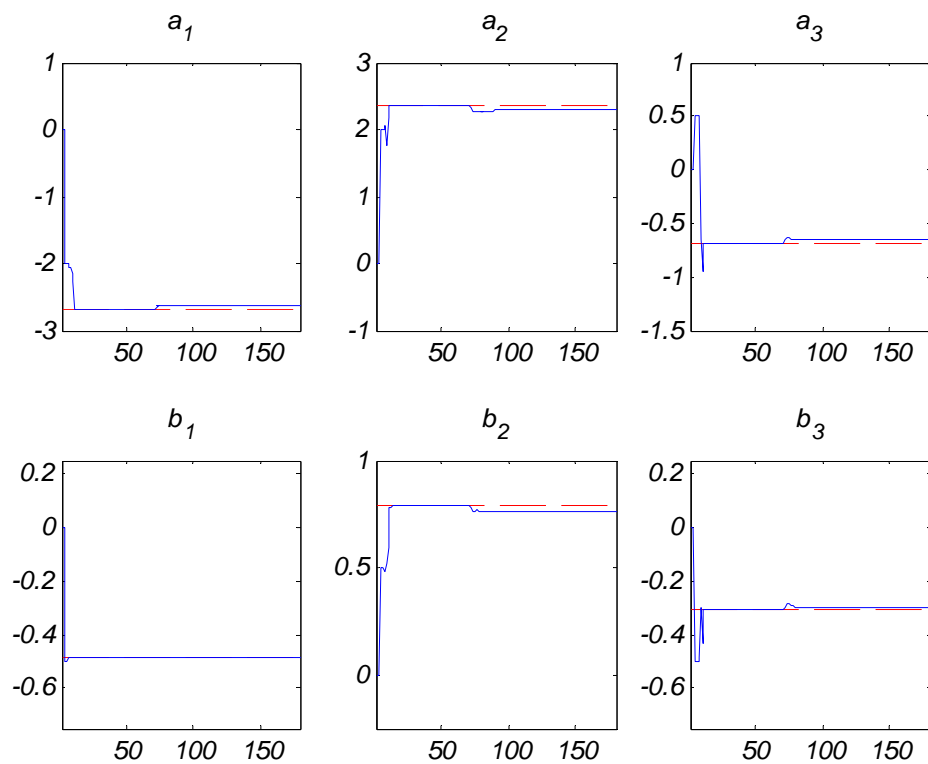
$$A y_f(t) = B u_f(t) + B e(t)$$

در شکل‌های (۲۰) و (۲۱) بترتیب خروجی سیستم حلقه بسته همراه با ورودی و خروجی مطلوب و تخمین

پارامترهای صورت گرفته در این حالت برای ورودی داده شده (پرو فایل ۱) آورده شده‌اند.

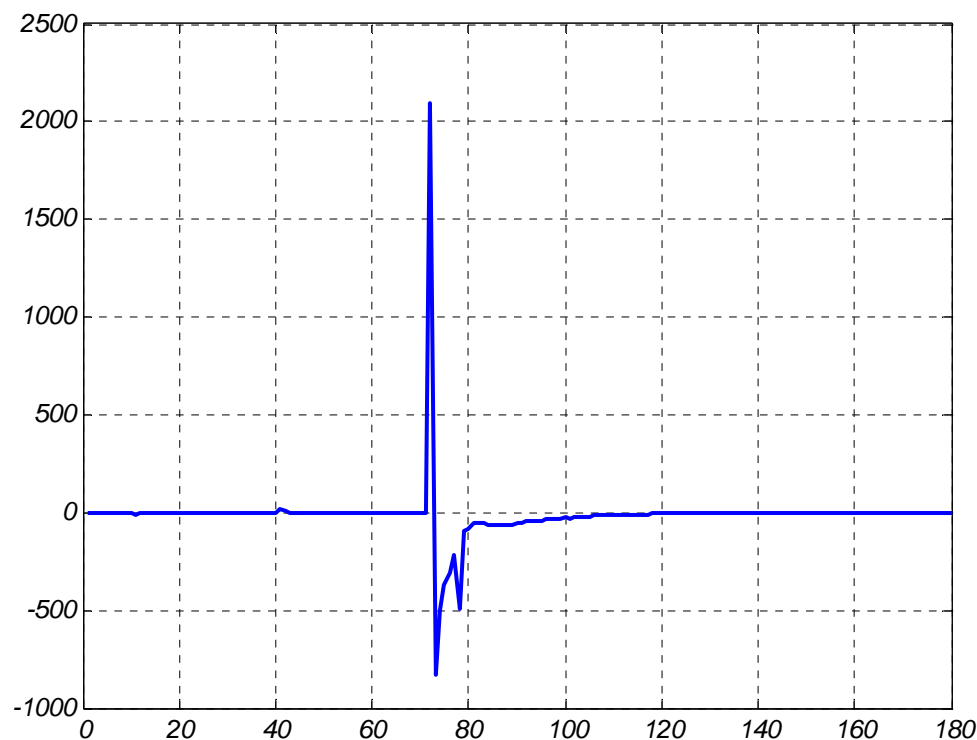


شکل (۲۰): خروجی سیستم با وجود کنترلر تطبیقی انتگرالی با روش STR غیرمستقیم بدون حذف صفر و قطب.



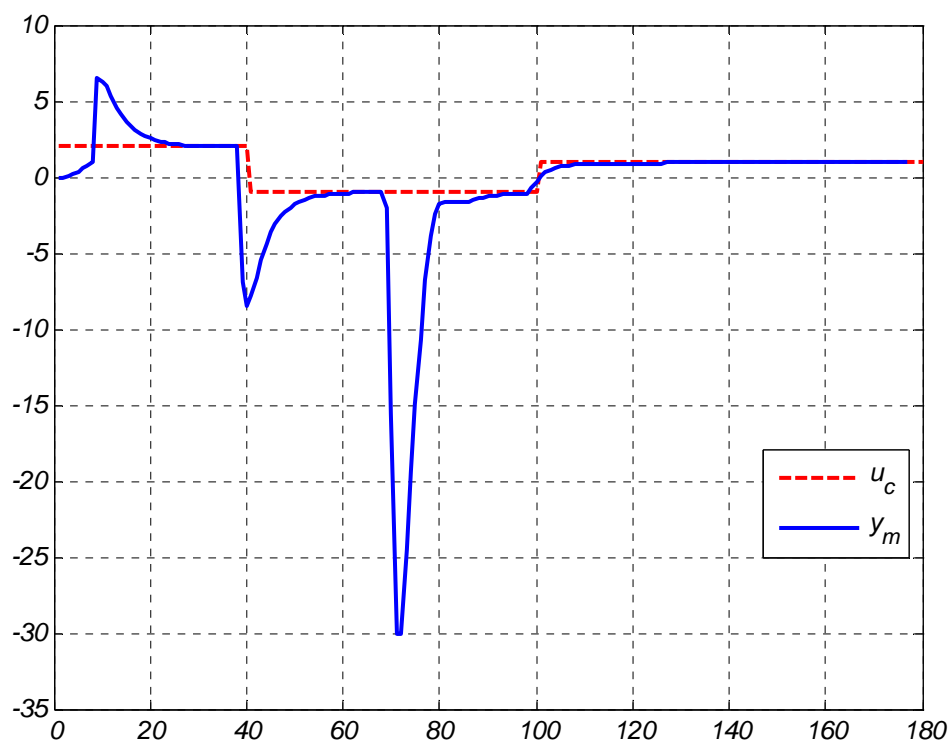
شکل (۲۱): تخمین پارامترهای سیستم.

همان طور که مشاهده می شود خروجی سیستم با وجود اغتشاش ورودی مرجع را دنبال می کند. در شکل (۲۲) سیگنال کنترل حاصل از این شبیه سازی آورده شده است.

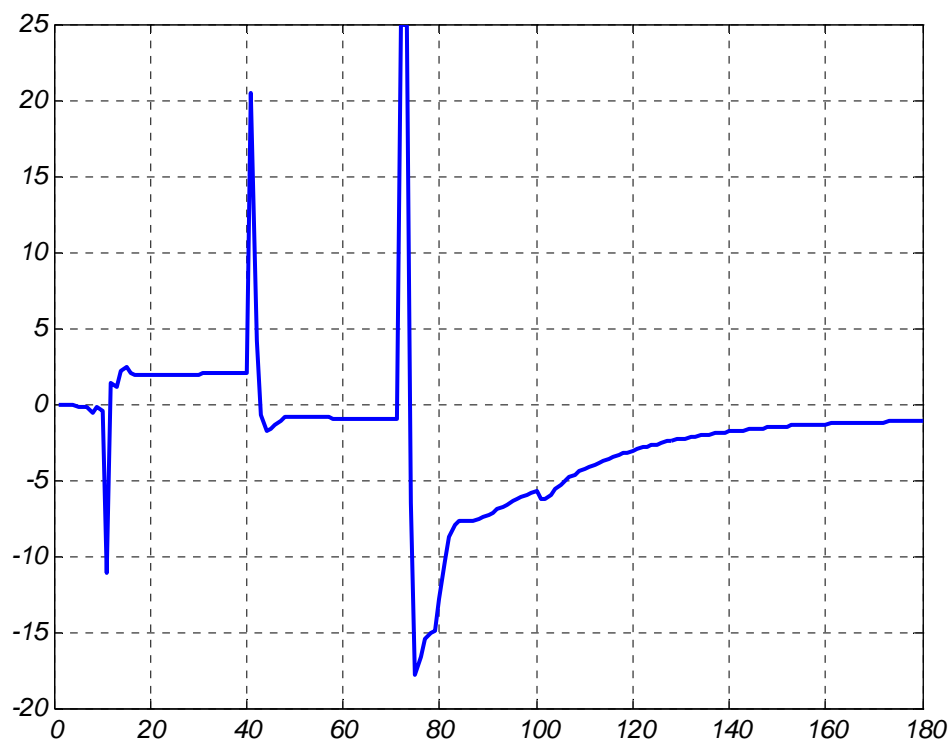


شکل (۲۲): سیگنال کنترل.

