

# طراحی کنترل تطبیقی مقاوم به روش کلیدزنی با سرپرستی مبتنی بر نظریه فیدبک کمی و انتقال بدون پرش

امید نمکی شوشتری<sup>۱</sup>، علی خاکی صدیق<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری مهندسی برق، گروه کنترل، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، onamakis@dena.kntu.ac.ir

<sup>۲</sup> استاد دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، گروه کنترل، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، sedigh@kntu.ac.ir

(تاریخ دریافت مقاله ۱۳۸۹/۱۰/۱۱، تاریخ پذیرش مقاله ۱۳۸۹/۱۲/۱۴)

**چکیده:** استفاده از کلیدزنی و سرپرستی و تلفیق آن با طراحی فیدبک کمی (QFT) برای فرایندهایی که گستره نامعینی وسیعی دارند، در این مقاله پیشنهاد شده است. در این راهکار مجموعه نامعینی به بازه‌های کوچکتری که به هر کدام یک فرایند (مدل) نامی اختصاص می‌یابد، تفکیک می‌شود. با فرض اینکه مساله کنترل مقاوم را برای هر کدام از این بازه‌ها می‌توان با تئوری فیدبک کمی حل کرد، در ساختار پیشنهادی از یک تصمیم‌ساز رده بالا (سرپرست) برای کلیدزنی بین اجزای این بانک کنترل‌کننده‌ها استفاده می‌شود. سرپرست با بررسی ورودی-خروجی‌های فرایند نامعین و اعمال آن‌ها به مدل‌های نامی گردآوری شده در بانک مدل، کنترل‌کننده مناسب را وارد حلقه فیدبک می‌کند. برای تضمین پایداری سیستم کلی از منطق کلیدزنی هیستریزس جهت کند کردن کلیدزنی استفاده می‌شود. با بکارگیری مثال‌های معروف QFT بهبود عملکرد سیستم حلقه‌بسته نشان داده شده، همچنین کنترل مقاوم فرایندهای نامعینی وسیعی که علامت بهره (در فرایندهای تک‌ورودی-تک‌خروجی) و یا جفت مناسب ورودی-خروجی (در فرایندهای چندمتغیره) تغییر می‌کند و با یک کنترل‌کننده مقاوم QFT قابل انجام نیستند، حل می‌شود. همچنین بمنظور انتقال بدون پرش ناشی از کلیدزنی ایده اشتراک حالت بکار می‌رود.

**کلمات کلیدی:** کنترل مبتنی بر کلیدزنی و با سرپرستی، کنترل مقاوم، تئوری فیدبک کمی، انتقال بدون پرش.

## Design of Supervisory Based Switching QFT Controllers with Bumpless Transfer

Omid Namaki-Shoushtari, Ali Khaki Sedigh

**Abstract:** In this paper, the problem of supervisory based switching Quantitative Feedback Theory (QFT) control is proposed for the control of highly uncertain plants. In the proposed strategy, the uncertainty region is divided into smaller regions with a nominal model. It is assumed that a QFT controller-prefilter exists for robust stability and performance of the smaller uncertainty subsets. The proposed control architecture is made up by these local controllers, which commute among themselves in accordance with the decision of a high level decision maker called the supervisor. The supervisor compares the candidate local model behaviors with the one of the real plant and selects the controller corresponding to the best fitted model. A hysteresis switching logic is used to slow down switching for stability reasons. It is shown that this strategy improves closed loop performance, and can also handle the uncertainty sets that cannot be tackled by a single QFT robust controller. The multirealization technique to implement a family of controllers is employed to achieve bumpless transfer. Simulation results show the effectiveness of the proposed methodology.

**Keywords:** Switching Supervisory Adaptive Control, Robust Control, QFT, Bumpless Transfer.

بگیرید که در آن کاربر با در نظر گرفتن تغییرات شرایط کاری متناوباً ورودی مبنای یک رشته کنترل‌کننده‌های PID را تنظیم می‌کند. در این

### ۱- مقدمه

یکی از راهکارهای کنترلی سیستم‌های پیچیده ترکیب منطق با دینامیک‌های پیوسته است. برای مثال یک محیط صنعتی را در نظر

<sup>۱</sup> Set-point

حالت می‌توان کاربرد را عنصری از حلقه فیدبک در نظر گرفت که دینامیک‌های پیوسته را با قواعد مبتنی بر منطق تنظیم می‌کند. مساله اساسی در این مقاله کنترل سیستم‌های پیچیده‌ای است که بواسطه گستره نامعینی وسیع، روش‌های استاندارد و مرسوم کنترل مقاوم مبتنی بر طراحی کنترل‌کننده‌ای واحد برای این سیستم‌ها عملکرد رضایت‌بخشی فراهم نمی‌آورند. در این حالت می‌توان از یک ساختار کنترل سلسله مراتبی مرکب از چند-کنترل‌کننده (بانک کنترل‌کننده) و یک سرپرست که با کلیدزنی، کنترل‌کننده مناسب را در حلقه فیدبک قرار می‌دهد، بهره گرفت [1].

در کنترل مبتنی بر کلیدزنی گستره وسیع نامعینی به زیربازه‌های کوچکتر که هر یک با یک فرایند نامی همراه با نامعینی (کمتر) بیان می‌شوند، تفکیک می‌شود. با فرض اینکه برای حل مساله کنترل مقاوم مربوط به این زیربازه‌ها بتوان کنترل‌کننده‌ای طراحی کرد، بانکی از کنترل‌کننده‌های کاندیدا ایجاد شده، یک تصمیم ساز رده بالا (سرپرست) بر اساس اندازه‌گیری‌هایی که به‌صورت بر روی خط<sup>۱</sup> از ورودی و خروجی فرایند انجام می‌گیرد، بین آنها کلیدزنی می‌کند. واحد سرپرستی از یک بانک مدل (فرایندهای نامی متناظر با زیربازه‌های کوچکتر نامعینی)، «مولد سیگنال پایش<sup>۲</sup>» (که از سیگنال‌های اندازه‌گیری برای تعیین کارایی کنترل‌کننده کاندیدای در حال کار و کارایی بالقوه سایر کنترل‌کننده‌ها استفاده می‌کند) و منطق کلیدزنی تشکیل می‌شود. در هر لحظه از زمان، سرپرست کنترل‌کننده مناسب را در حلقه فیدبک فعال می‌کند [۲]. مشابه با نگرش کلاسیک کنترل تطبیقی، زمانی که تخمین جدیدی از پارامترهای فرایند بدست آمد (براساس اندازه‌گیری‌های انجام شده، یکی از مدل‌ها به فرایند واقعی نزدیک‌تر تشخیص داده شد)، پارامترهای کنترل‌کننده توسط سرپرست بروز می‌شوند (کنترل‌کننده طراحی شده بر اساس این مدل وارد حلقه فیدبک می‌شود)، با این توضیح که این کار در زمان‌های مجزایی انجام می‌شود. برخلاف کنترل تطبیقی مرسوم، مکانیزم تطابق بصورتی گسسته و با کلیدزنی محقق می‌شود و به بیان دیگر روند شناسایی و کنترل بطور پیوسته روی هم اثری ندارند و تنها در زمان‌های کلیدزنی و در صورت لزوم، کنترل‌کننده بر اساس مدلی که به فرایند (نامعین) واقعی شبیه‌تر تخمین زده شده، اصلاح می‌شود.

