

التحكم الفعال الأمثل بعدم اتزان الاحتراق في حارق نموذجي

الدكتور حبيب محمود*

تاريخ الإيداع 24 / 2 / 2008. قُبِلَ للنشر في 29/6/2008

□ الملخص □

إن تطبيق تقنية التحكم الفعال لإزالة حالات عدم الاستقرار أصبح حاجة ملحة في ظل الطلب المتزايد على منظومات احتراق عالية المردود وذات إصدارات منخفضة من الملوثات، ولكن الآلية المعقدة لحدوث عدم الاتزان ضمن أنظمة الاحتراق جعل من الصعب إيجاد نموذج رياضي دقيق يصف ديناميكية عدم الاتزان؛ لذلك فإن المحاولات الرامية لتصميم منظومة تحكم فعّال تعتمد بشكل كبير على المحاولة والخطأ. وهذا ما جعل الوصول إلى الحالة المثلى لتصميم المنظم أمراً صعباً. في هذا البحث، أُجريت دراسة تجريبية لاستقصاء ديناميكية الحارق غير المستقر، وتحديد تابع تحويله بالاعتماد على طريقة التوصيف. وبناءً على تابع التحويل قمنا بتصميم المنظم ذي الأداء الأمثل باستخدام تقنية المنظم التريبيعي الخطي LQR. وقد مكّنا هذا المنظم من ضبط الحارق وإزالة عدم الاستقرار خلال زمن مقداره 40 s في حين يحتاج المنظم المصمم بطريقة المحاولة والخطأ إلى حوالي 100 s، كما أن جهد التحكم المطلوب لعملية الضبط أقل بنسبة 75 %.

الكلمات المفتاحية: حارق نموذجي، عدم اتزان الاحتراق، التحكم الفعال الأمثل، التوصيف.

* أستاذ مساعد - قسم هندسة القوى الميكانيكية - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

Optimal Active Control of Combustion Instability in Model Combustor

Dr. Habib Mahmoud*

(Received 24 / 2 / 2008. Accepted 29 / 6 / 2008)

□ ABSTRACT □

Application of active control to element combustion instability has assumed greater significance with the ever increasing demand for high efficiency and low emission. Because of the complexity of instability occurring within combustion systems there are rare accurate models describing their dynamics. Therefore, attempts to design active control systems have largely been based on trial and error. As such, it is difficult to optimize these controllers. In this paper, an experimental study using identification techniques is conducted to investigate the dynamics of an unstable combustor and determine its transfer function. The optimal controller's design is based on the transfer function, using the linear quadratic regulator (LQR) technique. This controller has stabilized the combustor within the settling time of about 40s in comparison with 100s for the designed controller of the trial and error method. Also, the control effort is less than 75%.

Keywords: Model Combustor, Combustion Instability, Optimal Active Control, Identification.

* Associate Professor, Mechanical Power Engineering Department, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

مقدمة:

يحدث عدم اتزان الاحتراق combustion instability في أنظمة الاحتراق المستمر الموجودة في معظم التطبيقات التي تتضمن توليد الطاقة، وعمليات التسخين، وتوليد القوة الدافعة (الحراقات الصناعية والمنزلية، العنقات الغازية والبخارية ومحركات الدفع النفاثة، ..) بسبب الترابط القائم ما بين انطلاق الحرارة غير المستقر والحقل الصوتي (ذبذبات الضغط) السائد في الحارق. إن حدوث عدم الاتزان (الاستقرار) في أنظمة الاحتراق العملية يشكل خطراً على سلامة بنيتها، ويكون هذا الخطر متناسباً مع سعة ذبذبات الضغط pressure oscillation المصاحبة لعدم الاتزان. إذ يتراوح تأثيرها بين تراجع في مستوى أداء منظومة الاحتراق (نقاط موضعية عالية الحرارة، وانخفاض فعالية الاحتراق) وصولاً إلى حد إخفاق المجموعة بسبب التصدعات التي تحصل في بنيتها.

إن إزالة عدم الاتزان وإخماده في أنظمة الاحتراق تم تحقيقه من خلال التعديل في تصميم هذه الأنظمة [1-2]. وقد تضمنت هذه التعديلات تغييراً في دارة التزويد بالوقود (المضخات وخطوط التغذية ونماذج حقن الوقود وتوزيعه)، وتعديلات في تصميم حبر الاحتراق (تغيير في هندسة الحجرة وموضع اللهب وآلية ارتكازه)، كما تم استخدام مرنان هلمهولتز Helmholtz resonator، ووسائل امتصاص الصوت والفوهات، بالإضافة إلى الثقوب والعوارض [1-3]. وهذه الطرق كلها تندرج تحت ما يعرف بالتحكم السلبي passive control بذبذبات الضغط، غير أن استخدام تقنية التحكم السلبي ربما يؤثر في أداء النظام وهي غير فعالة في منظومات الاحتراق عالية الأداء بالإضافة إلى أن استخدامها يتم ضمن شروط محددة.