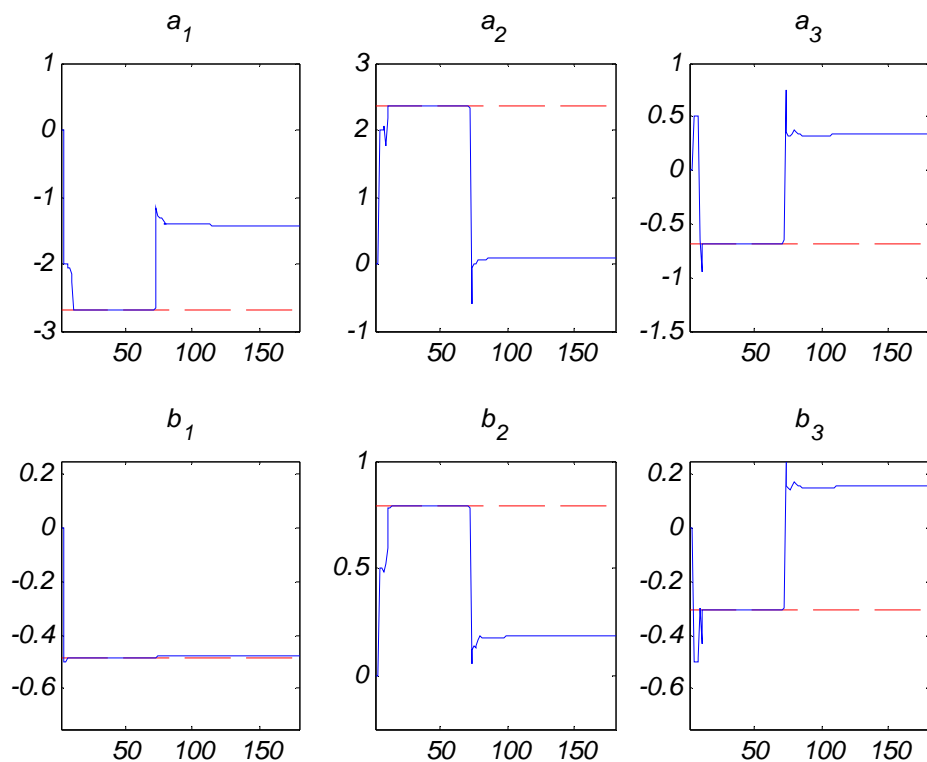
همان طور که مشاهده می شود دامنه این سیگنال با وقوع اغتشاش بسیار زیاد می باشد. بنابراین در واقعیت نمی توان این سیگنال را به سیستم اعمال کرد. زیرا باعث اشباع شدن عملگرهای موجود در سیستم خواهد شد. حال فرض کنیم که اثر اشباع در عملگرهای سیستم را در نظر گرفته باشیم. فرض کنیم که این اشباع در سیگنال کنترل و سطح آستانه ± 25 صورت بگیرد. در شکل های (۲۳)، (۲۴) و (۲۵) بترتیب خروجی سیستم حلقه بسته همراه با ورودی مطلوب، سیگنال کنترلی تولید شده و تخمین پارامترهای صورت گرفته در این حالت برای ورودی داده شده (پرو فایل ۱) آورده شده اند.



شکل (۲۳): خروجی سیستم با وجود کنترلر تطبیقی انتگرالی با روش STR غیرمستقیم بدون حذف صفر و قطب و وجود اثر اشباع.

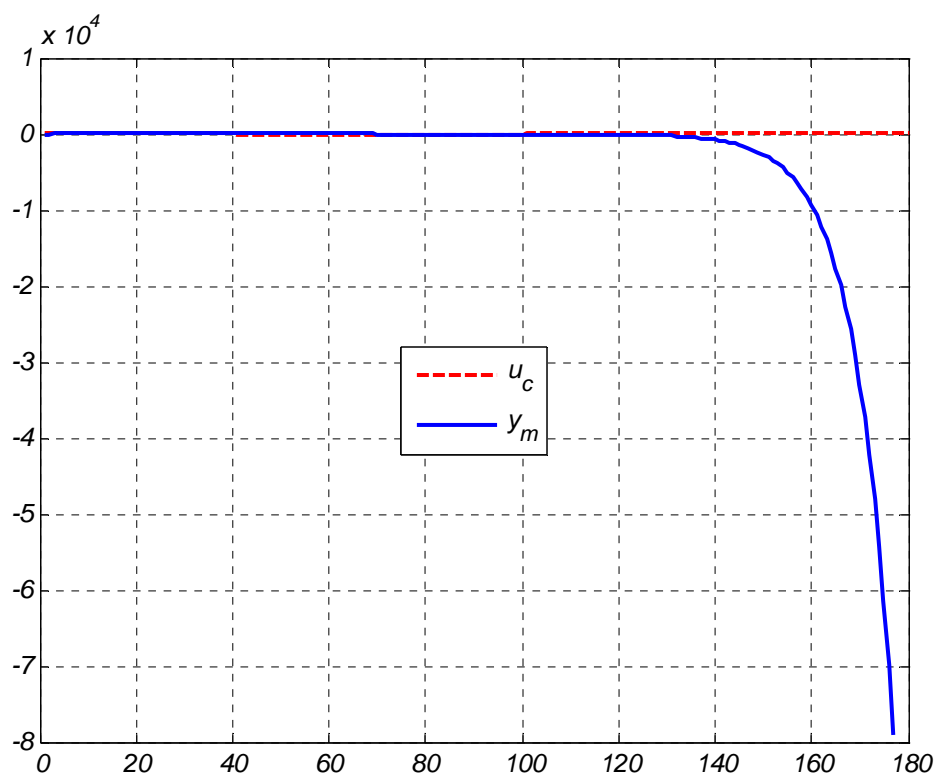


شکل (۲۴): سیگنال کنترل برای ورودی داده شده و کنترلر STR انتگرالی بدون حذف صفر با در نظر گرفتن اثر اشباع.



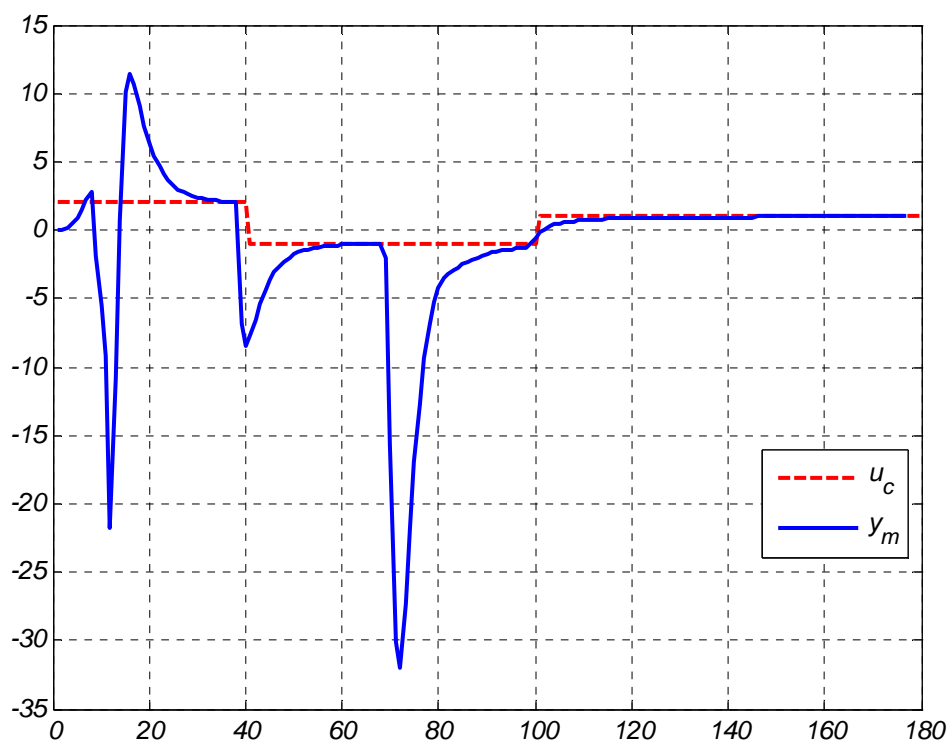
شکل (۲۵): تخمین پارامترهای سیستم.

توجه شود که اگر سطح اشباع عملگرها بسیار پایین باشد، سیستم حلقه بسته ناپایدار خواهد بود. به عنوان مثال برای سطح آستانه اشباع ± 2 ، خروجی سیستم ناپایدار می‌باشد. این موضوع در شکل (۲۶) آورده شده است.



شکل (۲۶): خروجی سیستم با وجود کنترلر تطبیقی انتگرالی با روش STR غیرمستقیم بدون حذف صفر و قطب و وجود اثر اشباع با سطح آستانه دو.

مجدداً فرض کنیم که اشباع در سیگنال کنترل و سطح آستانه ± 25 صورت بگیرد. در شکل (۲۷) خروجی سیستم حلقه بسته برای این حالت و با اصلاح عملکرد انتگرال گیر (Anti wind-up) آورده شده است.



شکل (۲۷): خروجی سیستم با وجود کنترلر تطبیقی انتگرالی با روش STR غیرمستقیم بدون حذف صفر و قطب اصلاح انتگرال گیر.

۲.۱.۵. اثر مرتبه مدل بر رفع اغتشاش

با توجه به معادلات سیستم و کنترلر می‌توان نوشت که (ورودی مرجع را صفر فرض کرده‌ایم و چون حذف صفر نداریم $B^+ = 1$ است):

$$\frac{y(t)}{v(t)} = \frac{\hat{B}\hat{R}}{A_c} = \frac{\hat{B}\hat{R}}{A_0 A_m \hat{B}^+} = \frac{\hat{B}\hat{R}}{A_0 A_m}$$

در این صورت برای اینکه اثر اغتشاش پله‌ای در خروجی از بین رود، لازم است که با توجه به قضیه مقدار نهایی شرایط زیر برقرار باشند:

- $A_0 A_m$ پایدار باشد.
- $\hat{B}(1)\hat{R}(1) = 0$

و چون حذف صفر و قطب نداریم در الگوریتم STR چند جمله‌ای B_m بصورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$B_m = \beta \hat{B}$$

که در آن β به گونه‌ای انتخاب می‌شود که به بهره حالت ماندگار یک در تابع تبدیل خروجی ورودی خواهیم رسید.

$$\beta = \frac{A_m(1)}{\hat{B}(1)}$$

با توجه به این رابطه داریم:

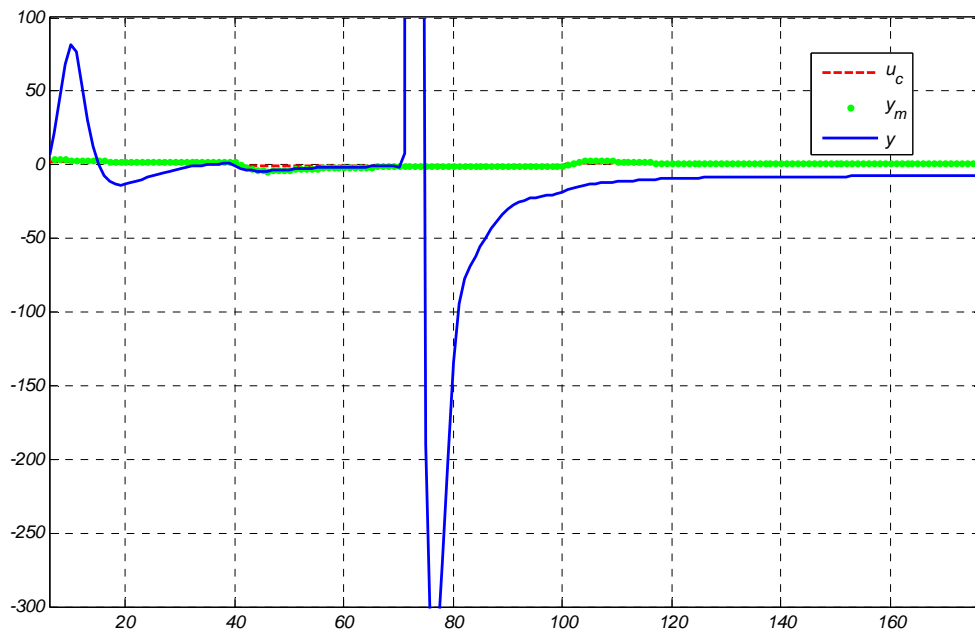
$$\hat{B}(1) = \frac{A_m(1)}{\beta}$$

و لذا شرط دوم صفر شدن اثر اغتشاش بصورت زیر خواهد بود:

$$\frac{A_m(1)}{\beta} \hat{R}(1) = 0$$

که لازم است یا $\hat{R}(1) = 0$ باشد و یا $A_m(1) = 0$. حالت دوم معادل این است که یکی از قطب‌های حلقه بسته مطلوب در $q = 1$ قرار داشته باشد که منجر به عدم رعایت شرط اول (پایداری $A_0 A_m$) می‌شود، و لذا امکان انتخاب این حالت وجود ندارد. پس نتها در حالتی می‌توان گفت که اثر اغتشاش پله در خروجی سیستم از بین می‌رود که شرط $\hat{R}(1) = 0$ در حالت ماندگار برقرار باشد. برقرار شدن این شرط نیز بستگی به فرآیند و ساختار مدل در نظر گرفته برای آن دارد. از مقدار $\hat{R}(1)$ می‌توان به عنوان معیاری از تاثیر اغتشاش در خروجی فرآیند استفاده کرد. هرچه این مقدار به صفر نزدیکتر باشد، تاثیر اغتشاش بر روی خروجی در حالت ماندگار کمتر است و برعکس.

حال برای فرآیند داده شده یک مدل درجه چهار در نظر گرفته و با وجود اغتشاش پله‌ای کنترلر STR غیرمستقیم بدون حذف صفر و قطب طراحی می‌شود. در شکل (۲۸) پاسخ سیستم حلقه بسته بدست آمده آورده شده است.



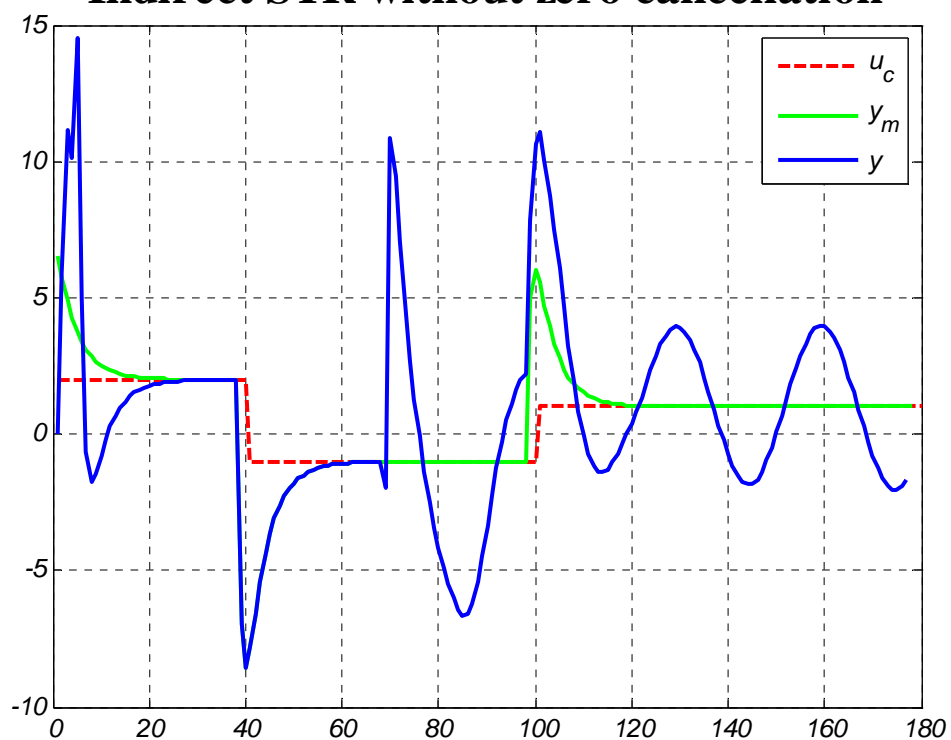
شکل (۲۸): پاسخ سیستم حلقه بسته در حضور اغتشاش پله‌ای و برای مدل مرتبه چهار.

مشاهده می‌شود که سیستم حلقه بسته توانایی حذف اثر اغتشاش را ندارد. مقدار $\hat{R}(1)$ در پایان شبیه‌سازی صورت گرفته برابر 4.55 می‌باشد که بسیار بیشتر از مقدار مطلوب برای حذف اثر اغتشاش پله در حالت ماندگار ($\hat{R}(1) = 0$) است.

نکته‌ای که در اینجا لازم است قید شود این است که در کنترل انتگرالی ارائه شده در بخش قبل (بدون در نظر گرفتن اثر wind-up) مقدار $\hat{R}(1)$ در پایان شبیه‌سازی صورت گرفته برابر -7.105×10^{-15} می‌باشد که بسیار نزدیک به مقدار مطلوب برای حذف اثر اغتشاش پله در حالت ماندگار ($\hat{R}(1) = 0$) است و به همین دلیل مشاهده می‌شود که اغتشاش پله در حالت ماندگار بر روی خروجی سیستم تاثیر گذار نمی‌باشد. در واقع در کنترل انتگرالی طراحی بگونه‌ای صورت می‌گیرد که $\hat{R}(1) = 0$ باشد.

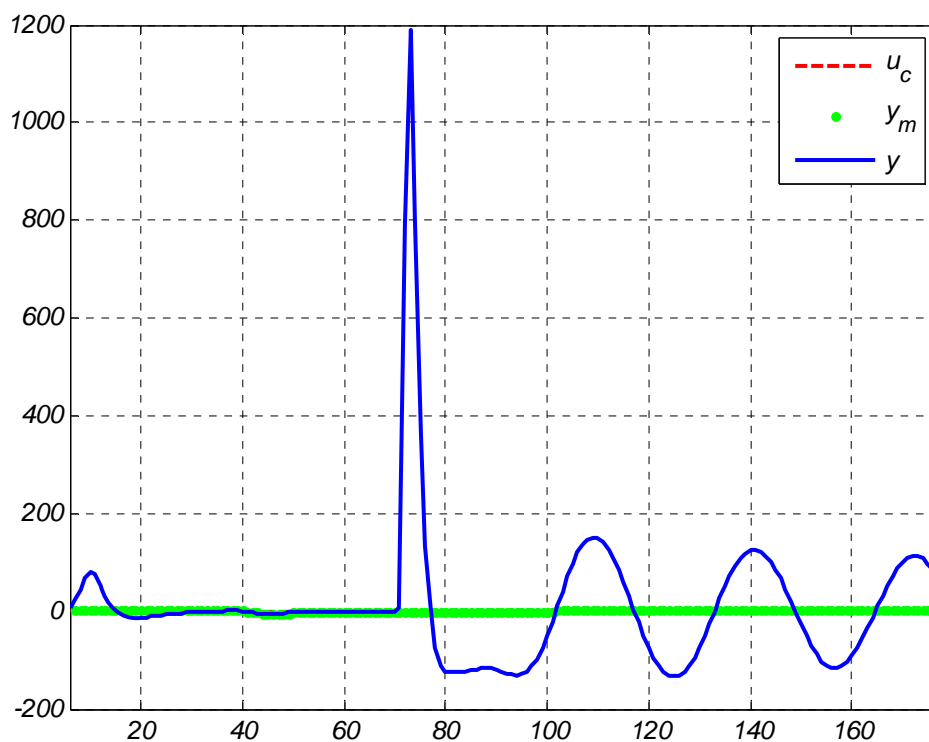
حال برای همین فرآیند، اغتشاش را از نوع سینوسی با دامنه دو و فرکانس زاویه‌ای $0.2 \frac{rad}{s}$ در نظر می‌گیریم. با انتخاب ساختار مدل مرتبه سوم، پاسخ سیستم حلقه بسته بصورت شکل (۲۹) خواهد بود. مقدار $\hat{R}(1)$ در این حالت برابر -2.59 است.

Indirect STR without zero cancellation



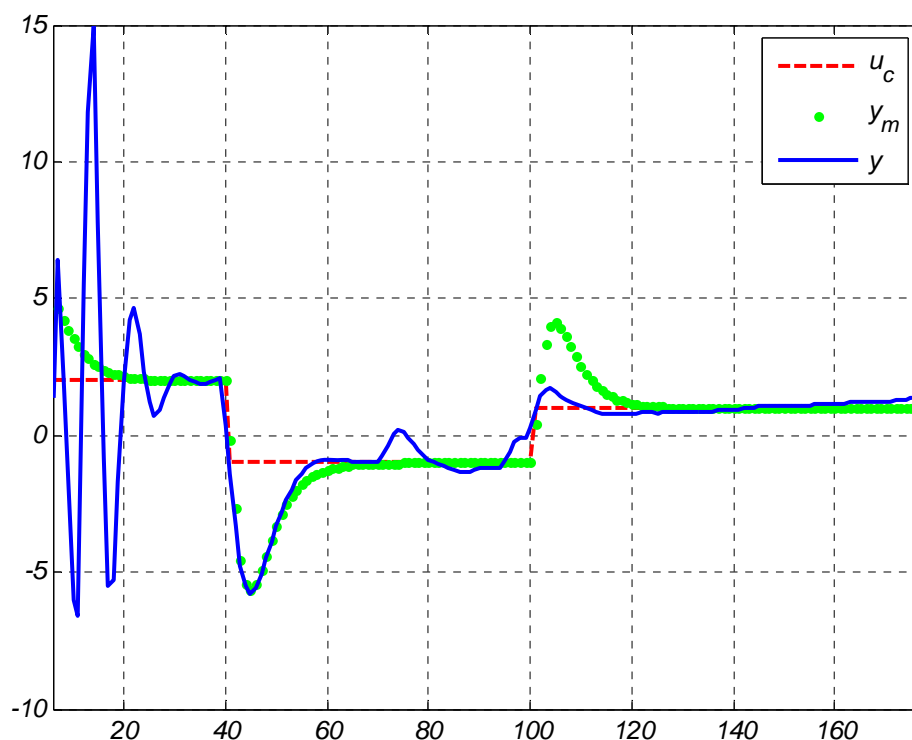
شکل (۳۹): پاسخ سیستم حلقه بسته در حضور اغتشاش سینوسی و برای مدل مرتبه سه.