یکی از مزایای بالقوه کنترل با سرپرستی نسبت به نگرش سنتی کنترل تطبیقی سرعت تطابق است؛ بدلیل اینکه فرایند یادگیری محدود

به تغییرات پیوسته نیست، تطابق بر روی خط در مقابل تغییرات ناگهانی در فرایند یا اهداف کنترلی، می‌تواند سریعتر انجام شود. تطابق سریع در مواردی که فرایند احتمالاً دستخوش تغییرات ناگهانی خواهد شد (مثلاً در اثر خرابی یا تداخلات خارجی) از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، چرا که ممکن است باعث ناپایداری سیستم شود یا عملکرد را بشدت کاهش دهد. یکی دیگر از ویژگی‌های دیدگاه کنترل باسرپرستی پیمانهای بودن<sup>۳</sup> آن است [۱]. اصولی که طراحی منطق کلیدزنی، تخمین‌زن‌ها و کنترل‌کننده‌های کاندیدا بر اساس آن‌ها نهاده می‌شود، متقابلاً مستقلند. بنابراین می‌توان از قوانین کنترلی مختلفی بهره برد. بر این اساس، در [۳] از PID در طراحی یک ساختار تطبیقی مدل‌های چندگانه برای کنترل pH استفاده شده است. در [۴] ساختار کنترل تطبیقی مبتنی بر مدل‌های چندگانه با تلفیق طراحی مقاوم (و نه تطبیقی) «سنتر // مخلوط» و مفهوم آزمون فرض تصادفی معرفی شده است.

ایده تلفیق کلیدزنی و طراحی فیدبک کمی با هدف غلبه بر محدودیت‌های کنترل‌کننده‌های خطی<sup>۴</sup> QFT در [۵] مطرح شده است. تئوری فیدبک کمی (QFT) یک راهکار قدرتمند طراحی مقاوم ارایه می‌نماید که در آن طراح در روند طراحی کنترل، بطور شفاف مصالحه‌های بین اهداف عملکردی و محدودیت‌های موجود را (که غالباً در تعارض با هم قرار دارند) تجربه می‌کند. در تئوری فیدبک کمی، هدف طراحی جبرانسازی با کمترین هزینه فیدبک (پهنای باند سیستم حلقه بسته) است که مشخصات پایداری و کارایی مورد نظر را با وجود نامعینی‌های موجود در مدل فرایند و اغتشاشات بیرونی (بطور مقاوم) برآورده کند [۶ و ۷]. در [۵] از طریق تلفیق کلیدزنی با طراحی مقاوم QFT سرعت پاسخ سیستم بواسطه تطابق سریع پارامترهای کنترل‌کننده در حین پاسخ گذرا و (صرفاً) بر اساس اندازه‌گیری دامنه خطا (ردیابی) بهبود داده شده است.

در این مقاله، با تلفیق ایده‌های کلیدزنی و سرپرستی در روند طراحی فیدبک کمی روش طراحی تطبیقی مقاومی معرفی می‌شود. در این روش، بازه (وسیع) نامعینی به زیربازه‌های کوچکتری تفکیک می‌شود. برای فرایند نامی هر زیربازه و نامعینی متناظر، مساله برآورده کردن مشخصه‌های پایداری و عملکرد مقاوم از طریق کنترل‌کننده QFT حل می‌شود. انتخاب کنترل‌کننده مناسب توسط یک ساختار سرپرستی و بر اساس سیگنال‌های پایش انجام می‌شود. برای تضمین پایداری سیستم کلی (دارای کلیدزنی)، با منطق هیستریزس [۸]

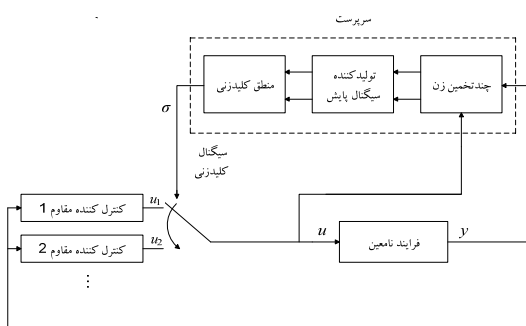
<sup>3</sup> Modularity  
<sup>4</sup> Quantitative Feedback Theory

<sup>1</sup> Online  
<sup>2</sup> Monitoring Signal Generator

### ۳- مقدمات طراحی

#### ۳-۱- کنترل مبتنی بر کلیدزنی و سرپرستی

در این قسمت به اختصار ساختار کنترل با کلیدزنی و سرپرستی را که به نوعی از روش‌های تطبیقی برای کنترل فرایندهای با نامعینی زیاد بشمار می‌رود، مرور می‌کنیم (شکل ۱ را ببینید). برای جزئیات بیشتر به [۱] و [۲] مراجعه آن‌ها مراجعه شود.



شکل ۱- معماری کنترل مبتنی بر کلیدزنی و سرپرستی

فرایند خطی نامعین  $E_p$  را که توسط پارامتر  $p$  پارامتریزه شده در نظر بگیرید. چنانچه  $p^*$  مقدار واقعی ولی نامعلوم  $p$  باشد، تحقق متناظر با  $E_{p^*}$  بصورت زیر است:

$$M_{p^*} : \begin{cases} \dot{x} = A_{p^*} x + B_{p^*} u \\ y = C_{p^*} x, \end{cases} \quad (1)$$

که در آن  $x \in \mathbb{R}^m$  بردار متغیرهای حالت،  $u \in \mathbb{R}^m$  بردار ورودی و  $y \in \mathbb{R}^m$  بردار خروجی سیستم است. پارامتر  $p^* \in \mathbb{R}^m$  نیز به مجموعه متناهی  $H = \{p_1, \dots, p_m\}$  تعلق دارد. همچنین فرض می‌شود که برای هر  $p \in H$  زوج  $(A_p, B_p)$  پایدارپذیر و  $(A_p, C_p)$  آشکارسازپذیر است. معماری کنترل تطبیقی با سرپرستی همانطور که در شکل ۱ نمایش داده شده است، مشتمل بر خانواده‌ای از کنترل‌کننده‌ها و سرپرست است. سرپرست نیز از چند-تخمین‌زن (بانک مدل)، واحد مولد سیگنال پایش و منطق کلیدزنی تشکیل شده که با تولید سیگنال کلیدزنی در هر لحظه از زمان تعیین می‌کند که کدام کنترل‌کننده فعال باشد.

**چند-تخمین‌زن:** این قسمت برای ارزیابی این که کدام مدل مجاز با فرایند واقعی هم‌خوانی بیشتری دارد، بکار می‌رود. چند-تخمین‌زن شامل مجموعه‌ای از مدل‌ها است که هر کدام متناظر با یک مقدار ثابت پارامتر  $p \in H$  در نظر گرفته می‌شود. از طریق اعمال ورودی فرایند  $u$  و خروجی آن  $y$ ، به مجموعه مدل‌ها، مجموعه‌ای از خروجی‌های  $p \in H$ ،  $y_p$  بدست می‌آید. چند-تخمین‌زن باید بگونه‌ای

کلیدزنی کند می‌شود. با بکارگیری مثالهای معروف QFT بهبود عملکرد سیستم حلقه‌بسته نشان داده می‌شود. همچنین حل مسایلی که با یک کنترل‌کننده مقاوم QFT قابل انجام نیست، نظیر کنترل مقاوم فرایندهای با نامعینی وسیعی که علامت بهره (در فرایندهای تک‌ورودی-تک خروجی) و یا جفت مناسب ورودی-خروجی (در فرایندهای چندمتغیره) تغییر می‌کند، با روش پیشنهادی انجام می‌شود. بمنظور انتقال بدون پرش ناشی از کلیدزنی بین کنترل‌کننده‌ها ایده «چند-تحقیق<sup>۱</sup>» بکار می‌رود. طراحی کنترل‌کننده کلیدزن تک‌ورودی-تک‌خروجی با کنترل‌کننده‌های مقاوم QFT در [۹] و حالت چندمتغیره آن در [۱۰] آورده شده است. این مقاله چارچوب واحدی برای طراحی کنترل‌کننده‌های کلیدزنی QFT با انتقال بدون پرش ارائه می‌کند.

در ادامه، بیان مسأله در بخش ۲ آورده شده است. در بخش ۳، مقدمات لازم برای طراحی به روش پیشنهادی شامل کنترل مبتنی بر کلیدزنی و طراحی فیدبک کمی به اختصار مرور می‌شود. ساختار پیشنهادی تطبیقی مقاوم در بخش ۴ ارائه و مزایای آن با شبیه‌سازی‌های بخش ۵ نشان داده شده است. در بخش پایانی نتیجه‌گیری ارائه می‌شود.

