



كلية الهندسة - جامعة بغداد

Association of Arab Universities Journal of Engineering Sciences

مجلة اتحاد الجامعات العربية للدراسات والبحوث الهندسية

جامعة كليات الهندسة
اعضاء اتحاد الجامعات العربية

تحسين خوارزمية التحكم الانزلاقي ذو النموذج الحر للتحكم بالأنظمة اللاخطية

حسناة أكرم وسوف^{1*} ، جمانا دياب²

¹ قسم هندسة التحكم الآلي والحواسيب، كلية الهندسة الكهربائية والميكانيكية، جامعة البعث، سوريا ، ggomanad@gmail.com

²⁻¹ قسم الهندسة الطبية، جامعة الأندلس، القدموس، طرطوس، سوريا

²⁻² قسم الهندسة الطبية، كلية الهندسة الكهربائية والميكانيكية، جامعة البعث، حمص، سوريا

*الباحث الممثل: حسناة وسوف، hasnaa.wasouf@gmail.com

نشر في: 31 كانون الأول 2020

الخلاصة: عند اختبار أداء خوارزمية التحكم الانزلاقي ذو النموذج الحر تبين أنها لا تستطيع المحافظة على الأداء الجيد عند تعرض النظام للضجيج. يقترح هذا البحث تصميم خوارزمية التحكم الانزلاقي ذو النموذج الحر المقاومة للضجيج. تكمن أهمية هذه البنية أنها تأخذ بعين الاعتبار الضجيج الذي يتعرض له النظام حيث تم إدخال قيمة الضجيج إلى خوارزمية النموذج الحر. وتم تصميم سطح الانزلاق للتحكم بالاعتماد على العلاقة المعدلة وإيجاد إشارة التحكم بالاعتماد على نظرية ليابونوف المباشرة بهدف ضمان استقرار الحلقة المغلقة للنظام. ولتقليل اثار الاهتزازات الموجودة في إشارة التحكم تم إعادة تشكيل قانون التحكم باستخدام طبقة من الحدود. تم إجراء المحاكاة لنظام لاخطي من الدرجة ثانية حيث أظهرت نتائج المحاكاة قدرة النظام على تتبع الإشارة المرغوبة رغم الضجيج الذي يتعرض له النظام بالإضافة إلى قدرتها على المحافظة على استقرار النظام الذي تتحكم به.

الكلمات الرئيسية: التحكم الانزلاقي، النموذج الحر، النموذج الحر المطور، ليابونوف.

1. المقدمة:

يوضح الشكل 1 آلية عمل المتحكم الانزلاقي حيث يقوم في البداية بتحويل مسارات الحالة للنظام إلى سطح الانزلاق وبعد ذلك يجبرها بالانزلاق على سطح الانزلاق باتجاه وضع التوازن.

إن أهم المشاكل التي تواجهنا عند استخدام التحكم الانزلاقي أننا نحتاج معرفة النموذج الرياضي للنظام وبالتالي لا يمكننا تحكم بأي نظام دون معرفة نموذجيه وهذا يعني أننا بحاجة لإيجاد إشارة التحكم لكل نظام نريد التحكم به وتكون علاقة المتحكم خاصة بهذا النظام لكن مع وجود خوارزمية النموذج الحر تمكّننا من إيجاد قانون تحكم انزلاقي عام غير معتمد على نموذج الرياضي لنظام وإنما يحتاج معرفة درجة هذا النظام فقط.

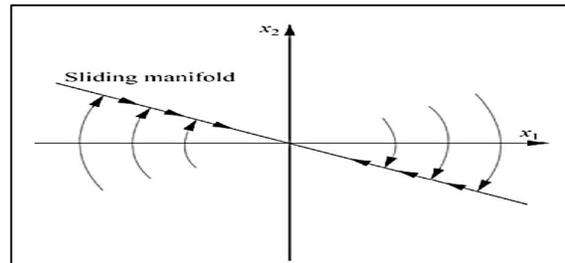
أثناء اختبار قانون التحكم الانزلاقي ذو النموذج الحر تبين أنه غير متين ضد الضجيج الذي يتعرض له النظام حيث تبين عدم قدرة النظام على المحافظة على المسار المطلوب عند وجود الضجيج لذلك قمنا بتعديل هذا القانون بحيث نحصل على بنية تحكمية أكثر متانة.