با انتخاب مدلی مرتبه چهار برای فرآیند، پاسخ سیستم حلقه بسته در حضور اغتشاش سینوسی ذکر شده بصورت شکل (۳۰) خواهد بود. مقدار $\hat{R}(1)$ در این حالت برابر 6.56 است.



شکل (۳۰): پاسخ سیستم حلقه بسته در حضور اغتشاش سینوسی و برای مدل مرتبه چهار.

با انتخاب مدلی مرتبه پنج برای فرآیند، پاسخ سیستم حلقه بسته در حضور اغتشاش سینوسی ذکر شده بصورت شکل (۳۱) خواهد بود. مقدار $\hat{R}(1)$ در این حالت برابر 0.43 است.



شکل (۳۱): پاسخ سیستم حلقه بسته در حضور اغتشاش سینوسی و برای مدل مرتبه پنج.

مشاهده می‌شود که در این حالت پاسخ سیستم حلقه بسته تقریباً مناسب است. به مقدار $\hat{R}(1)$ نیز توجه شود که نسبت به دو حالت قبل بسیار مناسب‌تر (کمتر) است.

۲.۱.۶. اثر صفر غیر مینیمم فاز

در این قسمت الگوریتم STR غیر مستقیم بدون حذف صفر و قطب را برای یک سیستم غیر مینیمم فاز اجرا می‌کنیم. با توجه به اینکه صفرهای سیستم حلقه باز را حذف نخواهیم کرد، پایداری سیستم حلقه بسته با همان روش طراحی بخش ۱-۱-۲ تضمین خواهد شد. ضمناً دنبال کردن ورودی توسط خروجی سیستم حلقه بسته نیز تامین خواهد شد. اما اگر بدون توجه به غیر مینیمم فاز بودن سیستم، اقدام به حذف صفرهای ناپایدار آن توسط قطب‌های کنترلر کرد (مثلاً با استفاده از STR با حذف تمام صفرها)، سیستم حلقه بسته ناپایدار خواهد شد. بنابراین در این قسمت انتظار داریم که سیستم حلقه بسته پایدار بوده و

ورودی داده شده را نیز دنبال کند (زیرا ورودی اعمال شده در واقع دنباله‌ای از پله‌هاست و طراحی برای دنبال کردن پله صورت گرفته است). تابع تبدیل سیستم غیر مینیمم فاز در نظر گرفته بصورت زیر است.

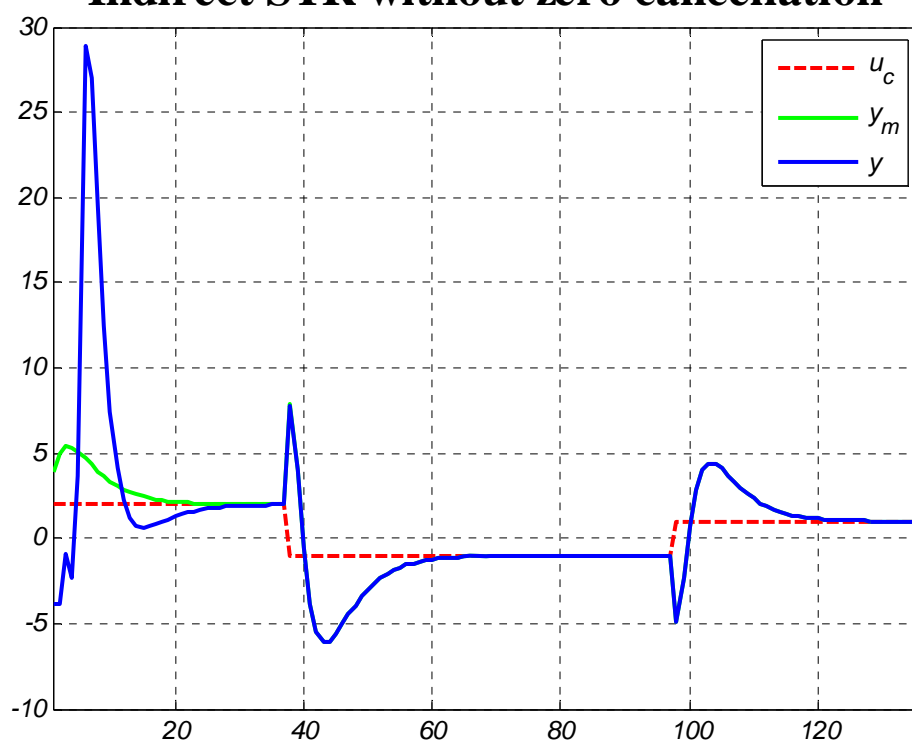
$$H(s) = \frac{-0.9375(s + 0.1)(s - 0.8)}{(s - 0.25)(s^2 + s + 0.3)}$$

با انتخاب زمان نمونه‌برداری $T_s = 0.5$ و استفاده از دستور c2d، سیستم زمان گسسته زیر حاصل خواهد شد:

$$H(z) = \frac{-0.3162z^2 + 0.7768z - 0.4528}{z^3 - 2.681z^2 + 2.361z - 0.6873}$$

صفرهای تابع تبدیل گسسته در زمان در 0.9511 و 1.5056 قرار داشته و قطب‌های آن نیز در 1.1331 و $0.7739 \pm j0.0869$ قرار دارند که منجر به یک سیستم زمان گسسته ناپایدار و غیر مینیمم فاز می‌شوند. قطب‌های مطلوب حلقه بسته را در 0.8، 0.4 و 0.6 جایابی می‌کنیم. قطب‌های رویتگر در نقاط $0.3/j0$ و $-0.3/j0$ قرار داده خواهند شد. در شکل‌های (۳۲)، (۳۳) و (۳۴) بترتیب خروجی سیستم حلقه بسته همراه با ورودی و خروجی مطلوب، سیگنال کنترلی تولید شده و تخمین پارامترهای صورت گرفته در این حالت برای ورودی داده شده (پرو فایل ۱) آورده شده‌اند.

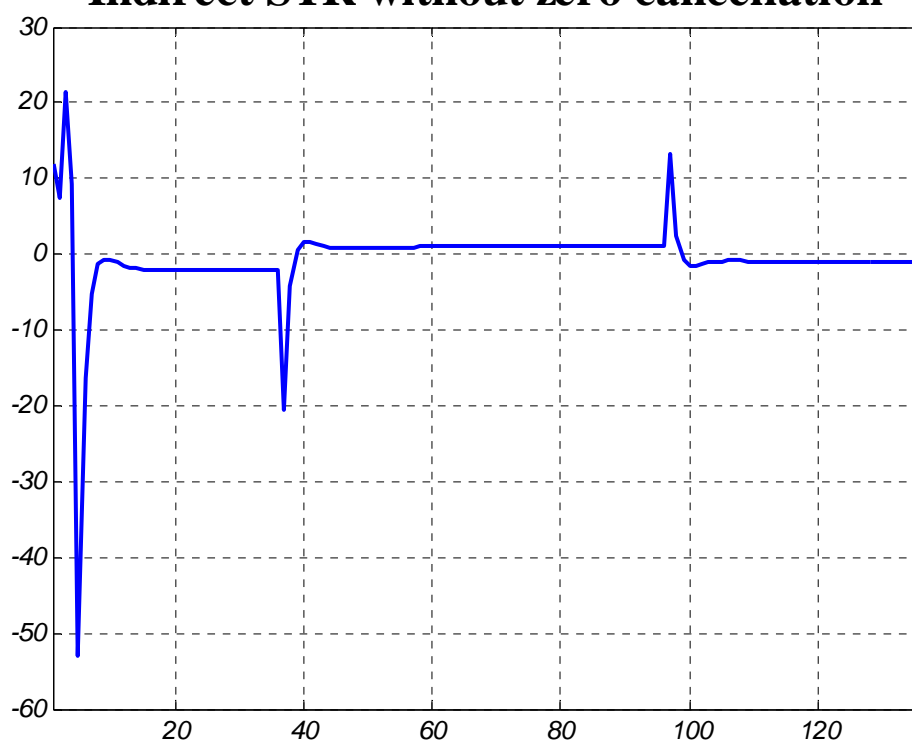
Indirect STR without zero cancellation



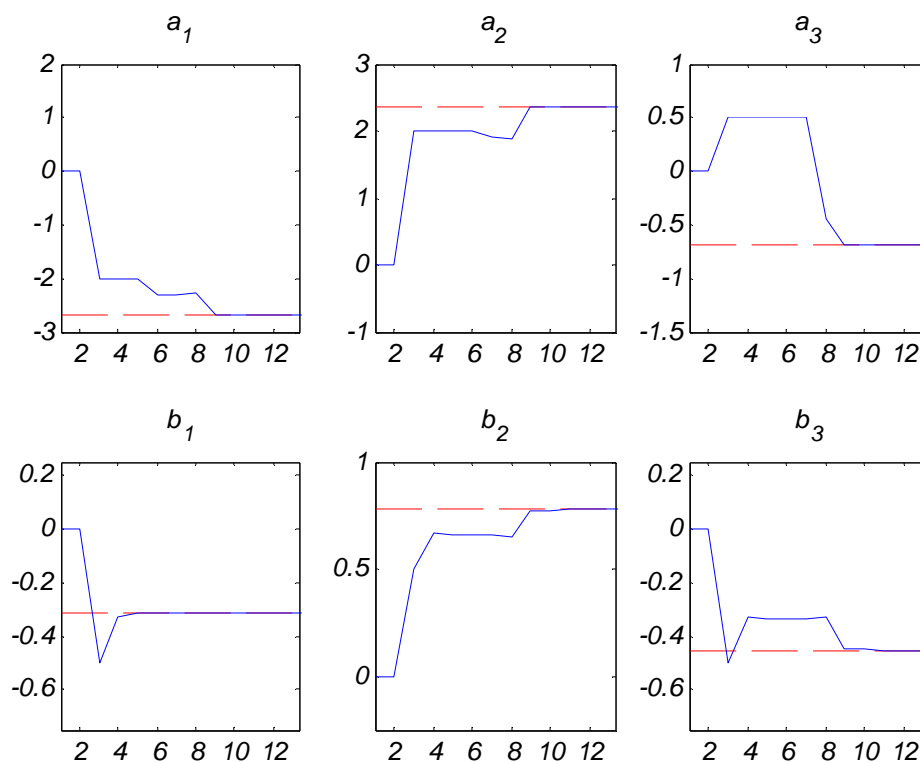
شکل (۳۲): خروجی سیستم غیر مینیمم فاز با وجود کنترلر تطبیقی با روش STR غیرمستقیم بدون حذف صفر و قطب.