### ۲- بیان مسأله

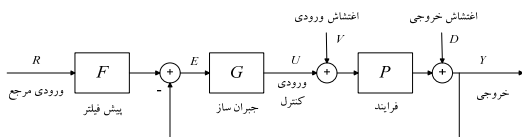
در این مقاله سیستم‌های خطی را که توابع تبدیل آن‌ها (اعم از اسکالر یا ماتریس تابع تبدیل) دارای پارامترهای نامعینی است و نیز در معرض اغتشاش قرار دارند در نظر می‌گیریم. البته در اینجا فرض بر این است که محدوده تغییرات پارامترها (بازه نامعینی) مشخص است. همچنین بدلیل گستره وسیع نامعینی استفاده از یک کنترل‌کننده ثابت عملکرد رضایت‌بخشی را فراهم نمی‌آورد. لذا استفاده از ساختار سرپرستی و کلیدزنی بین چند کنترل‌کننده برای بهبود عملکرد سیستم حلقه‌بسته پیشنهاد می‌شود. برای حل مسأله ردیابی مقاوم با وجود نامعینی و در حضور اغتشاش از تئوری فیدبک کمی (QFT) بهره می‌گیریم. به بیان دیگر، در ساختار پیشنهادی سرپرست از بین تعدادی کنترل‌کننده QFT، کنترل‌کننده مناسب را تعیین می‌کند. در بخش بعد، به مرور روند طراحی کنترل با کلیدزنی و طراحی فیدبک کمی می‌پردازیم.

<sup>1</sup> Multirealization

که در آن  $h > 0$  که ثابت هیستریزس خوانده می شود، یک پارامتر طراحی است که از کلیدزنی زیاد جلوگیری می کند. هم از نظر تئوری (تضمین پایداری) و هم بدلیل محدودیت های عملی مطلوب است که کلیدزنی با سرعت کمتری انجام شود. استفاده از ثابت هیستریزس در جهت تامین این خواسته است. بدین ترتیب ورودی کنترل اعمالی به فرایند سیگنال  $u(t) = u_n(t)$  است ( $\sigma$  سیگنال کلیدزنی است).

### ۲-۳- طراحی فیدبک کمی

تئوری فیدبک کمی (QFT) یک ابزار قدرتمند در طراحی کنترل مقاوم برای سیستم های نامعین است. این دیدگاه کمی روشی را برای طراحی معرفی می کند که این امکان را برای طراح فراهم می آورد که در روند طراحی مصالحه های لازم و محدودیت ها را بصورت شفاف تجربه کند ( $\gamma$ ). این راهکار از یک ساختار دو درجه آزادی که در شکل ۲ نمایش داده شده، بهره می برد و بویژه برای فرایندهای چندمتغیره، طراحی غیرمتمرکز QFT از یک جبران ساز قطری با ماتریس تابع تبدیل  $G(s)$  و یک پیش فیلتر  $F(s)$  برای دستیابی به اهداف عملکردی سیستم حلقه بسته شکل ۲ بهره می گیرد. در شکل ۲  $P(s)$  فرایند نامعین (چندمتغیره) است. در ادامه مرور سریعی بر طراحی کنترل مقاوم QFT خواهیم داشت.



شکل ۲- ساختار دو درجه آزادی طراحی فیدبک کمی

سیستم های تک ورودی-تک خروجی: طراحی براساس QFT که در حوزه فرکانس انجام می گیرد، ارتباط نزدیکی با طراحی های کلاسیک بر مبنای نمودارهای «بودی» دارد. برخی از مشخصه های عملکردی مطلوب معمول در QFT که به صورت قیدهایی بر اندازه توابع انتقال متناظر بیان می شوند، بقرار زیر است. مطلوب این است که این اهداف با وجود نامعینی و در حضور اغتشاش برآورده شوند.

- پایداری مقاوم (حاشیه بهره و فاز)

$$\left| F \frac{PG}{1+PG} \right| \leq W_{S1}$$

- مساله ردیابی با ساختار دو درجه آزادی

$$W_{S2a} \leq \left| F \frac{PG}{1+PG} \right| \leq W_{S2b}$$

طراحی شود که همواره برای یکی از مقادیر پارامتر  $\hat{p} \in H$  شرط انطباق زیر برای هر  $t \geq t_0$  و هر ورودی  $u$  برآورده شود:

$$|y_{\hat{p}}(t) - y(t)| \leq c_e e^{-\lambda_e(t-t_0)} |y_{\hat{p}}(t_0) - y(t_0)| \quad (2)$$

که در آن  $c_e \geq 0$  و  $\lambda_e > 0$  است. یک چند-تخمین زن مناسب برای فرایند (۱) که شرط فوق را دارا باشد، را می توان بصورت زیر با بردار متغیرهای حالت  $x_E = (\hat{x}_1, \dots, \hat{x}_n)$  درنظر گرفت:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}}_p &= A_p \hat{x}_p + B_p u + L_p (y_p - y), \\ y_p &= C_p \hat{x}_p, \end{aligned} \quad (3)$$

که در آن  $p \in H$  است و شرط (۲) برای  $p^* \hat{p} = p^*$  برقرار می شود اگر ماتریس های  $L_p$  بگونه ای باشند که ماتریس  $A_p + L_p C_p$  (برای هر  $p \in H$ ) هرویتز باشد. (توجه کنید که از رابطه (۳) برای  $p^* \hat{p} = p^*$  نتیجه می شود که  $y = C_p x$  و  $(d/dt)(x_p - x) = (A_p + L_p C_p)(x_p - x)$ .)

**بانک کنترل کننده:** این قسمت از مجموعه ای از کنترل کننده های کانیدیا تشکیل شده که توابع تبدیل آن ها بصورت  $\{G_p\}$  است. این کنترل کننده ها بگونه ای طراحی شده اند که هر یک برای یک  $p \in H$  اهداف مطلوب کنترلی را برای سیستم حلقه بسته فراهم می آورند. (در اینجا  $G_p$  از طریق طراحی فیدبک کمی بگونه ای طراحی می شود که مشخصات پایداری و عملکرد مقاوم را تامین کند.)

**سیگنال های پایش:** این سیگنال ها ( $\mu_p, p \in H$ ) بصورت نرُم انتگرالی خطاهای تخمین  $(e_p = y_p - y)$  تعریف می شوند. در این کار سیگنال های پایش بصورت زیر درنظر گرفته شده اند:

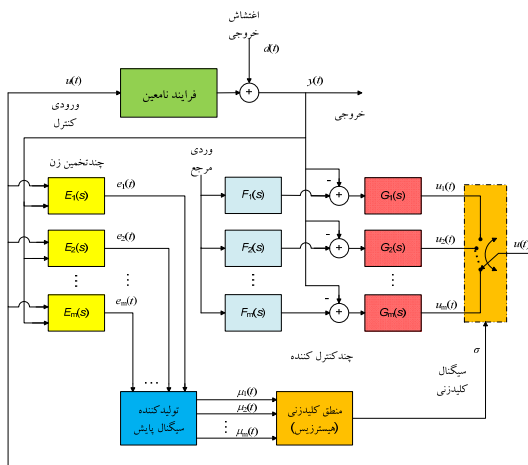
$$\mu_p := \varepsilon_0 + \int_0^t e^{-\lambda(t-s)} \gamma \|y_p(s) - y(s)\|^2 ds \quad (4)$$

که در آن  $\varepsilon_0 > 0$ ،  $\gamma$ ،  $\lambda \in (0, \lambda_0)$  است.  $\|\cdot\|$  نرُم برداری است و مقادیر  $\varepsilon_0$  و  $\gamma$  و  $\lambda$  پارامترهای طراحی هستند. مقدار  $\lambda_0$  نیز به مقادیر ویژه سیستم حلقه بسته مربوط است (برای جزئیات بیشتر به [۲] مراجعه شود). شایان توجه است که تداخلات بین خروجی های سیستم چندمتغیره نیز در بردار خطای تخمین درنظر گرفته می شود.