إذن، بسبب القيود المفروضة على استخدام تقنية التحكم السلبي فإن التقنيات المستخدمة حالياً لضبط عدم الاتزان في أنظمة الاحتراق تعتمد أسلوب التحكم الفعال. وقد ذكرت الأدبيات العلمية أنه تم تطبيق التحكم الفعال لضبط عدم الاتزان في أنظمة الاحتراق وأثبتت فعاليته في إخماد ذبذبات الضغط [4-7]. كما أظهرت هذه الأدبيات أن منظومة التحكم في معظم التطبيقات تتألف من: محول الضغط pressure transducer، ومرشح، ومغبر زاوية الطور phase shifter، ومضخم، ومنفذ. وغالباً ما يكون محول الضغط عبارة عن ميكروفون يتحسس ذبذبات الضغط، والمرشح المكوّن من بنايات متنوعة يستخدم لمنع مرور إشارات الضغط عند الترددات المختلفة باستثناء تلك الإشارات المرافقة للترددات التي تخلق عدم الاتزان، ومغبر الطور الذي يزود الإشارة المارة من المرشح بزوايا الطور اللازمة لاستقرارها، والمضخم الذي يعمل على تكبير الإشارة. أما المنفذ فقد كان في بعض الأبحاث عبارة عن مكبر صوت مهمته قيادة ذبذبات الضغط، وفي أبحاث أخرى كان المنفذ عبارة عن صفيحة مهمتها خنق الجريان من أجل الحفاظ على مستوى تدفق وسطي. وفي بعضها الآخر كان المنفذ عبارة عن جسم مركزي قابل للحركة متوضع عند مدخل الحارق ويهتز محورياً ليعدل الشروط الحدية الصوتية أعلى الجريان من خلال تغيير معدل الجريان الداخل. أيضاً في بعض الأبحاث تم حقن الوقود الثانوي بشكل غير مستقر قرب حامل اللهب ليؤثر في ذبذبات الضغط في الحارق غير المستقر [8-10].

أهمية البحث وأهدافه:

تأتي أهمية هذا البحث من أنه يعالج أحد أخطر المشكلات التي تواجهها أنظمة الاحتراق المستمر. مشكلة عدم الاتزان في عملية الاحتراق المصحوبة بذبذبات كبيرة في الضغط، والتي تقود إلى اهتزازات متزايدة ينتج عنها مستويات مرتفعة من الضجيج الصوتي ومعدلات احتراق عالية وربما انصهار بعض مكونات منظومة الاحتراق وبالتالي إخفاق

عملها. ولهذا تسعى المراكز البحثية المتخصصة لضبط هذه الدبذبات والسيطرة عليها من خلال تصميم المنظم بالاعتماد على نموذج رياضي يصف ديناميكية الحارق ويتجنب طريقة المحاولة والخطأ المعتمدة في غالبية الأبحاث السابقة. وبما أن هذا النموذج غير متاح حالياً فإن هدف هذا البحث هو الوصول إلى التصميم الأمثل للمنظم بناء على تابع التحويل التجريبي الذي تم تحديده بطريقة التوصيف Identification والذي يصف ديناميكية الحارق بدقة كبيرة. ولتحقيق ذلك تم تطبيق تقنية المنظم التربيعي الخطي (LQR) Linear quadratic regulator على تابع التحويل المستنتج تجريبياً.

طريقة البحث ومواده:

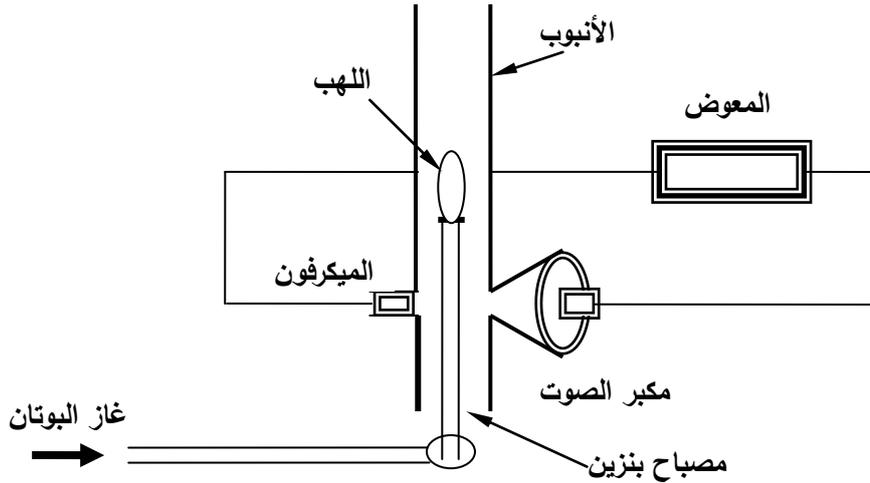
يبدأ البحث بتناول تقنيات التحكم المستخدمة في ضبط عدم الاتزان في عملية الاحتراق ومن ثم يقدم وصفاً مختصراً لمكونات منصة الاختبار التجريبية ويتطرق لعملية التوصيف التي تم من خلالها إيجاد نموذج رياضي بصورة تابع تحويل يصف ديناميكية الحارق بدقة عالية. وقد استخدم مولد إشارة ورأس إشارة بالإضافة إلى مكونات منظومة التحكم لإنجاز عملية التوصيف، وتم الوصول إلى المنظم ذي الأداء الأمثل من خلال استخدام طريقة LQR مع تابع التحويل المستنتج تجريبياً للحارق النموذجي.

منصة الاختبار:

تم بناء منظومة احتراق نموذجية خطية مسبقة الخلط تمكنا من دراسة عدم الاتزان الحاصل واستقصائه في أنظمة الاحتراق والتحكم به، وتتألف هذه المنظومة من:

1) أنبوب بطول 0.7 m وقطر 0.034 m يعمل بمنزلة حارق نموذجي خطي مسبق الخلط تحت الضغط الجوي. وهو مفتوح من الطرفين ويتوضع بشكل شاقولي وقد فُتح في جدار الأنبوب ثقبان متقابلان على بعد 0.05 m من مدخل الأنبوب إحداهما لتركيب محول الضغط (الميكروفون) والثاني لتركيب مكبر الصوت (المنفذ).

2) مصباح بنزين Benzene burner يعمل على غاز البوتان المنزلي، وقد تم تأمين استقرار اللهب من خلال شبكة معدنية مثبتة في أعلى سويقة المصباح، وتم تحديد معدل استهلاك الوقود من خلال مقياس تدفق. ويبين الشكل (1) المخطط التوضيحي لمنصة الاختبار.



الشكل (1): منصة الاختبار.