مشاهده می‌شود که در لحظات نخست که هنوز پارامترهای سیستم به خوبی تخمین زده نشده‌اند، سیستم رفتار مناسبی نداشته اما با گذشت زمان که پارامترها به مقادیر واقعی همگرا می‌شوند، کنترل‌کننده به خوبی سیستم را کنترل کرده و سیستم حلقه بسته ورودی مرجع را دنبال می‌کند. اما به دلیل حضور صفرهای نامناسب حلقه باز، پاسخ سیستم حلقه بسته چندان مناسب نمی‌باشد. ضمناً رفتار غیر مینیمم فاز فرآیند نیز خود را در پاسخ سیستم بخوبی نشان داده است. (مخالفت اولیه با تغییر ورودی)

Indirect STR without zero cancellation



شکل (۳۳): سیگنال کنترل برای ورودی داده شده و کنترلر STR بدون حذف صفر برای سیستم غیر مینیمم فاز.



شکل (۳۴): تخمین پارامترهای سیستم.

از شکل (۳۴) مشاهده می‌شود که نه مرحله طول می‌کشد تا پارامترهای فرآیند بدرستی تخمین زده شوند که دقیقاً برابر $n + m + 1 + \max(n, m + d_0) = 9$ می‌باشد و نشان می‌دهد که سیگنال کنترل برای این سیستم، از پایایی مناسبی برخوردار می‌باشد.

۳-۲ STR مستقیم بدون حذف صفر و قطب

با توجه به اینکه برای اجرای این الگوریتم لازم است که ابتدا \mathcal{R} و \mathcal{S} را تخمین زده و سپس عوامل مشترک آنها (B^-) را حذف کرد، و چون در تخمین پارامترها خطا (هر چقدر کوچک) وجود دارد، عوامل مشترک تبدیل به عواملی نزدیک به هم می‌شوند و امکان حذف آنها وجود ندارد. مگر اینکه بگونه‌ای نزدیکی عوامل را تعریف کرد!!!

۳-۳ STR غیرمستقیم با حذف صفر و قطب

در قسمت ۲.۱ الگوریتم STR غیرمستقیم بدون حذف صفرهای سیستم حلقه باز اجرا گردید. در این قسمت این الگوریتم را با حذف صفرهای سیستم اجرا خواهیم کرد. الگوریتم STR غیرمستقیم بدون حذف صفر به دلیل عدم حذف صفرهای سیستم حلقه باز، ممکن است پاسخ سیستم حلقه بسته مناسب نباشد. اما در الگوریتم STR غیرمستقیم با حذف صفرهای سیستم انتظار پاسخ مناسبتری از سیستم حلقه بسته را داریم. همان طور که می‌دانیم در این روش تطبیقی، داده‌های معلوم مسئله چند جمله‌ای‌های A_m ، B_m و A_0 هستند. در هر مرحله (هر زمان نمونه برداری) پارامترهای فرآیند (ضرایب چند جمله‌ای‌های A و B) با استفاده از روش‌های شناسایی سیستم (در اینجا RLS) تخمین زده می‌شوند و سپس با استفاده از این پارامترها، یک کنترلر تطبیقی با استفاده از روش جایابی قطب با حذف صفرهای سیستم طراحی خواهد شد. مجدداً قطب‌های مطلوب حلقه بسته را در 0.8، 0.4 و 0.6 جایابی می‌کنیم. برای شرایط اولیه زیر خروجی سیستم حلقه بسته همراه با خروجی مطلوب و ورودی مرجع در شکل (۶) آورده شده است.

$$\hat{\theta}_0 = [-2 \ 2 \ 0.5 \ -0.5 \ 0.5 \ -0.5]^T; P_0 = \text{diag}(10^5, 10^5, 10^5, 10^3, 10^3, 10^3),$$

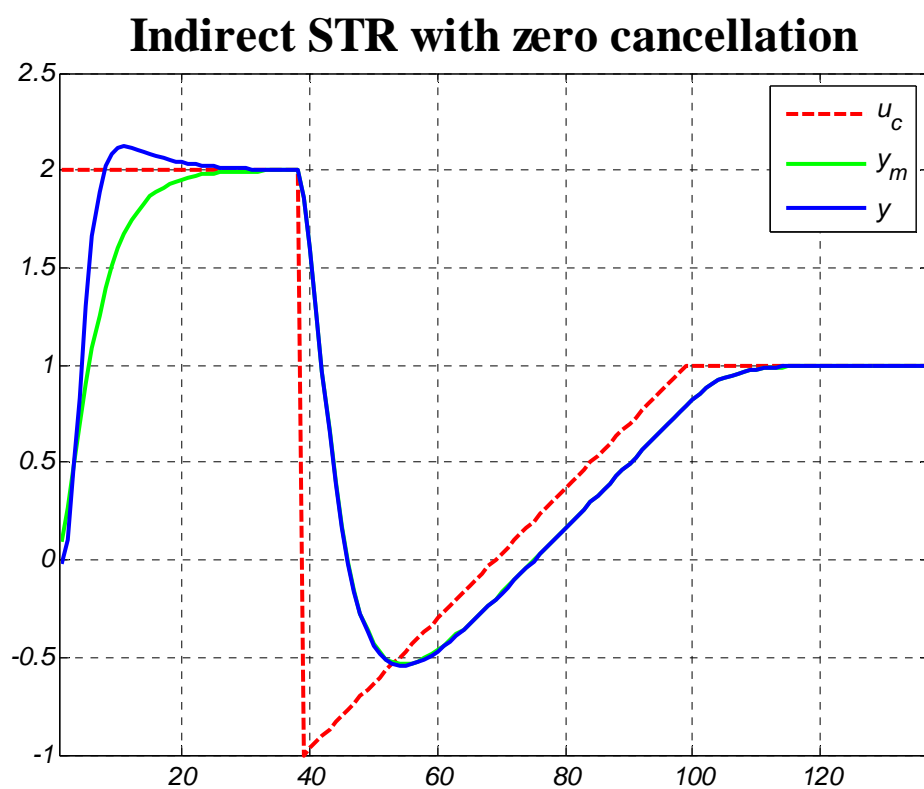
چند جمله‌ای‌های محاسبه شده برای R ، S و T عبارتند از:

$$R(q) = q^2 - 1.60q - 0.619$$

$$S(q) = -1.781q^2 + 2.652q - 0.987$$

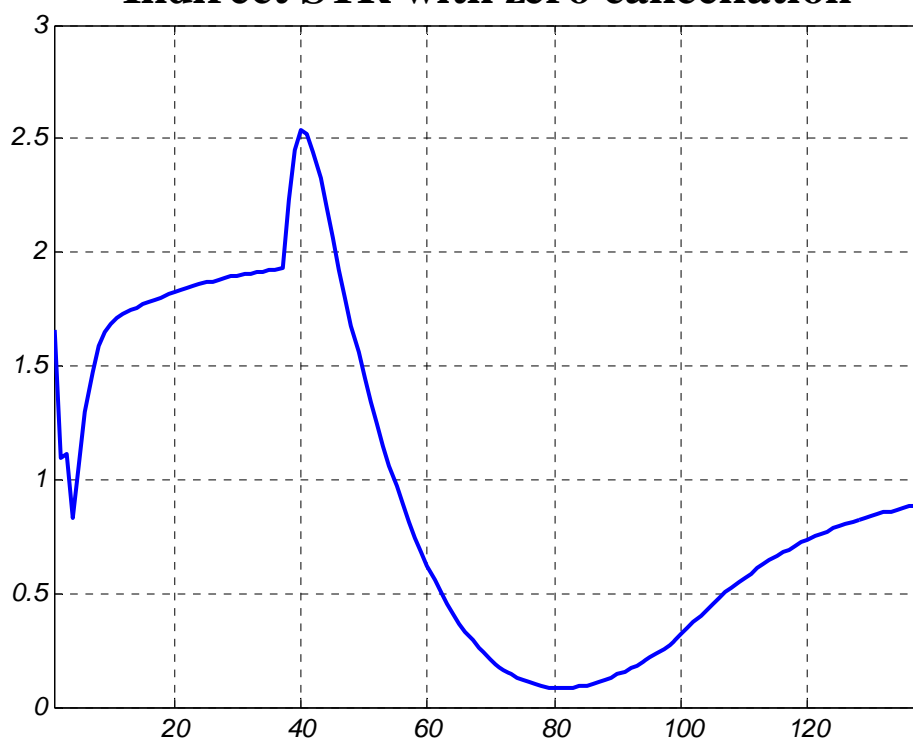
$$T(q) = -0.099q$$

که بسیار نزدیک به چند جمله‌ای‌های بدست آمده در بخش ۱.۲ می‌باشند. در شکل‌های (۳۵) و (۳۶) بترتیب خروجی سیستم حلقه بسته و سیگنال کنترلی تولید شده در این حالت برای ورودی داده شده (پرو فایل ۲) آورده شده‌اند.



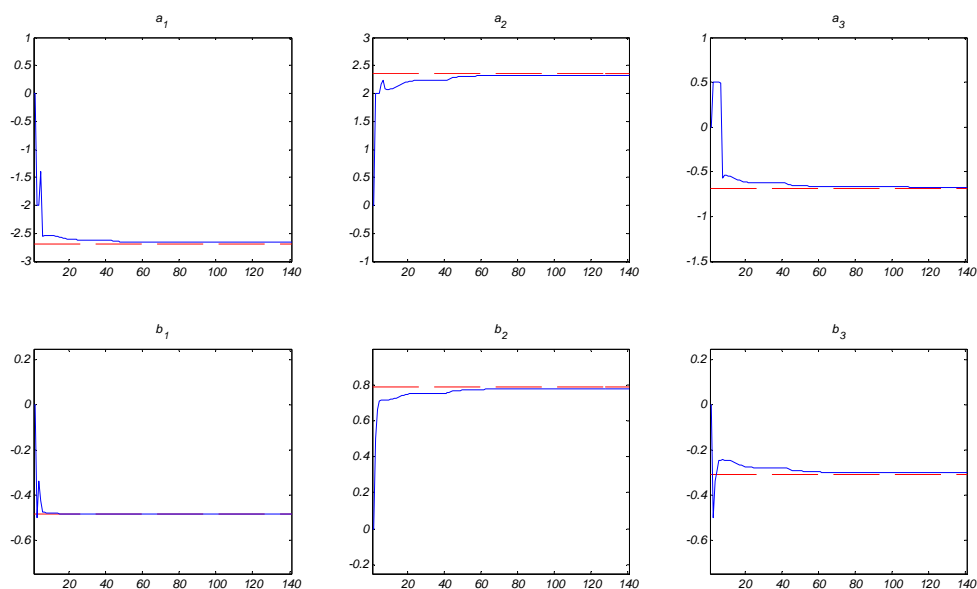
شکل (۳۵): خروجی سیستم با وجود کنترلر تطبیقی با روش STR غیرمستقیم با حذف صفر و قطب.