**منطق کلیدزنی:** سیگنال کلیدزنی که کنترل کننده فعال را در هر لحظه از زمان مشخص می نماید، از طریق منطق کلیدزنی تولید می شود. در اینجا از منطق کلیدزنی «هیستریزس مستقل از مقیاس» بصورت زیر ((۱۱)) استفاده می شود.

$$\sigma(t) := \begin{cases} \arg \min_{q \in P} \mu_q(t) & \text{if } \exists q \in P \text{ such that} \\ & (1+h)\mu_q(t) \leq \mu_{\sigma(t^-)}(t) \\ \sigma(t^-) & \text{else,} \end{cases} \quad (5)$$

از کنترل کننده دوم استفاده می شود که پهنای باند را به منظور تضعیف اثر نویز کاهش می دهد و با افزایش بهره فرکانس پایین موجب کاهش خطای ردیابی می شود. در این کار با هدف استفاده از معیار گرافیکی پیشنهادی برای تضمین پایداری سیستم حلقه بسته، هر دو کنترل کننده قطب های یکسانی باید داشته باشند که این قید عملکرد سیستم حلقه بسته را محدود می کند. در ادامه بدون در نظر گرفتن این قید، از QFT برای طراحی بانک کنترل کننده مورد استفاده در ساختار کلیدزنی و سرپرستی (شکل 3) بهره می گیریم و برای تضمین پایداری سیستم کلی دارای کلیدزنی، منطق هیستریزس را بکار می بریم. همچون روند طراحی QFT، ابتدا طراحی برای سیستم تک ورودی- تک خروجی انجام شده، سپس به سیستم های چندمتغیره گسترش می یابد.



شکل 3- ساختار پیشنهادی برای تلفیق ایده های کلیدزنی و سرپرستی و طراحی فیدبک کمی

در مورد سیستم هایی که نامعینی پارامتری گسترده ای دارند دو حالت مختلف امکان وجود دارد:

- 1- برای کل مجموعه نامعینی یک پاسخ کنترل QFT وجود دارد، ولی عملکرد سیستم حلقه بسته به حد مطلوب رضایت بخش نیست.
  - 2- بدلیل نامعینی زیاد سیستم آنچنان پیچیده است که با یک ساختار ثابت QFT (شکل 2) نمی توان پایداری و عملکرد مقاوم را تامین کرد. برای مثال دو حالت در اینجا مورد توجه قرار می گیرد: الف) تغییر علامت بهره فرایند (در فرایندهای تک ورودی- تک خروجی) و ب) تغییر جفت مناسب ورودی- خروجی (در فرایندهای چندمتغیره) بواسطه نامعینی گسترده فرایند.
- در این مقاله برای فرایندهای تک ورودی- تک خروجی هر دو حالت و برای فرایندهای چندمتغیره حالت دوم در نظر گرفته می شود.

- تضعیف اغتشاش اعمال شده در خروجی فرایند

$$\left| F \frac{1}{1+PG} \right| \leq WS_3$$

- تضعیف اغتشاش اعمال شده در ورودی فرایند

$$\left| F \frac{P}{1+PG} \right| \leq WS_4$$

که در آن  $WS_i$  مشخصه مطلوب بر روی اندازه تابع انتقال مربوطه را نشان می دهد.

سیستم های چند ورودی- چند خروجی: برای حل یک مساله طراحی چندمتغیره  $n \times n$  به روش غیرمترکز، مساله به  $n$  مساله طراحی تک حلقه (چند ورودی- تک خروجی) تبدیل می شود که برای هر یک نامعینی های پارامتری، اغتشاش های بیرونی و اهداف مطلوب از روی مساله (چندمتغیره) اصلی نتیجه می شود. همچنین تداخلات بین زیرسیستم های چند ورودی- تک خروجی به صورت اغتشاش در نظر گرفته می شود. هدف طراحی می تواند دنبال کردن ورودی مینا توسط خروجی مورد نظر و کمینه کردن اثر اغتشاشات (و تداخلات) در خروجی ها باشد. به بیان دیگر سیستم حلقه بسته پایدار بوده و قیده های زیر را ارضا نماید.

$$\begin{aligned} |t_{ij}(j\omega)| &\leq b_{ij}(\omega), \quad i \neq j, \\ 0 \leq a_{ii}(\omega) \leq |t_{ii}(j\omega)| &\leq b_{ii}(\omega), \end{aligned} \quad (6)$$

که در آن  $T(s) = [t_{ij}(s)]$  ماتریس نسبت کنترلی (تابع تبدیل چندمتغیره) است. عبارت دیگر  $t_{ij} = y_i / r_j$  ارتباط بین خروجی نام و ورودی نام را بیان می کند. ماتریس های  $A(s) = [a_{ij}(s)]$  و  $B(s) = [b_{ij}(s)]$  نیز به ترتیب، کران های مطلوب پایینی و بالایی برای ردیابی مساله چند ورودی- چند خروجی اند.

#### 4- استفاده از کلیدزنی و سرپرستی در طراحی فیدبک کمی

تلفیق ایده های کلیدزنی در طراحی فیدبک کمی با انگیزه غلبه بر محدودیت های کنترل QFT، در [5] پیشنهاد شده است. در این کار در هر لحظه از زمان، بسته به حالت فرایند برخی مشخصه ها بر سایرین اولویت داده می شوند. کنترل کننده مناسب با توجه به دامنه خطا با کلیدزنی فعال می شود. از دو کنترل کننده استفاده شده که یکی سریعتر، پایدارتر (با حاشیه فاز و بهره بیشتر) ولی با دقت کمتر است و در مواردی بکار گرفته می شود که دامنه خطا (ردیابی) زیاد است و خروجی از ورودی مرجع دور است. زمانی که دامنه خطا کوچک باشد،

فضای حالت برای آن سیستم مطرح است، مسأله چند-تحقیقی را می‌توان به صورت یافتن یک نمایش فضای حالت با پارامترهای قابل تنظیم برای یک مجموعه از توابع تبدیل مطرح نمود. در [۱۳ و ۱۴]، این مسأله برای سیستم‌های کنترل چندمتغیره (اکیدا سره)، با استفاده از صورت پوپوف برای ماتریس‌های چندجمله‌ای با چند-تحقیقی به صورت  $\{A_0 + L_1 C_0, B_1, C_0\}$  حل شده است. در [۱۶] راه‌حل جدیدی با استفاده از ماتریس چندجمله‌ای به صورت هرمیت برای مسأله چند-تحقیقی به صورت  $\{A_0 + A_1, B_1, C_0\}$  برای مجموعه‌ای از ماتریس‌های تابع تبدیل ارائه شده است که بسیار آسان‌تر از روش قبلی است و از مزایای دیگری همچون سادگی پیاده‌سازی نسبت به روش قبلی برخوردار است. در این چند-تحقیقی  $A_0$  ماتریسی پایدار و زوج  $(A_0, C_0)$  رویت‌پذیر است. در شبیه‌سازی‌های بخش بعدی به منظور بهبود پاسخ‌ها از روش اخیر برای پیاده‌سازی بانک کنترل‌کننده (جبران‌سازها و پیش‌فیلترهای کنترل QFT) بهره گرفته می‌شود. همچنین جهت سهولت، از این ایده می‌توان در پیاده‌سازی تخمین‌زن‌ها (بانک مدل) نیز استفاده کرد.

#### ۵- مطالعات شبیه سازی

در این بخش از یک فرایند نامعین تک‌ورودی-تک‌خروجی و یک فرایند چندمتغیره برای بررسی کارایی روش پیشنهادی استفاده می‌شود. لازم به تذکر است که این دو مثال بارها در مقالات مختلف برای طراحی‌های فیدبک کمی بکار گرفته شده‌اند (برای مثال به [۷ و ۱۷] مراجعه شود).