1. منظومة التحكم

تم تصميم منظومة التحكم بطريقة المحاولة والخطأ، وتم تطبيقها على الحارق النموذجي الموصوف سابقاً لإخماد ذبذبات الضغط الناتجة من عدم الاتزان في عملية الاحتراق، وتعتمد هذه المنظومة مبدأ تضاد الصوت Antisound، إذ إن الصوت الذي تنتجه طبلة مكبر الصوت يستخدم لإخماد ذبذبات الضغط المتنامية نتيجة للحرارة المنطلقة بشكل غير مستقر. وتتألف منظومة التحكم من محول الضغط (الميكروفون)، والمرشح، ومغير زاوية الطور، والمضخم، والمنفذ. وقد تم جمع المرشح ومغير زاوية الطور والمضخم في صندوق واحد وسميها المعوض compensator، وهو المسؤول عن تأمين الانزياح المطلوب في زاوية الطور للصيغة المسببة لعدم الاستقرار، لتصبح على تضاد مع الإشارة المسيطرة في الحارق. وأما مكبر الصوت فيستخدم بوصفه عنصر تنفيذ.

1.1. محول الضغط

إن الميكروفون المستخدم لتحسس ذبذبات الضغط هو من النوع المكثفي وقد تم تركيبه على بعد 5 cm من النهاية السفلية للأنبوب وذلك لتخفيف تأثير الحرارة فيه. وهذا الميكروفون ذو قطبية عالية؛ لذلك تم تغذيته بجهد مقداره 10 V عبر مقاومة مقدارها 1 kΩ وأخذ خرج الميكروفون عبر مكثف سعته 100 μF وذلك لحذف أي مركبة للتيار المستمر DC.

1.2. المنفذ

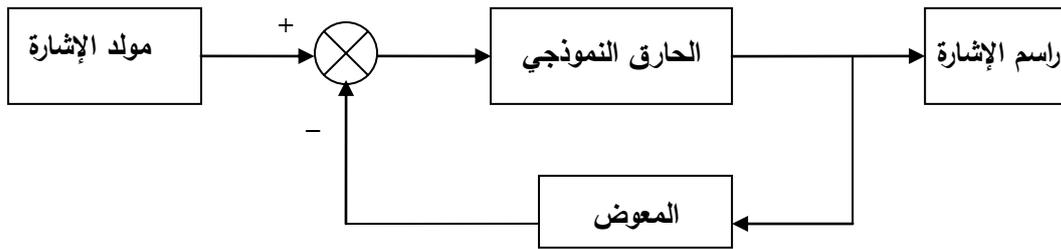
إن مكبر الصوت الذي تم استخدامه بوصفه منفذاً وضع بشكل متعاكس مع الميكروفون وهو ذو مقاومة صغيرة 8 Ω من أجل تأمين التيار اللازم لتحريك طبلة المكبر.

1.3. دائرة المعوض

تم تصميم دائرة المعوض بطريقة المحاولة والخطأ وذلك من خلال استخدام مولد إشارة ورسم إشارة. وتؤمن دائرة المعوض انزياحاً في زاوية الطور مقداره حوالي 180° ، وقد بُنيت هذه الدارة بحيث تمرر الصيغة المسؤولة عن عدم الاستقرار (هذه الصيغة هي الصيغة الأساسية والتي ترددها حوالي 307 Hz)، وتقطع كل التوافقيات ذات التردد الأعلى والأخفض. وهي تحتوي على مرشح مرور منخفض ومرشح مرور مرتفع ويشكل الاثنان معاً مرشحاً مجالياً يمرر الصيغة الأساسية فقط، بالإضافة إلى ذلك هنالك مضخمات عملية؛ لتؤمن الانزياح الطوري والتكبير المطلوب.

توصيف النظام:

لقد قمنا بإيجاد تابع تحويل الحارق تجريبياً بالاعتماد على تقنية التوصيف، التي تم انجازها في النطاق الترددي بعد أن قمنا بضبط الحارق، وإزالة عدم الاستقرار السائد فيه من خلال تطبيق منظومة التحكم الموصوفة سابقاً والمصممة بطريقة المحاولة والخطأ عليه. إذ تم تعريف الحارق المضبوط إلى سلسلة من الاضطرابات الجيبية المتعاقبة المعروفة التردد والمطال، والمأخوذة من مولد الإشارة، كما يوضح الشكل (2). أيضاً تم إجراء توصيف منفصل لدائرة المعوض لتحديد تابع تحويله. وقد تم إنجاز عملية التوصيف عند موضع للهب يقع على بعد 0.16 m من أسفل الأنبوب، وهذا الموضع موافق للمكان الذي يكون عنده مطال ذبذبة الضغط أعظم ما يمكن (بطن موجة الضغط).



الشكل (2): مخطط يوضح عملية التوصيف.

1. توصيف المعوض

تم توصيف المعوض بعد عزله عن نظام الدارة المغلقة؛ إذ تمت إثارته بإشارات جيبية مأخوذة من مولد الإشارة، وتم قياس مطال إشارتي الدخل والخرج بالإضافة إلى زاوية طور إشارة الخرج بالنسبة إلى إشارة الدخل من خلال رسم الإشارة. ومن ثم تم تحديد تابع تحويل المعوض بالاعتماد على الاستجابة الترددية الموضحة في الشكل (3). وقد توصلنا إلى العلاقة الرياضية الواصفة للمنحني الممثل للبيانات التجريبية المستحصلة من عملية التوصيف باستخدام برنامج Matlab حيث قمنا بكتابة برنامج لإيجاد هذه العلاقة. ويشير كثير الحدود المستحصل إلى أن تابع تحويل المعوض من الدرجة السابعة:

$$G_c = k_c \frac{n_c(s)}{d_c(s)} \quad (1)$$

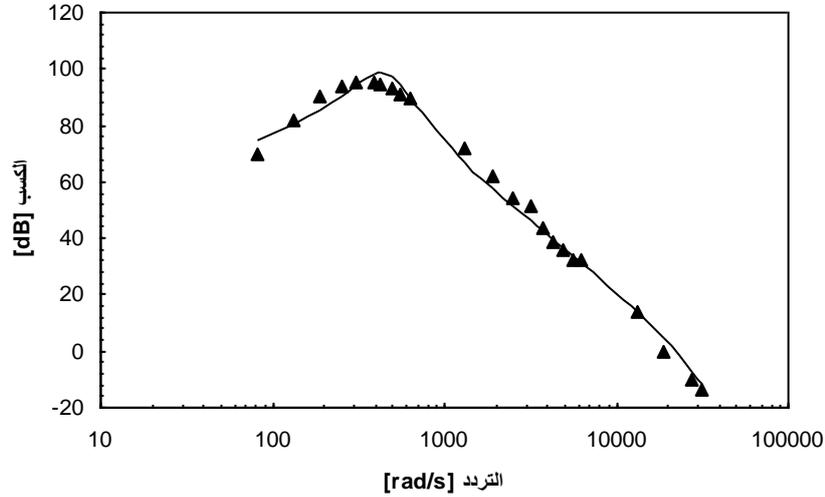
حيث:

k_c يمثل كسب المعوض، و $n_c(s)$ كثير الحدود في بسط تابع تحويل المنظم، و $d_c(s)$ كثير الحدود في مقام تابع تحويل المنظم.

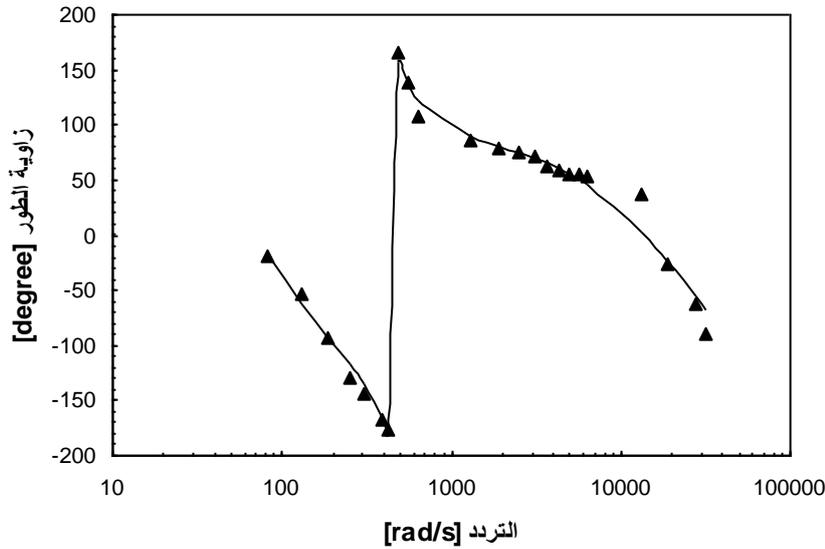
$$k_c = 6.6987 \times 10^8$$

$$n_c(s) = (s + 539.72)(s - 60.6)(s - 25315)(s - 30.98)(s - 19.8)$$

$$d_c(s) = (s + 20687)(s + 37.3)(s + 25958)(s + 186.64)(s + 0.019)(s^2 + 329.68s + 2.1056 \times 10^5)$$



(a)

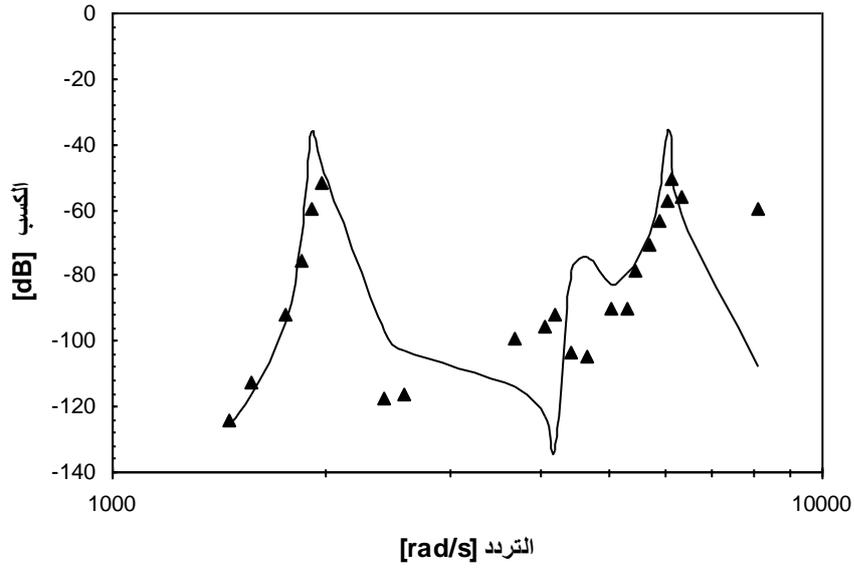


(b)

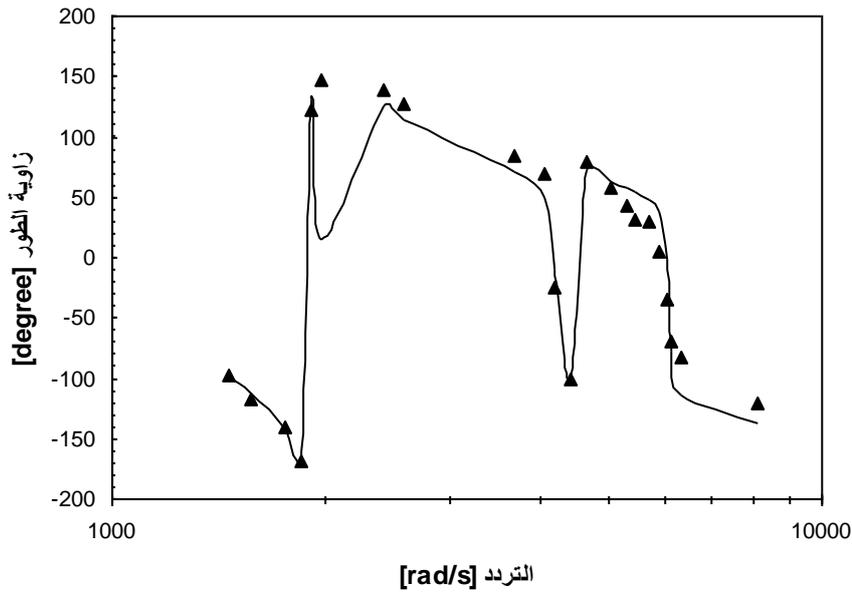
الشكل (3): الاستجابة الترددية للمعوض (a) الكسب (b) زاوية الطور.