Indirect STR with zero cancellation



شکل (۳۶): سیگنال کنترل با وجود کنترلر تطبیقی با روش STR غیرمستقیم با حذف صفر و قطب.

در شکل (۳۷) پارامترهای تخمین زده شده آورده شده‌اند.



شکل (۳۷): تخمین پارامترهای سیستم.

مشاهده می‌شود که به دلیل حذف صفرهای بدرفتار، پاسخ سیستم حلقه بسته در مقایسه با حالت STR بدون حذف صفر بسیار بهتر شده است. با توجه به رفتار مطلوب حلقه بسته مورد نظر، سیستم حلقه بسته توانایی دنبال کردن ورودی پله را بدون خطای ماندگار خواهد داشت. اما این سیستم توانایی دنبال کردن ورودی شیب را ندارد. در واقع نوع سیستم که با توجه به تعداد قطب‌های حلقه باز واقع در $z=1$ تعیین می‌شود، برای این طراحی برابر یک بوده و لذا سیستم حلقه بسته تنها توانایی دنبال کردن بدون خطای ورودی پله را دارا می‌باشد و ورودی شیب را با خطای حالت ماندگار غیر صفر دنبال خواهد کرد. برای اینکه سیستم حلقه بسته توانایی دنبال کردن ورودی شیب را هم داشته باشد، می‌توان ساختار کنترلر STR غیر مستقیم با حذف صفر و قطب را بگونه‌ای تغییر داد که type سیستم برابر دو شود.

$$\frac{G}{G+1} = \frac{B_m}{A_m} \rightarrow G = \frac{B_m}{A_m - B_m}$$

که در آن G تابع تبدیل حلقه باز معادل سیستم است. برای سیستم داده شده شرایط زیر لازم است برقرار باشد (برای علی بودن):

$$\deg A_m = \deg A = 3$$

$$\deg B_m = \deg B = 2$$

$$B^- = b_0$$

$$B^+ = \frac{B}{b_0}$$

$$\deg A_0 = \deg A - \deg B^+ - 1 = 3 - 2 - 1 = 0 \rightarrow A_0 = 1$$

برای همان محل مطلوب قطب‌های حلقه بسته (0.8، 0.4 و 0.6)، برای اینکه type سیستم برابر دو باشد، لازم است که چند جمله‌ای B_m در شرایط زیر صدق کند:

$$A_m(1) - B_m(1) = 0$$

$$A_m'(1) - B_m'(1) = 0$$

و از این دو شرط خواهیم داشت که: $(B_m(q) = b_0 q^2 + b_1 q + b_2)$

$$B_m(1) = b_0 + b_1 + b_2 = 0.048$$

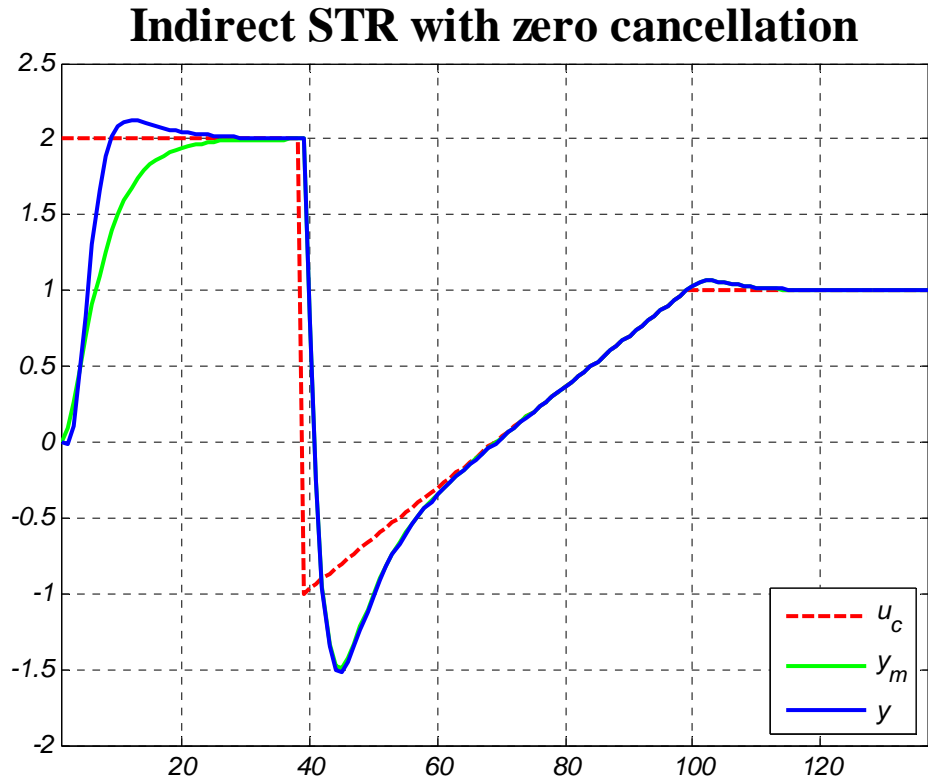
$$B_m'(1) = 2b_0 + b_1 = 0.44$$

و با انتخاب $b_2 = 0$ خواهیم داشت:

$$B_m(q) = 0.392q^2 - 0.344q$$

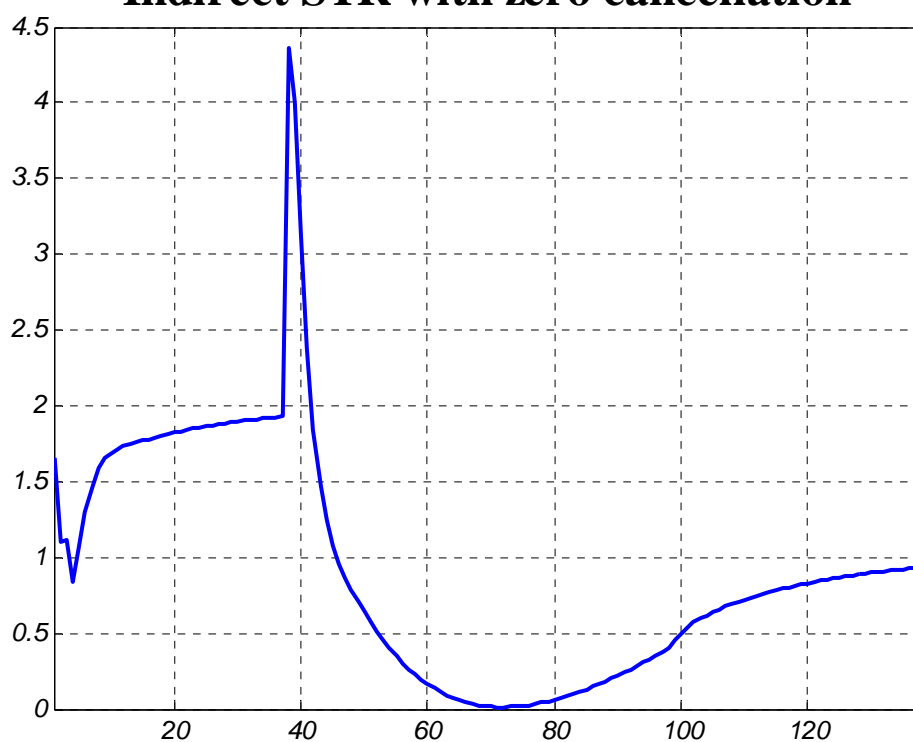
در شکل‌های (۳۸)، (۳۹) و (۴۰) بترتیب خروجی سیستم حلقه بسته، سیگنال کنترلی تولید شده و تخمین-

های بدست آمده برای پارامترهای مدل برای ورودی داده شده (پرو فایل ۲) آورده شده‌اند.

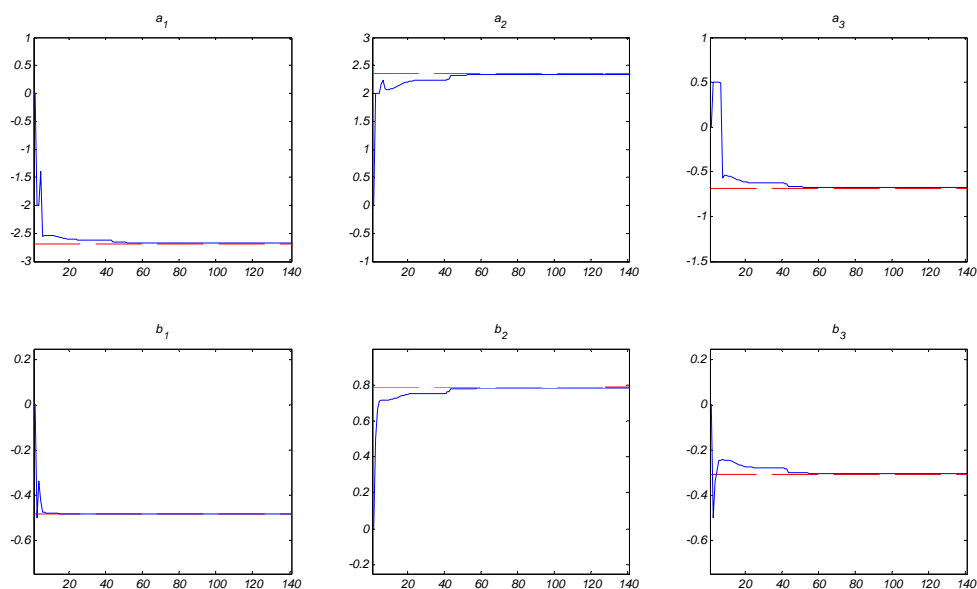


شکل (۳۸): خروجی سیستم با وجود کنترلر تطبیقی با روش STR غیرمستقیم با حذف صفر و قطب و طراحی برای دنبال کردن ورودی شیب.