#### ۵-۱- سیستم‌های نامعین تک‌ورودی-تک‌خروجی

نخست فرایند نامعین زیر را در نظر بگیرید:

$$M_1(s) = \frac{ka}{s(s+a)},$$

برای نشان دادن دو حالت جداگانه‌ای که در بخش قبل ذکر شد، نامعینی این فرایند به دو صورت در نظر گرفته می‌شود:

حالت ۱: نامعینی فرایند به صورت  $k \in [1, 10]$ ,  $a \in [1, 10]$ . مشخصه‌های مطلوب سیستم حلقه بسته (با وجود نامعینی و در

حضور اغتشاش) عبارتند از:

- پایداری مقاوم (حاشیه بهره و فاز): با قید  $\left| \frac{L_f}{1+L_f} \right| \leq 1.2$ ,  $\omega > 0$  که در آن  $L_f$  بهره حلقه است.
- ردیابی مقاوم:

فرایند مورد بررسی یک سیستم خطی نامعین با ورودی  $u$  و خروجی  $y$  است که در معرض اغتشاش (خروجی)  $d$  قرار دارد. سیستم پایداری‌پذیر و آشکارسازی‌پذیر فرض می‌شود. همچنین فرض بر این است که (ماتریس) تابع تبدیل فرایند متعلق به دسته‌ای مشخص از توابع تبدیل مجاز به صورت زیر است:

$$M := \bigcup_{p \in P} M_p$$

که در آن پارامتر  $p$  در مجموعه منتهای  $H$  مقدار اختیار می‌کند. مجموعه فرایند  $E_p$  نیز شامل یک فرایند نامی  $v_p$  و دینامیک‌های مدل‌نشده بصورت زیر است:

$$M_p := \left\{ v_p (1 + \delta_m) + \delta_a : \|\delta_m\|_{\infty, \lambda} \leq \varepsilon, \|\delta_a\|_{\infty, \lambda} \leq \varepsilon \right\},$$

که در آن  $\varepsilon > 0$  و  $\lambda \geq 0$  مقادیر دلخواه هستند،  $\|\cdot\|_{\infty, \lambda}$  بیانگر نرم  $\infty$  وزن‌دهی شده با  $e^{\lambda t}$  (ماتریس) تابع تبدیل است.  $\bar{\sigma}(v(s-\lambda)) := \sup_{\text{Re}(s) \geq 0} \bar{\sigma}(v(s-\lambda))$  بیک مقدار تکین بیشینه است. بدین ترتیب، کل فضای نامعینی فرایند به نواحی کوچکتری افراز می‌شود که هر یک با مقادیری از پارامتر  $p$  مدل  $E_p$  بیان می‌شوند. با در نظر گرفتن نامعینی و اغتشاش متناظر با هر کدام از این نواحی کوچکتر، یک کنترل‌کننده QFT برای دستیابی به پایداری و ردیابی مقاوم طراحی می‌شود. (برای فرایند چندمتغیره با تعیین جفت ورودی-خروجی مناسب از کنترل غیرمتمرکز QFT (کنترل‌کننده قطری) استفاده می‌شود).

همچنین در بخش بانک مدل از تخمین‌زن‌هایی به شکل زیر استفاده می‌شود که در آن  $p \in H$  و  $A_E, B_E$  ماتریسی پایدار است.

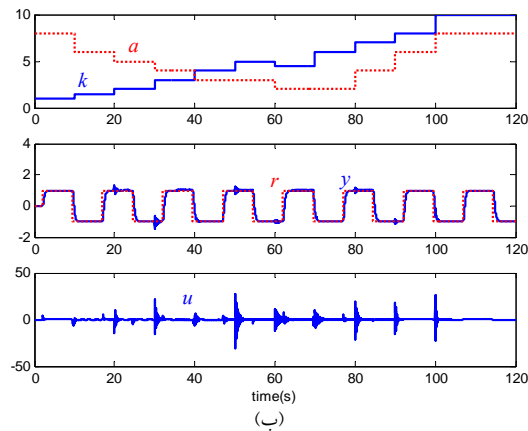
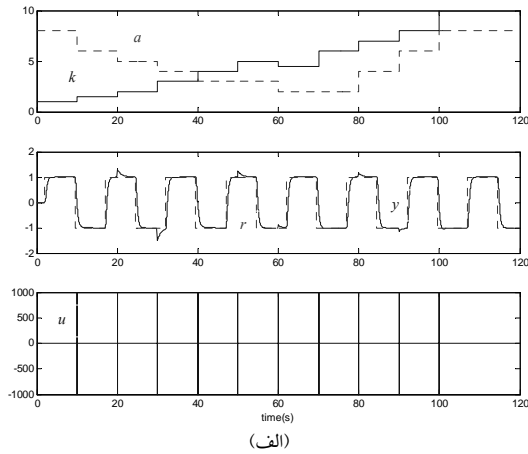
$$\dot{x}_E = A_E x_E + L_E y + B_E u, \quad y_p = C_p x_E, \quad e_p = y_p - y, \quad (7)$$

#### ۴-۱- انتقال بدون پرش

یکی از مشکلات مهم در پیاده‌سازی روش‌های کنترلی مبتنی بر کلیدزنی، پرش‌های خروجی (سیگنال کنترل) در لحظه کلیدزنی است. حل این موضوع که به مسأله «انتقال بدون پرش» معروف است و پاسخ‌گذارای سیستم کنترل را بهبود می‌دهد، مورد توجه قرار گرفته است. (۱۲-۱۵).

روش چند-تحقیقی به عنوان یک روش اشتراک‌گذاری حالت یکی از روش‌هایی است که برای حل مسأله انتقال بدون پرش ارائه شده است. مسأله چند-تحقیقی را می‌توان مشابه مسأله تحقق دانست. همان‌طور که مسأله تحقق برای یک سیستم به صورت یافتن یک نمایش

برای ارزیابی مقاومت سیستم حلقه بسته، مقادیر پارامترهای نامعین  $k$  و  $a$  در طول مدت شبیه سازی تغییر داده می شوند. از مقایسه نتایج شبیه سازی مشاهده می شود که دامنه سیگنال کنترل در ساختار مبتنی بر کلیدزنی نسبت به پاسخ QFT بطور قابل ملاحظه ای کاهش می یابد. (شکل ۴)



شکل 4- تغییرات پارامترهای فرایند نامعین و سیگنال های ورودی و خروجی سیستم حلقه بسته  
(الف) کنترل QFT با ساختار ثابت (ب) کنترل QFT مبتنی بر کلیدزنی

حالت ۲: نامعینی فرایند به صورت  
 $k \in [-10, -1] \cup [1, 10], a \in [1, 10]$ .  
 در این حالت اهداف عملکردی مطلوب همانند حالت ۱ است. با توجه به اینکه علامت بهره  $k$  نامعلوم است، نمی توان با یک کنترل کننده QFT ثابت این مساله را حل کرد. در اینجا، با تفکیک مجموعه نامعینی ها بصورت زیر، با استفاده از ساختار کلیدزنی پیشنهادی می توان مساله را حل کرد:

- أ.  $1 \leq k \leq 10, 1 \leq a \leq 10$ .
- ب.  $-10 \leq k \leq -1, 1 \leq a \leq 10$ .

$$\frac{8400}{(s+3)(s+4)(s+10)(s+70)} \leq T_r \leq \frac{0.6584(s+30)}{s^2+4s+19.75}$$

برای بازه فرکانسی  $\omega \leq \omega_h = 10 \text{ rad/s}$ ، که در آن تابع تبدیل از ورودی مرجع به خروجی است.

• تضعیف اغتشاش خروجی: با مدل  $T_D(s) = \frac{s(s+70)}{s^2+140s+5225}$  تابع انتقال اغتشاش خروجی به بازه فرکانسی اشاره شده در قسمت قبل از مدل  $T_D$  کوچکتر باشد.

در این حالت با استفاده از ساختار کنترلی دو درجه آزادی QFT می توان برای کل حوزه نامعینی پاسخی برای مساله بدست آورد. اما در اینجا، برای بهبود عملکرد سیستم ساختار مبتنی بر کلیدزنی پیشنهادی بکار گرفته می شود.

به این منظور مجموعه نامعینی ها به صورت زیر به مجموعه های کوچکتری تفکیک می شود:

أ.  $1 \leq k \leq 2, 1 \leq a \leq 10$ .

ب.  $2 \leq k \leq 5, 1 \leq a \leq 10$ .

ج.  $5 \leq k \leq 10, 1 \leq a \leq 10$ .