2. توصيف الحارق

لكي نتمكن من تحديد تابع تحويل الدارة المفتوحة للحارق قمنا في البداية بتحويله إلى نظام مستقر، ومن ثم قمنا بقياس استجابته الناتجة عن سلسلة من الإشارات الجيبية المأخوذة من مولد الإشارة. حيث تم قياس مطال إشارتي الدخل والخرج بالإضافة إلى زاوية طور إشارة الخرج بالنسبة إلى إشارة الدخل من خلال راسم الإشارة. ويبين الشكل (4) الاستجابة الترددية للحارق المستقر (النظام). الآن، بما أن كل من تابع تحويل المعوض وتابع تحويل الدارة



(a)



(b)

الشكل (4): الاستجابة الترددية للحارق المستقر (دائرة مغلقة) (a) الكسب (b) زاوية الطور.

المغلقة (تابع تحويل الحارق المستقر) أصبح معروفاً فإن تابع تحويل الحارق (ميكروفون+حارق+مكبر صوت) يمكن إيجاداه بسهولة من خلال معالجة المخطط الصندوقي للنظام. إذ إن تابع تحويل النظام المستقر (الدائرة المغلقة) هو:

$$G(s) = \frac{G_p(s)}{1 + G_p(s)G_c(s)} \quad (2)$$

حيث أن:

$G(s)$ تابع تحويل الدائرة المغلقة و $G_p(s)$ تابع تحويل الحارق و $G_c(s)$ تابع تحويل المعوض.

يمكننا إيجاد تابع تحويل الحارق من المعادلة (2) كما يلي:

$$G_p(s) = \frac{G(s)}{1 - G(s)G_c(s)} \quad (3)$$

وبالتالي يمكننا استخدام العلاقة (3) لإيجاد المطال وزاوية الطور للحارق في المجال نفسه من الترددات (0.1-2) kHz. وتمتاز هذه الطريقة لإيجاد الاستجابة الترددية للحارق بميزتين أساسيتين بالمقارنة مع طريقة إيجاد علاقة المنحني الممثل لبيانات الحارق المستقر مباشرة؛ الميزة الأولى هي تخفيض درجة تابع التحويل بشكل كبير، وهذا يجعل علاقة المنحني الممثل للبيانات أبسط، والميزة الثانية هي تحاشي الخطأ في تحديد الجذور بسبب ضخامة كثير الحدود المعالج. ويبين الشكل (4) الاستجابة الترددية للحارق لوحده (الدارة المفتوحة). لذا يكون تابع تحويل الحارق هو:

$$G_p = k_p \frac{n_p(s)}{d_p(s)} \quad (4)$$

حيث إن:

k_p يمثل كسب الحارق، و $n_p(s)$ كثير الحدود في بسط تابع تحويل الحارق، و $d_p(s)$ كثير الحدود في مقام تابع تحويل الحارق.

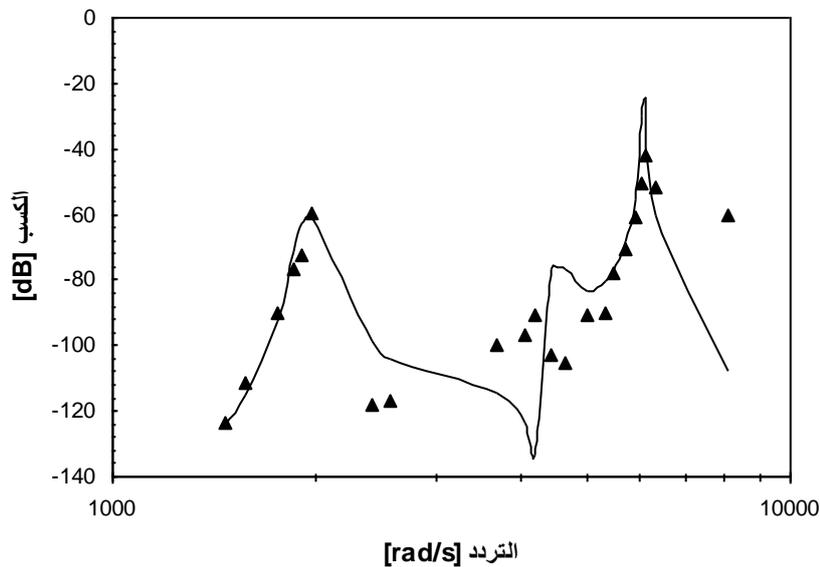
$$k_p = 1.35 \times 10^5$$

$$n_p(s) = (s^2 - 1676s + 1.5416 \times 10^6)(s^2 - 696.84s + 3.856 \times 10^6)$$