Indirect STR with zero cancellation



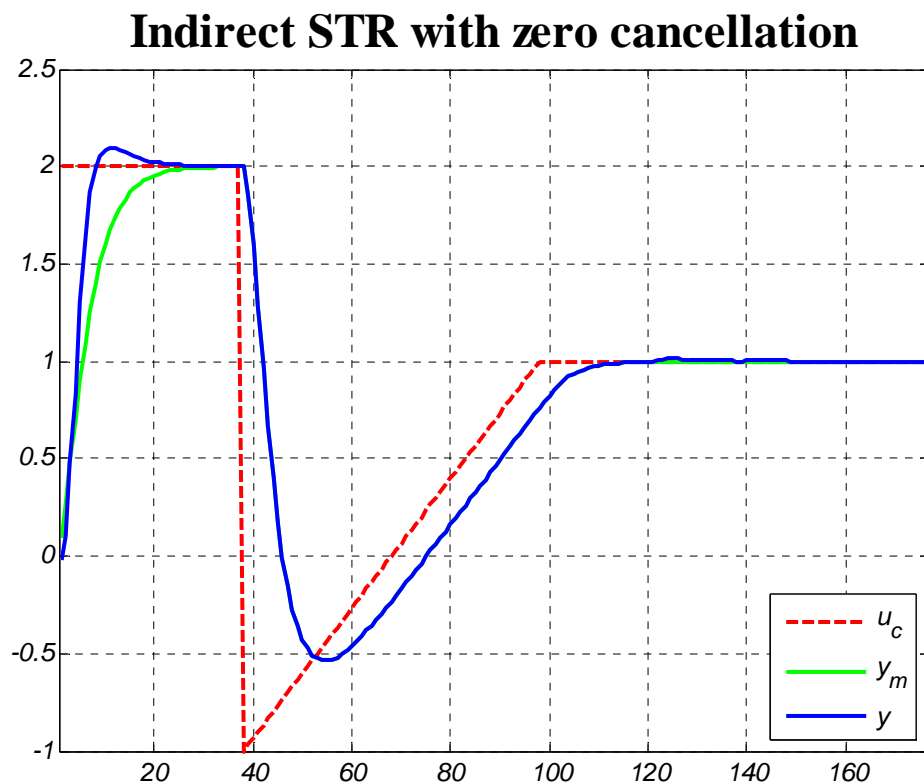
شکل (۳۹): سیگنال کنترل برای ورودی داده شده و کنترلر STR غیرمستقیم با حذف صفر و طراحی برای دنبال کردن ورودی شیب.



شکل (۴۰): تخمین پارامترهای سیستم.

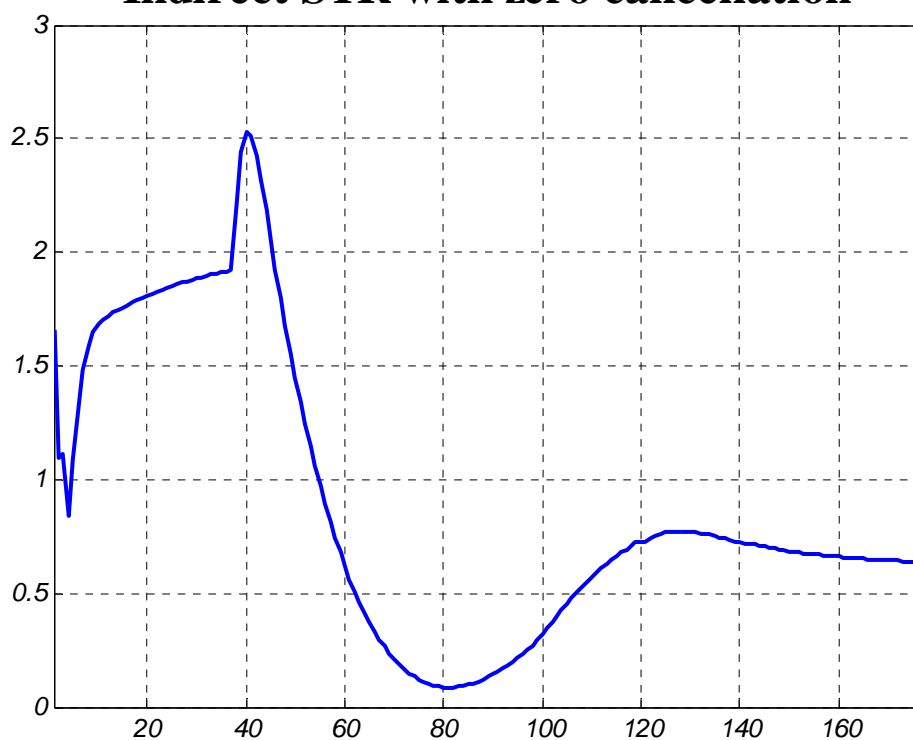
همان طور که مشاهده می شود سیستم حلقه بسته بخوبی توانایی دنبال کردن ورودی داده شده را دارد.

۲-۳-۲- با توجه به محل صفرهای سیستم حلقه باز، پارامترهای b_2 و b_3 را طبق صورت مسئله بگونه‌ای تغییر می‌دهیم که صفر واقع در 0.9513 ثابت باقی مانده و صفر واقع در 0.6691 به میزان 30% درصد به مبدا نزدیکتر شود. در شکل‌های (۴۱)، (۴۲) و (۴۳) بترتیب خروجی سیستم حلقه بسته، سیگنال کنترلی تولید شده و تخمین‌های بدست آمده برای پارامترهای مدل با فاکتور فراموشی 0.5 برای ورودی داده شده (پرو فایل ۲) آورده شده‌اند.

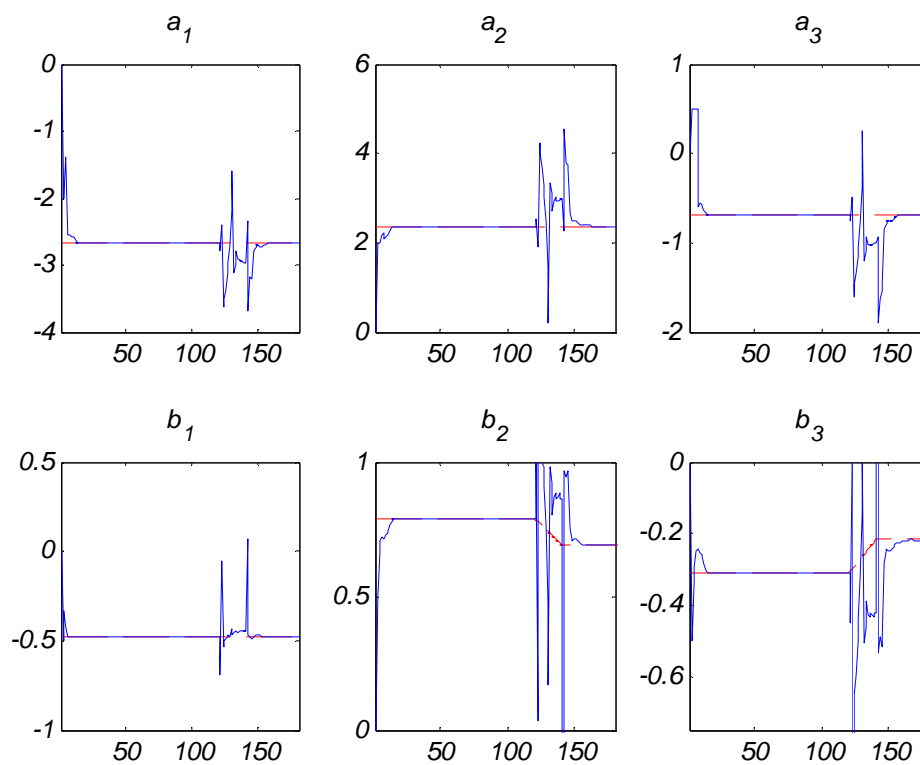


شکل (۴۱): خروجی سیستم با وجود کنترلر تطبیقی با روش STR غیرمستقیم با حذف صفر و قطب و تغییر در پارامترهای سیستم.

Indirect STR with zero cancellation

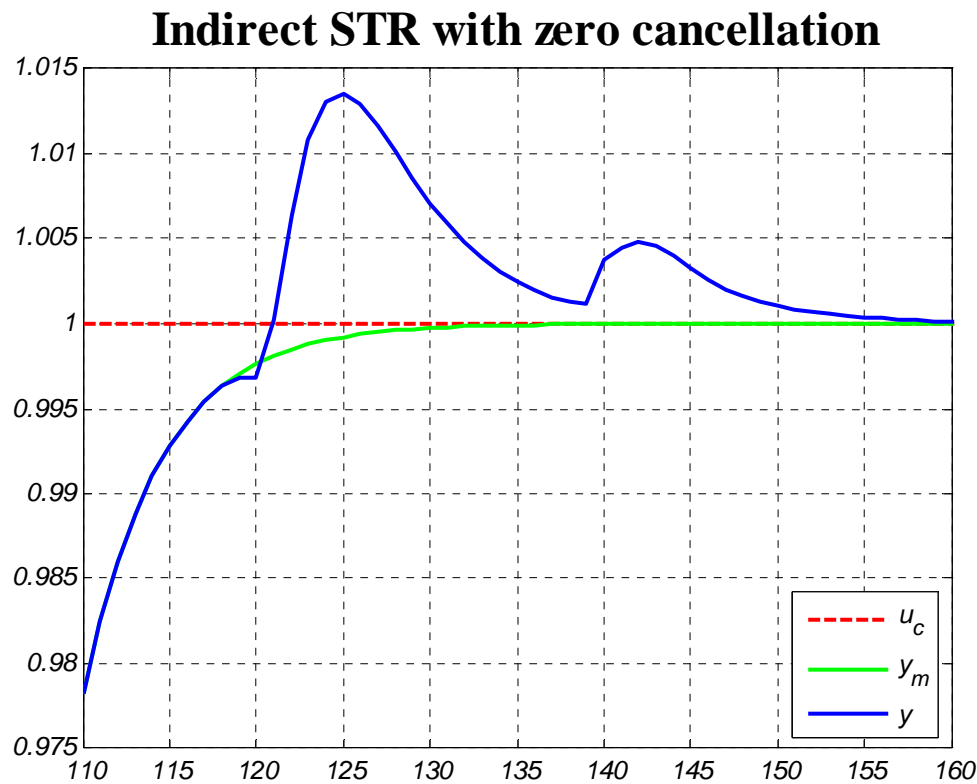


شکل (۴۲): سیگنال کنترل برای ورودی داده شده و کنترلر STR غیرمستقیم با حذف صفر.



شکل (۴۳): تخمین پارامترهای سیستم.

به منظور نمایش بهتر، پاسخ سیستم حلقه بسته از لحظه اعمال تغییرات در شکل (۴۴) آورده شده است.