برای این سیستم مشابه [12] یک چند-تخمین زن با ایده اشتراک حالت از طریق چند-تحقیق زیر بکار می رود:

$$\dot{x}_E = \begin{bmatrix} A_E & 0 \\ 0 & A_E \end{bmatrix} x_E + \begin{bmatrix} b_E \\ 0 \end{bmatrix} y + \begin{bmatrix} 0 \\ b_E \end{bmatrix} u$$

$$y_p = c_p x_E$$

که در آن  $A_E$  ماتریسی پایدار، زوج  $(A_E, b_E)$  پایداری پذیر و مستقل از پارامتر نامعین  $p$  است و چند-تحقیق

$$E_{\theta}(s) = \left\{ \begin{bmatrix} A_E & 0 \\ 0 & A_E \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_E \\ 0 \end{bmatrix} c_p, \begin{bmatrix} 0 \\ b_E \end{bmatrix}, c_p \right\}$$

است. برای سادگی می توان  $(A_E, b_E)$  را بصورت تحقق کانونیکال کنترل کننده با چند جمله ای مشخصه  $s^2 + \omega_2 s + \omega_1$  انتخاب کرد. در

این صورت بردار  $c_p$  به صورت  $c_p := [\omega_1 \ \omega_2 - a \ k \ a \ 0]$  به دست می آید. برای تولید سیگنال های پایش عملکرد  $\mu_p, p \in H$  نیز

می توان مشابه [۲ و ۱۲] و از ایده اشتراک حالت استفاده کرد. حال برای هر کدام از نواحی نامعینی (کوچکتر) یک جبران ساز و پیش فیلتر QFT طراحی می شود. برای این کار، مراحل مختلف طراحی و کران ها در

قالب یک مساله بهینه سازی مقید فرموله بندی شده و از الگوریتم ژنتیک برای حل این مساله بهینه سازی استفاده می شود ([۱۸]). در نهایت مشابه معماری شکل ۳، کنترل کننده مناسب بر اساس مقادیر سیگنال های

پایش توسط سرپرست در حلقه فیدبک فعال می شود.

جدول ۱: پارامترهای فرآیند مربوط به مثال چند ورودی-چند خروجی

No.	$\gamma_{11}$	$\gamma_{22}$	$\gamma_{12}$	$\gamma_{21}$	$\delta_{11}$	$\delta_{22}$	$\delta_{12}$	$\delta_{21}$
1	1	2	0.5	1	1	2	2	3
2	1	2	0.5	1	0.5	1	1	2
3	1	2	0.5	1	0.2	0.4	0.5	1
4	1	2	4	5	2	3	1	2
5	1	2	4	5	1	2	0.5	1
6	1	2	4	5	0.5	1	0.2	0.4
7	10	8	2	4	1	2	2	3
8	10	8	2	4	0.5	1	1	2
9	10	8	2	4	0.2	0.4	0.5	1
10	5	8	16	20	2	3	1	2
11	5	8	16	20	1	2	0.5	1
12	5	8	16	20	0.5	1	0.2	0.4

مشخصه‌های مطلوب عملکردی برای سیستم حلقه‌بسته بصورت زیر در نظر گرفته می‌شوند:

(الف) ردیابی مقاوم: مشخصه ردیابی  $Tu_{ij} \leq |T_{CIR}(j\omega)|_{ij} \leq Tu_{ij}$  بر روی کانال‌های ورودی-خروجی ( $i, j = 1, 2$ ) با تاکید بر تضعیف تداخلات سیستم چندمتغیره، برای بازه فرکانسی  $\omega \leq \omega_h = 10 \text{ rad/s}$  با کران‌های زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$T_{ii}(\omega) = \left| \frac{4}{s^2 + 4.4s + 4} \right|_{s=j\omega} \quad \text{روی قطر (ردیابی):}$$

$$Tu_{ii}(\omega) = \left| \frac{25}{s^2 + 6s + 25} \right|_{s=j\omega}$$

خارج قطر (حذف تداخلات):  $Tu_{ij}(\omega) = 0.1$  و  $T_{ij} = 0$   
 (ب) پایداری مقاوم: بصورت قید  $|1/(1+L_i)| \leq 3.5 \text{ dB}$  برای همه فرایندها (با وجود نامعینی) در نظر گرفته می‌شود. که در آن  $L_i$  بهره حلقه نام است. بدین ترتیب حدبهره 9.6 dB و حدفاز 39 درجه تامین می‌شود [۱۹].

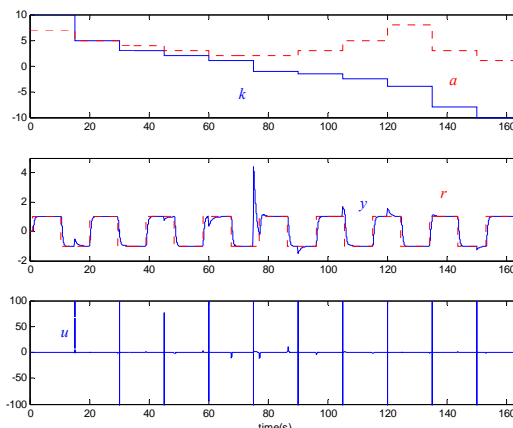
فرایند  $2 \times 2$  نامعین  $E_1(s)$  را می‌توان بصورت زیر متناظر با مدل فضای حالت (۱)، تحقق داد.

$$A_p = \begin{pmatrix} 0 & -\frac{1}{\delta_{11}\delta_{12}} & 0 & 0 \\ 1 & -(\frac{1}{\delta_{11}} + \frac{1}{\delta_{12}}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{\delta_{21}\delta_{22}} \\ 0 & 0 & 1 & -(\frac{1}{\delta_{21}} + \frac{1}{\delta_{22}}) \end{pmatrix}, \quad B_p = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$C_p = \begin{pmatrix} \frac{\gamma_{11}}{\delta_{11}\delta_{21}} & \frac{\gamma_{11}}{\delta_{11}} & \frac{\gamma_{12}}{\delta_{12}\delta_{22}} & \frac{\gamma_{12}}{\delta_{12}} \\ \frac{\gamma_{21}}{\delta_{11}\delta_{21}} & \frac{\gamma_{21}}{\delta_{21}} & \frac{\gamma_{22}}{\delta_{12}\delta_{22}} & \frac{\gamma_{22}}{\delta_{22}} \end{pmatrix}$$

یکی از معیارهای سنجش تداخلات در فرایندهای چندمتغیره «آرایه بهره نسبی» (RGA) است [۲۰]، که کاربرد زیادی در تعیین جفت ورودی-خروجی مناسب برای طراحی‌های غیرمترکز دارد.

از پاسخ بهینه طراحی شده در [۱۸] می‌توان برای هر یک از نواحی نامعینی استفاده کرد. (برای ناحیه «ب» بهره کنترل‌کننده قرینه شود.) توجه شود که تغییر پارامترهای فرایند را می‌توان بصورت یک اغتشاش خروجی در نظر گرفت که در طراحی QFT مورد توجه بود. نتایج شبیه‌سازی در شکل ۵ آمده است.



شکل ۵- کنترل QFT مبتنی بر کلیدزنی برای فرایند نامعینی که علامت بهره‌اش متغیر است

### ۵-۲- سیستم‌های نامعین چندورودی-چندخروجی

در این قسمت تنها حالتی مورد توجه است که بواسطه نامعینی زیاد فرایند، نمی‌توان برای مساله طراحی از تئوری فیدبک کمی بدون کلیدزنی استفاده کرد. در این مثال فرض بر این است که از کنترل غیرمترکز QFT استفاده شود در حالیکه جفت مناسب ورودی-خروجی فرایند (بدلیل نامعینی زیاد) می‌تواند تغییر کند. فرایند دو ورودی- دو خروجی زیر را در نظر بگیرید:

$$M_2(s) = \begin{bmatrix} \frac{\gamma_{11}}{1+s\delta_{11}} & \frac{\gamma_{12}}{1+s\delta_{12}} \\ \frac{\gamma_{21}}{1+s\delta_{21}} & \frac{\gamma_{22}}{1+s\delta_{22}} \end{bmatrix}$$

حالت‌های دوازده‌گانه متناظر با پارامترهای نامعین این فرایند در جدول ۱ آمده است. پیچیدگی مساله کنترل غیرمترکز این سیستم در این نکته نهفته است که جفت ورودی-خروجی مناسب با تغییر مقادیر پارامترهای آن، تغییر می‌یابد.