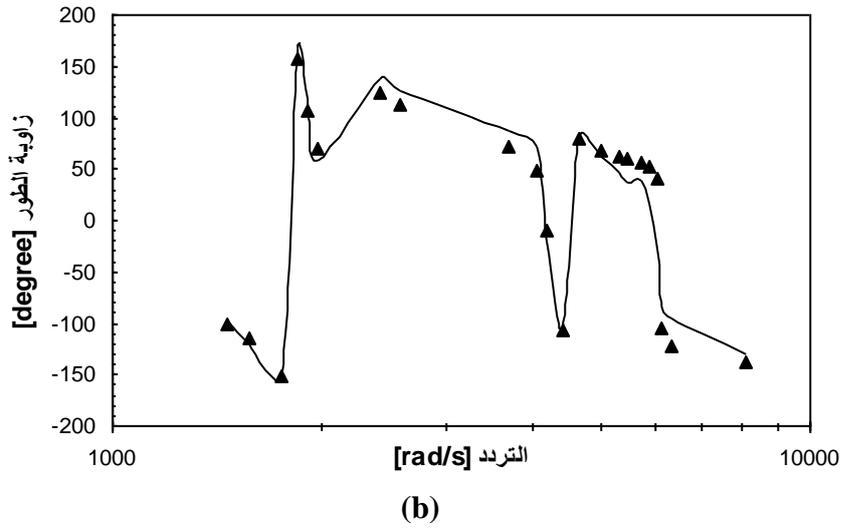
$$(s + 939.95)(s^2 - 125.13s + 1.7662 \times 10^6)$$

$$d_p(s) = (s + 4634.2)(s^2 + 137.88s + 3.5504 \times 10^6)(s^2 + 28.22s + 2.0185 \times 10^7)$$

$$(s^2 - 88.918s + 4.2349 \times 10^6)(s^2 - 0.2291s + 3.7069 \times 10^7)$$

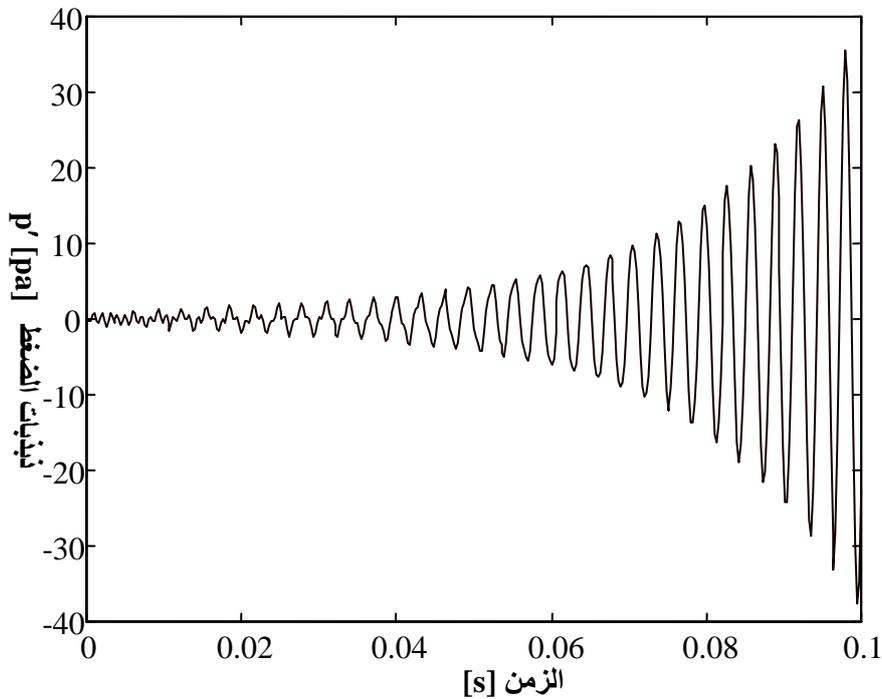


(a)



الشكل (5): الاستجابة الترددية للحارق لوحده (دائرة مفتوحة) (a) الكسب (b) زاوية الطور.

تمتلك الأقطاب العقدية لتابع التحويل جزءاً حقيقياً يمثل سرعة نمو ذبذبات الضغط، وجزءاً تخيلياً يمثل التردد المصاحب لسرعة النمو. ولدى دراسة أقطاب تابع التحويل في المعادلة (4) يمكن أن نلاحظ أن هنالك أربعة أقطاب غير مستقرة وهي موافقة لصيغتين؛ الصيغة الأساسية والتي يمثلها القطب ذو التردد 307 Hz وسرعة النمو 44 s^{-1} وهي المسيطرة والمسؤولة عن عدم استقرار الحارق، والتوافقية الثانية (الصيغة الثانية) ذات التردد 969.5 Hz غير مستقرة ولكن سرعة نموها صغيرة جداً بالمقارنة مع الصيغة الأساسية. يبين الشكل (6) الاستجابة العابرة للحارق غير المضبوط.



الشكل (6): الاستجابة العابرة للحارق غير المضبوط (نمو ذبذبات الضغط).

التصميم الأمثل للمعوض:

يمكننا الآن بعد الحصول على تابع تحويل الحارق النموذجي تجريبيا تصميم المنظم ذي الأداء الأمثل بالاعتماد على تقنية المنظم التريبيعي الخطي LQR، إذ تمكننا هذه الطريقة من وضع أقطاب الدارة المغلقة كلها في المكان المرغوب فيه وذلك من خلال تخمين المتحولات غير المقاسة بناء على تلك المقاسة وكذلك اعتماد تابع الكلفة الأفضل optimum cost function الذي يمثل تابعاً تريبيعياً لكل من متحولات النظام ودخل التحكم، ولمزيد من التفاصيل يمكن العودة إلى المرجع رقم [11-12]. وقد حددنا المتطلبات التصميمية باستقرار الحارق وتصغير كل من زمن الاستقرار وجهد التحكم، حيث إن جهد التحكم للمنظم الأمثل هو خرج المنفذ أو تسارع طبلة مكبر الصوت. باستخدام ملحق التحكم الموجود في برنامج Matlab والخاص بتقنية LQR يمكننا إيجاد تابع تحويل المعوض ليكون من الشكل:

$$G_l = k_l \frac{n_l(s)}{d_l(s)} \quad (4)$$

حيث:

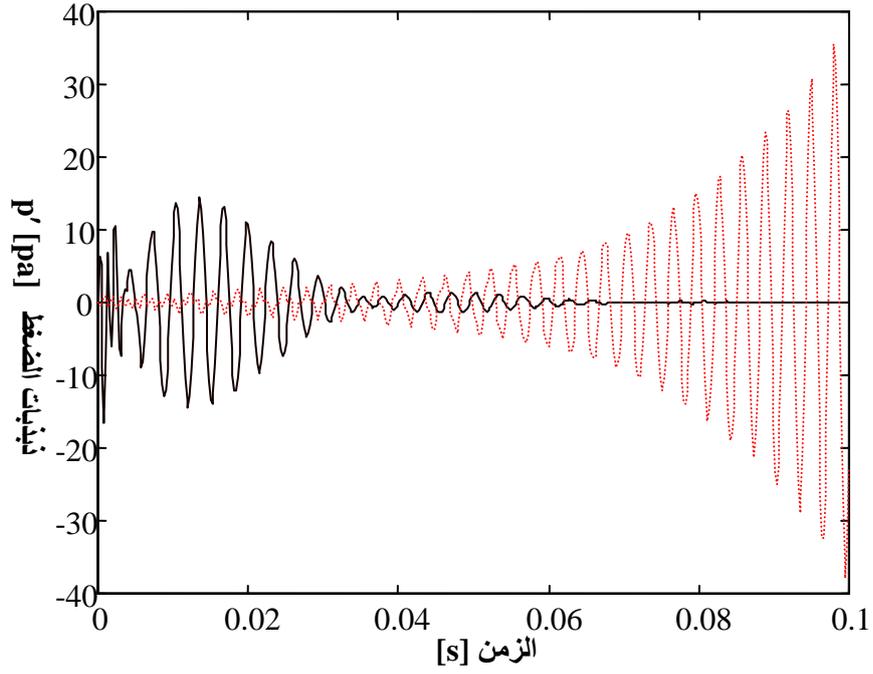
k_l يمثل كسب المعوض الأمثل ويساوي الواحد هنا، و $n_l(s)$ كثير الحدود في بسط تابع تحويل المعوض الأمثل، و $d_l(s)$ كثير الحدود في مقام تابع المعوض الأمثل.

$$n_l(s) = (s + 2.4625)(s + 0.4748)(s - 5.1837)(s - 0.1594) \\ (s^2 + 0.074s + 1.0062)(s^2 + 0.08s + 7.3462)$$

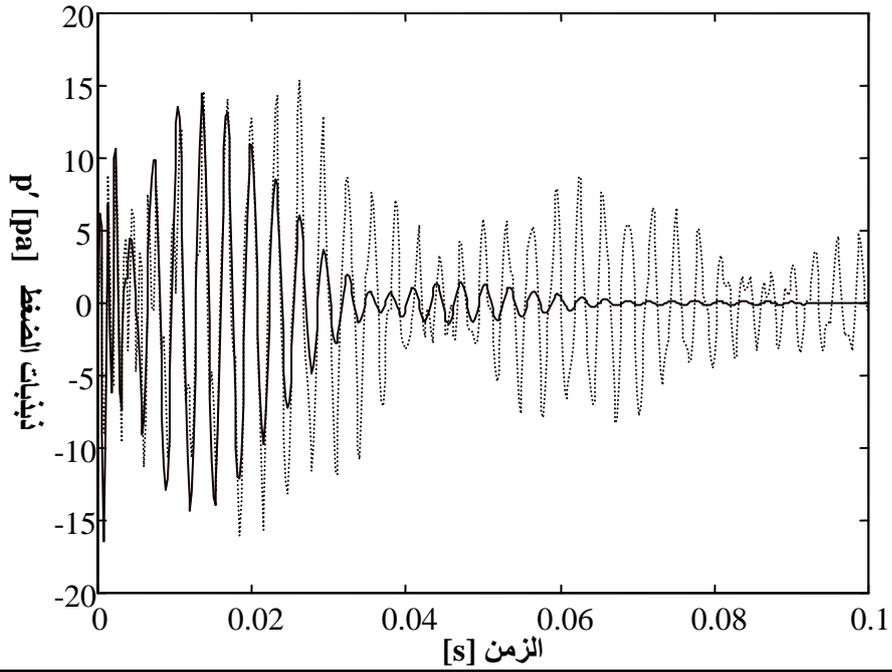
$$d_l(s) = (s + 12.9919)(s + 10.2028)(s + 0.9625)(s + 0.2116) \\ (s^2 + 0.0544s + 4.9549)(s^2 + 0.3434s + 1.0836)$$

وبين الشكل (7) الاستجابة العابرة للحارق المضبوط بواسطة المعوض ذي التصميم الأمثل مع استجابته غير المضبوطة؛ إذ نلاحظ من الشكل أن هذا المعوض يستطيع إخماد ذبذبات الضغط خلال زمن مقداره حوالي 40 ms