شکل (۴۴): خروجی سیستم با وجود کنترلر تطبیقی با روش STR غیرمستقیم با حذف صفر و قطب و تغییر در پارامترهای سیستم.

مشاهده می‌شود که ابتدا و با آغاز تغییرات، پاسخ سیستم اندکی از پاسخ مطلوب دور می‌شود. اما با گذشت حدود ۳۰ نمونه، مجدداً با تخمین‌های صورت گرفته، کنترلر توانایی دنبال کردن مجدد ورودی را کسب نموده است.

۴-۲ STR مستقیم با حذف صفر و قطب

همان طور که می‌دانیم در این روش نیازی به تخمین پارامترهای سیستم نبوده و پارامترهای کنترلر بطور مستقیم تولید خواهند شد. داده‌های معلوم مسئله چند جمله‌ای‌های A_m ، B_m ، A_0 و d_0 هستند. با توجه به مینیمم فاز بودن سیستم داریم:

$$d_0 = 1$$

$$B^- = b_0$$

$$\deg A_m = \deg A = 3$$

$$B_m = A_m(1)q^{d_0} = A_m(1)q$$

$$\deg(A_0) = \deg(A) - \deg(B) - 1 = 3 - 2 - 1 = 0 \rightarrow A_0 = 1$$

$$l = \deg R = \deg S = \deg(A_0 A_m) - d_0 = 3 - 1 = 2$$

$$T^* = A_m(1) = A_m(1)$$

$$y(t) = R^* u_f(t - d_0) + S^* y_f(t - d_0)$$

$$u_f(t) = \frac{1}{A_0^*(q^{-1})A_m^*(q^{-1})} u(t)$$

$$y_f(t) = \frac{1}{A_0^*(q^{-1})A_m^*(q^{-1})} y(t)$$

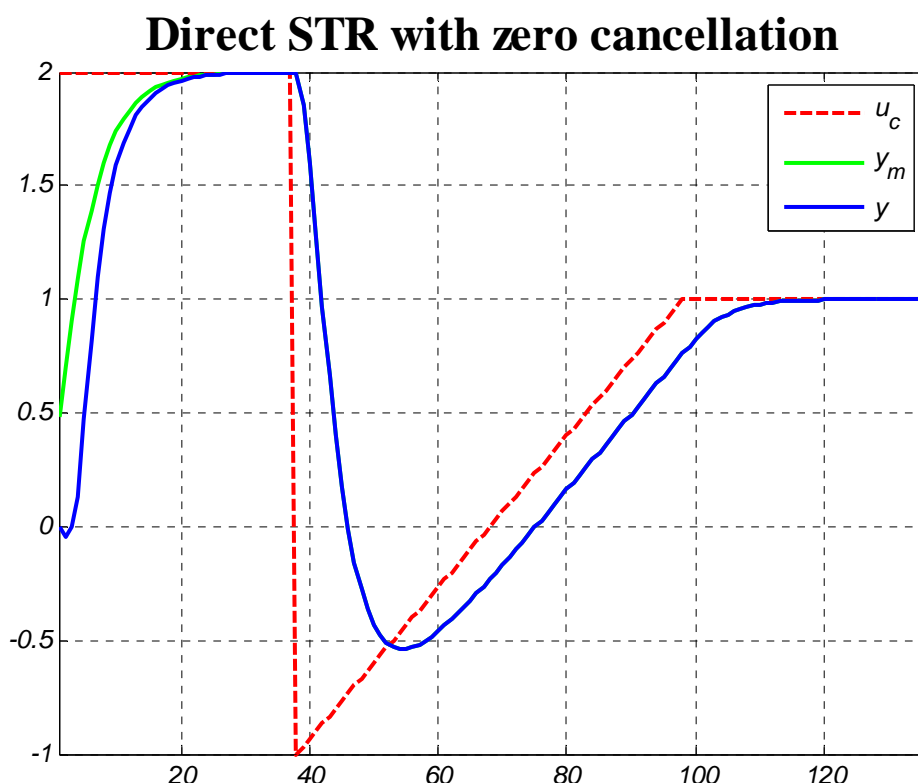
لازم است با استفاده از روش شناسایی RLS بردار پارامتر زیر را تخمین بزنیم:

$$\theta = [r_0 \quad r_1 \quad r_2 \quad s_0 \quad s_1 \quad s_2]$$

که در آن بردار رگرسیون بصورت زیر است:

$$\varphi = [u_f(t-1) \quad u_f(t-2) \quad u_f(t-3) \quad y_f(t-1) \quad y_f(t-2) \quad y_f(t-3)]$$

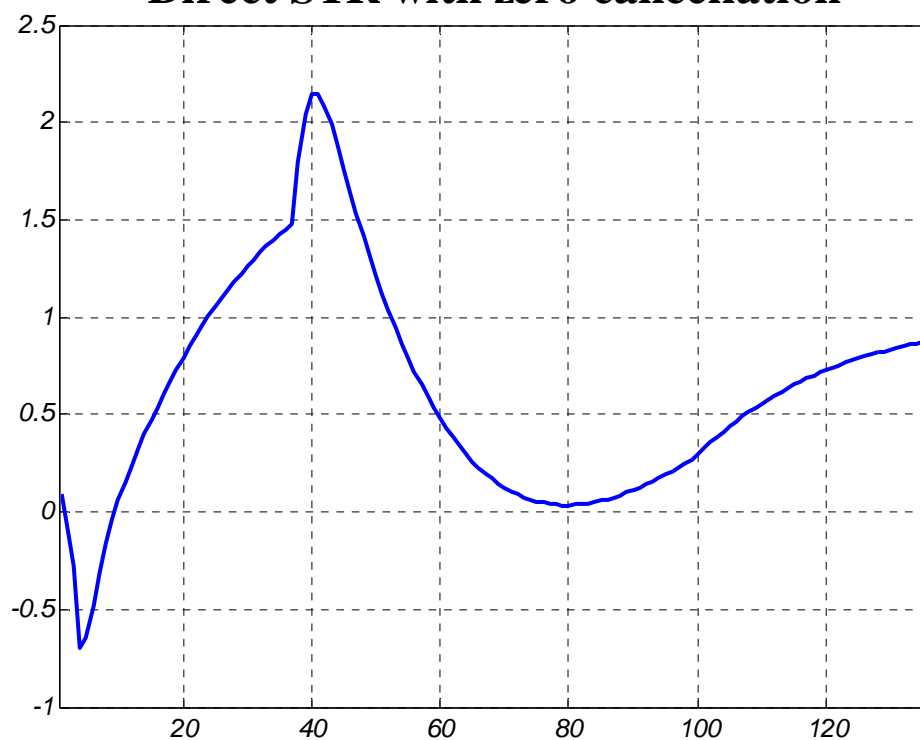
در شکل (۴۵) خروجی سیستم حلقه بسته با کنترلر STR مستقیم با حذف صفر و قطب آورده شده است.



شکل (۴۵): خروجی سیستم حلقه بسته برای ورودی داده شده و کنترلر STR مستقیم با حذف صفر.

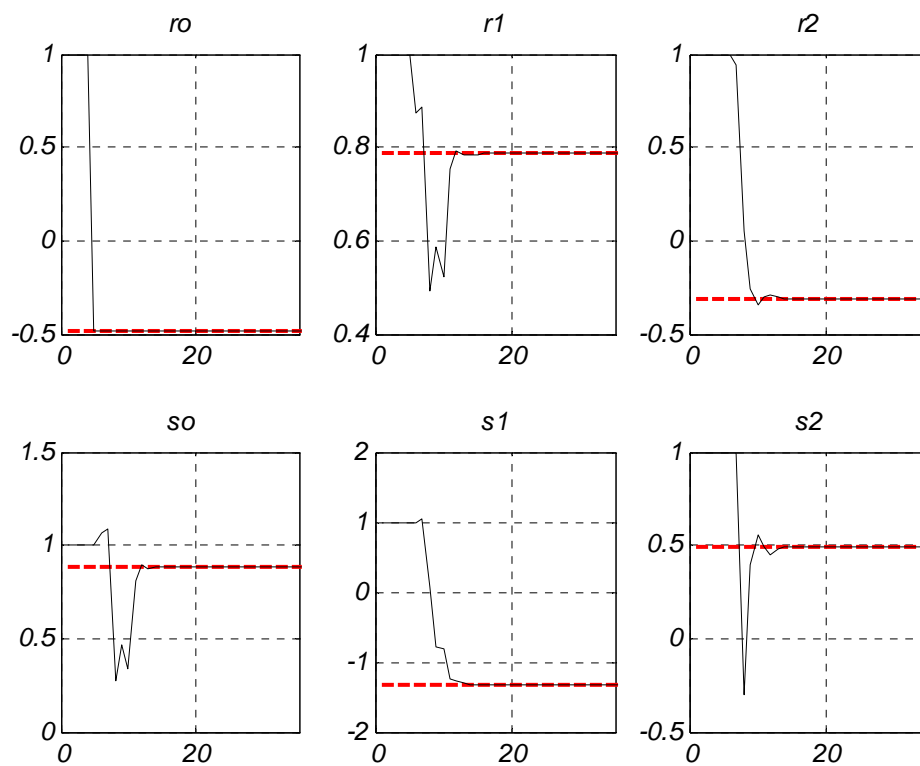
مشاهده می‌شود که به دلیل حذف صفرهای بدرفتار، پاسخ سیستم حلقه بسته در مقایسه با حالت STR مستقیم بدون حذف صفر بسیار بهتر شده است. با توجه به رفتار مطلوب حلقه بسته مورد نظر، سیستم حلقه بسته توانایی دنبال کردن ورودی پله را بدون خطای ماندگار خواهد داشت. اما این سیستم توانایی دنبال کردن ورودی شیب را ندارد. در واقع نوع سیستم که با توجه به تعداد قطب‌های حلقه باز واقع در $z=1$ تعیین می‌شود، برای این طراحی برابر یک بوده و لذا سیستم حلقه بسته تنها توانایی دنبال کردن بدون خطای ورودی پله را دارد و ورودی شیب را با خطای حالت ماندگار غیر صفر دنبال خواهد کرد. در شکل (۴۶) سیگنال کنترل حاصل با کنترلر STR مستقیم با حذف صفر و قطب آورده شده است.

Direct STR with zero cancellation



شکل (۴۶): سیگنال کنترل برای ورودی داده شده و کنترلر STR مستقیم با حذف صفر.

در شکل (۴۷) پارامترهای تخمین زده شده آورده شده‌اند.



شکل (۴۷): تخمین پارامترهای کنترلر.

مشاهده می‌شود که بعد از حدود ده مرحله پارامترهای تخمین زده شده به مقادیر واقعی خود همگرا خواهند شد.