برای هر کدام از نواحی فوق یک طراحی فیدبک کمتی غیرمترکز که اهداف مطلوب پایداری و عملکرد مقاوم را با وجود نامعینی تامین کند، انجام می‌شود. جبران‌سازها و پیش‌فیلترهای منتهج بشح زیر است:

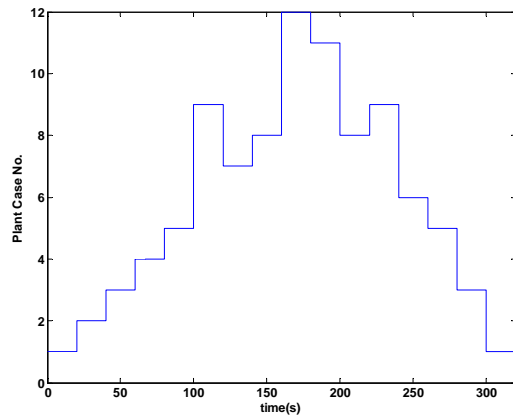
$$G_1(s) = \begin{pmatrix} \frac{185(s+1.1)}{s(s+13.5)} & 0 \\ 0 & \frac{10(s+1.4)}{s(s+5.3)} \end{pmatrix}, F_1(s) = \begin{pmatrix} \frac{6}{s+6} & 0 \\ 0 & \frac{5.8}{s+5.8} \end{pmatrix}$$

$$G_2(s) = \begin{pmatrix} 0 & \frac{58(s+3)}{s(s+22)} \\ \frac{38.4(s+1.7)}{s(s+72)} & 0 \end{pmatrix}, F_2(s) = \begin{pmatrix} 0 & \frac{2.7}{s+2.7} \\ \frac{6.5}{s+6.5} & 0 \end{pmatrix}$$

$$G_3(s) = \begin{pmatrix} \frac{23(s+1)}{s(s+16.3)} & 0 \\ 0 & \frac{18.6(s+6)}{s(s+84.8)} \end{pmatrix}, F_3(s) = \begin{pmatrix} \frac{2.1}{s+2.1} & 0 \\ 0 & \frac{1.9}{s+1.9} \end{pmatrix}$$

$$G_4(s) = \begin{pmatrix} 0 & \frac{96(s+2.5)}{s(s+83.3)} \\ \frac{25(s+1.2)}{s(s+99.8)} & 0 \end{pmatrix}, F_4(s) = \begin{pmatrix} 0 & \frac{1.7}{s+1.7} \\ \frac{1.8}{s+1.8} & 0 \end{pmatrix}$$

همانگونه که اشاره شد در ساختار مبتنی بر کلیدزنی و سرپرستی پیشنهادی (شکل ۳) کنترل‌کننده غیرمترکز مناسب توسط سرپرست وارد حلقه فیدبک می‌شود. برای ارزیابی مقاومت سیستم حلقه‌بسته، مقادیر پارامترهای نامعین فرایند در شبیه‌سازی‌های این قسمت مطابق شکل ۶ تغییر داده شده‌اند.



شکل ۶ - تغییرات پارامترهای فرایند  $2 \times 2$  نامعین  $E_1(s)$

ماتریس آرایه بهره نسبی  $\Lambda$  برای فرایند  $E_1(s)$  بصورت  $\Lambda = E_1^{-T}(0) * E_1(0)$  است که در آن نشان ستاره \* حاصل ضرب شر (عنصر به عنصر) و  $-T$  معکوس ترانهاده ماتریس را نشان می‌دهد. براحتی می‌توان نشان داد که در ماتریس  $\Lambda$  مجموع عناصر هر ردیف و هر ستون برابر یک است. بنابراین برای یک فرایند  $2 \times 2$  RGA با عنصر اسکالر  $\lambda = \Lambda_{11}$  مشخص می‌شود. پیشنهاد شده است که ورودی-خروجی‌ها بگونه‌ای جفت شوند که  $0.67 < \lambda < 1.5$  باشد و بویژه برای  $\lambda < 0$  کنترل غیرمترکز بسیار مشکل است ([۲۱]). برای فرایند  $E_1(s)$  عناصر RGA را می‌توان از روی  $\lambda = \frac{\gamma_{11}\gamma_{22}}{\gamma_{11}\gamma_{22} - \gamma_{12}\gamma_{21}}$  بدست آورد. برای حالت‌های ۱ تا ۳،  $\lambda = 1.33$  است لذا جفت کردن ورودی-خروجی در راستای قطر پیشنهاد می‌شود. در حالت‌های ۴ تا ۶ با تغییر پارامترهای فرایند، تغییرات ساختاری در فرایند رخ می‌دهد بگونه‌ای که  $\lambda = -0.11$  است و در این مورد بهتر است جفت‌های ورودی-خروجی بصورت  $y_1 - u_2 / y_2 - u_1$  انتخاب شود. در صورتی که از یک ساختار کنترلی ثابت (کنترل مقاوم) استفاده شود، برای حالت ۴ تا ۶ استفاده از جفت ورودی-خروجی قبلی  $(y_1 - u_1 / y_2 - u_2)$  می‌تواند بسادگی منجر به ناپایداری سیستم حلقه‌بسته شود. درحالی‌که با استفاده از ساختار مبتنی بر کلیدزنی پیشنهادی (شکل ۳)، تغییرات ماتریس RGA که ناشی از تغییر پارامترهای فرایند است (شکل ۶) توسط سرپرست تشخیص داده می‌شود (به شکل ۷ توجه کنید). بدین ترتیب با تغییر پارامترهای فرایند، جفت ورودی-خروجی مناسب انتخاب می‌شود. شکل ۸ نشان می‌دهد که ساختار طراحی QFT مبتنی بر کلیدزنی پیشنهادی با وجود تغییر ساختار فرایند بخوبی عمل می‌کند. ورودی‌های کنترلی نیز در شکل ۹ نمایش داده شده‌اند. بطور مشابه، برای حالات ۷ تا ۹  $\lambda = 1.11$  و متناظر با حالت‌های ۱۰ تا ۱۲،  $\lambda = -0.14$  است و در نتیجه جفت مناسب ورودی-خروجی در موارد ذکر شده برترتیب بصورت  $y_1 - u_2 / y_2 - u_1$  و  $y_1 - u_2 / y_2 - u_1$  است.

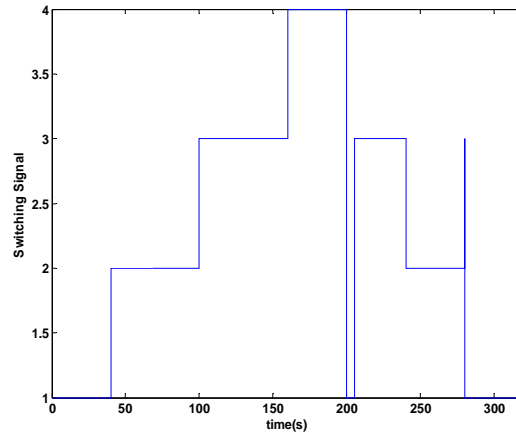
به‌منظور طراحی سیستم کنترل غیرمترکز QFT مبتنی بر کلیدزنی پیشنهادی و با توجه به ماتریس RGA، نامعینی‌های فرایند به نواحی کوچکتر زیر تفکیک می‌شود:

- ا. حالت‌های ۱، ۲ و ۳
- ب. حالت‌های ۴، ۵ و ۶
- ج. حالت‌های ۷، ۸ و ۹
- د. حالت‌های ۱۰، ۱۱ و ۱۲