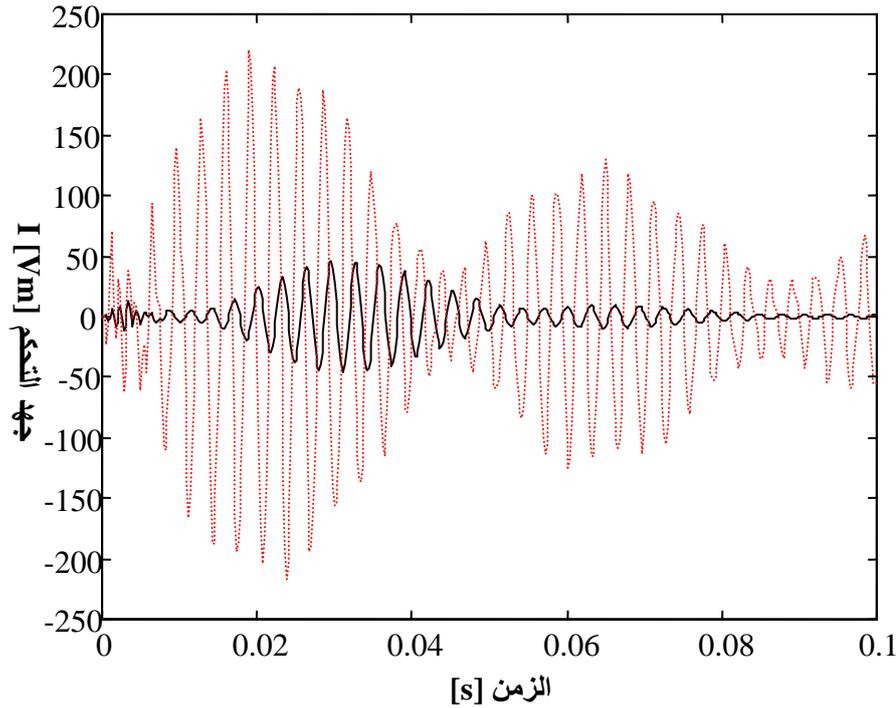
بينما يحتاج المعوض المصمم بطريقة المحاولة والخطأ إلى حوالي 100 ms للقيام بذلك كما هو موضح في الشكل (8) الذي يبين استجابة الحارق المضبوط بواسطة المنظم المبني بطريقة المحاولة والخطأ واستجابة الحارق المضبوط بواسطة المعوض ذي التصميم الأمثل. أيضاً، يبين الشكل (9) أن جهد التحكم لهذا المعوض أقل بنسبة 75 % من الجهد الذي يحتاجه المعوض المصمم بطريقة المحاولة والخطأ.



الشكل (7): الاستجابة العابرة للحارق؛ --- غير المضبوط، — المضبوط بواسطة المعوض الأمثل.



الشكل (8): الاستجابة العابرة للحارق؛ — المضبوط بواسطة المعوض الأمثل، --- المضبوط بواسطة المعوض المبني بطريقة المحاولة والخطأ.



الشكل (9): جهد التحكم؛ — للمعوض ذو التصميم الأمثل، --- للمعوض المبني بطريقة المحاولة والخطأ.

الاستنتاجات والتوصيات:

في هذا البحث تم إيجاد تابع تحويل الحارق النموذجي تجريبياً بطريقة التوصيف بسبب عدم توفر نموذج رياضي يصف ديناميكية عدم اتزان عملية الاحتراق بشكل دقيق. وقد أظهرت أقطاب تابع التحويل المستنتج أن الصيغة المسيطرة والمسؤولة عن عدم استقرار الحارق هي الصيغة الأساسية ذات التردد 307 Hz وسرعة النمو 44 s^{-1} واعتماداً على تابع التحويل المستنتج تم تصميم المنظم بطريقة LQR للحصول على الأداء الأمثل للنظام وقد تبين أن هذا المنظم يستطيع إزالة عدم الاستقرار خلال زمن مقداره حوالي 40 ms بالمقارنة مع زمن مقداره 100 ms للمنظم المبني بطريقة المحاولة والخطأ كما أن جهد التحكم أقل بنسبة 75% .

تعد منظومة التحكم التي تم التوصل إليها خطوة متقدمة على طريق معالجة عدم اتزان الاحتراق وإخماد ذبذبات الضغط الناتجة عنه، كما ويمكن تطبيق هذه المنظومة على أنظمة احتراق عملية وذات حجوم متنوعة وذلك بعد تحسين مواصفات كل من الميكروفون ومكبر صوت ليتناسباً وحجوم تلك الأنظمة.

المراجع:

- 1- PUTNAM, A. A., ; DENNIS, W. R. *Survey of Organ-Pipe Oscillations in Combustion Systems*. The Journal of the Acoustical Society of America. Vol.28, No.2. 1956, 246-259.
2. PUTNAM, A. A. *Combustion Driven Oscillations in Industry*. American Elsevier Publishing Company, New York, 215, 1971.
- 3- COLLYER, A. A., ; AYRES, D.J. *The Generation of Sound in a Rijke Tube Using Two Coils*. J. Phys., Vol.5. 1972, 73-75.
- 4- BLOXSIDGE, G. J., DOWLING, A. P., ; LANGHORNE, P. J. *Reheat Buzz: an Acoustically Coupled Combustion Instability*. Part2. Theory. J. Fluid Mech., vol. 193, 1987, 445-473.
- 5- BLOXSIDGE, G. J., DOWLING, A. P., HOOPER, N., ; LANGHORNE, P. J.. *Active Control of an Acoustically Driven Combustion Instability*. Journal of Theoretical and Applied Mechanics. Special issue, supplement to Vol.6, 1987, 161-175.
- 6- BROUWER, J., AULT, B. A., BOBROW, J. E., ; SAMUELSEN, G. S. *Active Control for Gas Turbine Combustors*. In Twenty-third Symposium (International) on Combustion, Pittsburgh, PA, The Combustion Institute, 1990.
- 7- JOHNSON, C. E., NEUMEIER, Y. LUBARSKY, E. LEE, J. Y. NEUMAIER, M.; Zinn, B. T. *Suppression of combustion instabilities in a liquid fuel combustor using a fast adaptive control algorithm*, AIAA-20002-476
- 8- BILLOUD, G., HUYNH, C., GALLAND, M., ; CANDEL, S. M. *adaptive Active control of combustion instabilities*. Comb. Sci. and Tech., 81:1991, 257-283.
- 9- BLOXSIDGE, G. J., DOWLING, A. P., HOOPER, N., LANGHORNE, P. J. *Active Control of Reheat Buzz*. AIAA Journal, vol. 26, No.7, July. 1989, 783-790.
- 10- DOWLING, A. P. AND MORGANS A. S. *Feedback control of combustion oscillations*. Annual Revenue of Fluid Mechanics, 37, 2005, 151-182.
- 11- LEWIS, F. L. *Applied Optimal Control and Estimation*. Prentice-Hall, INC, 656, 1992.
- 12- ANDERSON B. D. O. ; MOORE, J. B. *Optimal control: Linear Quadratic Methods*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N. J., 380, 1990.