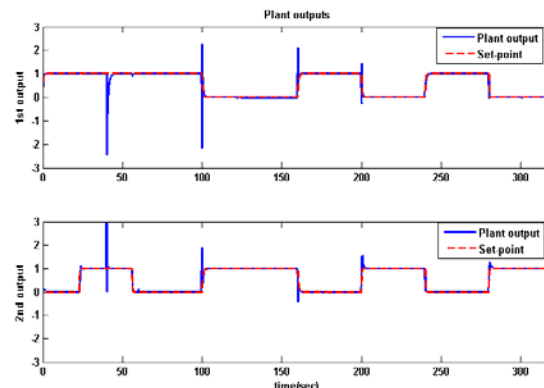
یک کنترل کننده مقاوم QFT عملکرد مطلوب موردنظر را تامین نمی کند، استفاده شد. ساختار پیشنهادی متشکل است از مجموعه ای از جبران سازها (بانک کنترل کننده) که با ایده اشتراک حالت برای انتقال بدون پرش تحقق داده شدند و یک سرپرست که در هر لحظه کنترل کننده مناسب را در حلقه کلید می زند. هر یک از کنترل کننده های مقاوم بگونه ای طراحی شدند که پایداری و عملکرد مقاوم را در محدوده ای کوچکتر از محدوده نامعینی کلی فرایند تامین کنند. سرپرست نیز شامل مجموعه ای از تخمین زن ها (که بصورت چند-تحقیقی پیاده سازی شدند)، مولد سیگنال پایش و منطق کلیدزنی هیستریزاس است. کنترل کننده متناظر با مدلی که بر اساس داده های اندازه گیری بیشترین انطباق را با فرایند (نامعین) واقعی دارد، توسط سرپرست در حلقه فیدبک فعال می شود. با استفاده از شبیه سازی های کارایی روش پیشنهادی برای فرایندهای با گستره نامعینی زیاد که در مواردی حتی با کنترل مقاوم QFT پاسخی برای کل مجموعه نامعینی وجود ندارد، نشان داده شد.

### مراجع

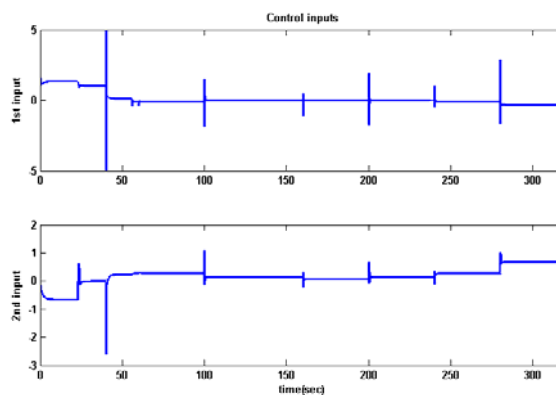
- [1] J. P. Hespanha, D. Liberzon, and A. S. Morse, "Overcoming the limitations of adaptive control by means of logic-based switching," *Syst. Contr. Lett.*, vol. 49, no. 1, pp. 49-65, Apr. 2003.
- [2] D. Liberzon, *Switching in Systems and Control*, Birkhauser, Boston, MA, 2003.
- [3] J. M. Böling, D. E. Seborg, and J. P. Hespanha, "Multi-model adaptive control of a simulated pH neutralization process," *Control Engineering Practice*, vol. 15, no. 6, pp. 663-672, June 2007.
- [4] S. Fekri, M. Athans, and A. Pascoal, "Issues, progress and new results in robust adaptive control," *Int. J. Adapt. Control Signal Process.*, vol. 20, pp. 519-579, 2006.
- [5] M. Garcia-Sanz, and J. Elso, "Beyond the linear limitations by combining Switching & QFT: Application to Wind Turbines Pitch Control Systems," Special Issue: "Wind Turbines: New Challenges and Advanced Control Solutions". *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, vol. 19, no. 1, pp. 40-58, 2009.
- [6] I. Horowitz, "Survey of quantitative feedback theory (QFT)," *International Journal of Control*, vol. 53, no. 2, pp. 255-291, 1991. Also in *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, vol. 11, pp. 887-921, 2001.
- [7] C. H. Houpis, S. J. Rasmussen, and M. Garcia-Sanz, *Quantitative Feedback Theory: Fundamentals and Applications* (2nd edition). A CRC Press Book, Taylor & Francis: Florida, 2006.
- [8] J. P. Hespanha, D. Liberzon, A. S. Morse, B. D. O. Anderson, T. S. Brinsmead, and F. de Bruyne, "Multiple model adaptive control, part 2: switching," *Int. J. of Robust and Nonlinear Control Special*



شکل 7- سیگنال کلیدزنی، توجه کنید که تغییرات آرایه بهره نسبی فرایند توسط سرپرست تشخیص داده می شود



شکل 8- خروجی های سیستم حلقه بسته کنترل QFT مبتنی بر کلیدزنی (کنترل کننده ها برای داشتن انتقال بدون پرش با ایده اشتراک حالت پیاده سازی شده اند).



شکل 9- ورودی های کنترلی ساختار کنترل QFT مبتنی بر کلیدزنی (کنترل کننده ها برای داشتن انتقال بدون پرش با ایده اشتراک حالت پیاده سازی شده اند).

### ۶- نتیجه گیری

در این مقاله از تئوری فیدبک کمی (QFT) در کنترل تطبیقی مقاوم مبتنی بر کلیدزنی برای سیستم های نامعینی زیاد که استفاده از

- systems,” *IEEE Trans. on Automatic Control*, vol. 51, no.4, pp. 690–695, April 2006.
- [15] S. W. Su, B. D. O. Anderson, W. Chen, and H. Nguyen. “Multi-realization of nonlinear systems,” in *Proceedings of the 48th IEEE Conference on Decision and Control*, Shanghai, China, Dec 2009, pp. 5901–5905.
- [۱۶] هادی صادقی شرامین، «اشتراک گذاری حالت در سیستم‌های چندمتغیره و کاربرد آن در کنترل کلیدزنی»، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، تهران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، ۱۳۸۹.
- [17] I. Horowitz. “Quantitative synthesis of uncertain multiple input-output feedback systems,” *International Journal of Control*; vol. 30, no. 1, pp.81-106, 1979.
- [18] A. Khaki-Sedigh, and C. Lucas “Optimal design of robust quantitative feedback controllers using random optimization techniques,” *International Journal of Systems Science*; vol. 31, no.8, pp. 1043-1052, 2000.
- [19] O. Yaniv, *Quantitative Feedback Design of Linear and Nonlinear Control Systems*. Kluwer Academic Publishers: Dordrecht, MA, U.S.A., 1999.
- [20] E. Bristol, “on a new measure of interaction for multivariable process control,” *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. 11, p. 133-134, 1966.
- [21] S. Skogestad, I. Postlethwaite, *Multivariable Feedback Control Analysis and Design*, second ed., John Wiley & Sons, 2005.
- Issue on Hybrid Systems in Control*, vol. 11, no. 5, pp. 479–496, Apr. 2001.
- [9] O. Namaki-Shoushtari, A. Khaki Sedigh “Design of Supervisory Based Switching QFT Controllers for Improved Closed Loop Performance” in *Proceedings of the 18th Iranian Conference on Electrical Engineering, ICEE 2010*, Isfahan, Iran, May 2010, pp. 599 – 604.
- [10] O. Namaki-Shoushtari, A. Khaki Sedigh “Design of decentralized supervisory based switching QFT controller for uncertain multivariable plants,” in *Proceedings of the 48th IEEE Conference on Decision and Control*, Shanghai, China, Dec 2009, pp. 934 - 939.
- [11] J. P. Hespanha, D. Liberzon, and A. S. Morse, “Bounds on the number of switchings with scale independent hysteresis: Applications to supervisory control,” in *Proceedings of the 39th Conference on Decision and Control*, Sydney, Australia, Dec 2000, pp. 3622–3627.
- [12] A. S. Morse, Control using logic-based switching. In A. Isidori, editor, *Trends in Control: An European Perspective*, pp. 69–113, Springer-Verlag, London, 1995.
- [13] B. D. O. Anderson, S. W. Su, and T. S. Brinsmead. “Multirealisation of linear systems,” *IEEE Trans. on Circuits and Systems II: Express Briefs Part II*, vol. 52, pp. 442–446, Aug. 2005.
- [14] S. W. Su, B. D. O. Anderson, and T. S. Brinsmead. “Minimal multirealisation of MIMO linear