أثناء اختبار أداء الخوارزمية المطورة أظهرت نتائج المحاكاة قدرة النظام على تتبع الإشارة المرغوبة رغم وجود الضجيج ولكن مع وجود اهتزازات في إشارة التحكم لذلك تم إجراء تعديل على علاقة المتحكم عن طريق إدخال طبقة من الحدود بهدف تقليل هذه الاهتزازات.

2. الدراسات السابقة:

تقوم الفقرتان التاليتان بعرض الأبحاث التي تستخدم تقنيات التحكم الانزلاقي. تركز الفقرة الأولى على الأبحاث التي تعتمد على نموذج النظام لاستنتاج إشارة التحكم أما الفقرة الثانية فتركز على أبحاث التحكم الانزلاقي ذو النموذج الحر.

خلال السنوات القليلة الماضية نالت المتحكمات التي تعتمد على طريقة ليابونوف الكثير من الاهتمام؛ وذلك بسبب متانة هذه المتحكمات وقدرتها على التحكم بالأنظمة بالإضافة لقدرتها على المحافظة على استقرار الحلقة المغلقة لهذه الأنظمة. يعتبر المتحكم الانزلاقي إحدى هذه المتحكمات التي تعتمد على طريقة ليابونوف المباشرة من أجل ضمان استقرار الحلقة المغلقة للنظام خلال طور الوصول. إن سبب تسمية التحكم الانزلاقي (sliding mode control) بهذا الاسم وذلك لأن إشارة التحكم تجبر مسارات الحالة للنظام بالانزلاق على سطح محدد يدعى سطح الانزلاق (sliding surface). يتضمن التحكم الانزلاقي المرور في طورين هما طور الوصول وطور الانزلاق حيث خلال طور الوصول توجه مسارات الحالة للنظام من أي نقطة في فضاء الحالة إلى سطح الانزلاق والبقاء عليه أما طور الانزلاق فيكون مسؤول عن انزلاق مسارات الحالة للنظام على سطح الانزلاق باتجاه وضع التوازن [10].



الشكل 1: التحكم الانزلاقي

أظهرت نتائج الاختبار قدرة النظام على الوصول إلى وضع التوازن خلال الوقت المحدد وضمان عدم وصول إشارة التحكم إلى حدود الإشباع [3].

وفي عام 2014 قام الباحثون Z. Kai, W. Xingcheng, and J. Yi بعرض مشكلة تصميم سطح الانزلاق ودراسة تأثير تصميمه على أداء المتحكم الانزلاقي حيث تم تصميم سطح الانزلاق بطريقة جديدة وذلك من أجل الأنظمة اللاخطية متعددة المداخل ومتعددة المخارج حيث تتميز هذه الأنظمة أنها تحتوي على بارامترات بنيتها غير معروفة ولكن حدودها معروفة وأيضاً تحتوي بارامترات قيمتها معلومة لكن بنيتها غير معروفة.

تعتمد طريقة التصميم الجديدة على إدخال هذه البارامترات إلى علاقة سطح الانزلاق وتم اختبار هذه الطريقة على نظام من درجة الثانية بحيث استخدم شرطين ابتدائيين مختلفين وفي كلا الحالتين وصلت متغيرات الحالة إلى الصفر رغم وجود هذه البارامترات [15].

2.2 التحكم الانزلاقي ذو النموذج الحر:

أول بحث تناول موضوع التحكم الانزلاقي ذو النموذج الحر نفذ في عام 2015 من قبل الباحث A. Mizov تم فيه اشتقاق قانون التحكم الانزلاقي ذو النموذج الحر واستخدامه للتحكم بالأنظمة الخطية والأنظمة اللاخطية. لإيجاد قانون التحكم لا نحتاج معرفة النموذج الرياضي للنظام وإنما نحتاج معرفة درجة النظام ودخل التحكم السابق. من أجل التخلص من آثار الاهتزازات الموجودة في إشارة التحكم تم تضمين طبقة من الحدود إلى علاقة المتحكم.

أظهرت نتائج الاختبار قدرة النظام على إعطاء تتبع جيد للإشارة المرغوبة [2].

وفي عام 2016 نفذ الباحث R. M. Reis بحثاً عرض من خلاله بنية جديدة للمتحكم الانزلاقي ذو النموذج الحر حيث تم إضافة حد جديد إلى علاقة النموذج الحر هذا الحد هو خطأ دخل التحكم. وبالاعتماد على نظرية ليابونوف المباشرة تم تحديد ربح التبديل الذي نحتاجه من أجل قيادة متغيرات الحالة إلى سطح الانزلاق. تم دراسة العلاقة الجديدة في حالتين الأولى عندما يكون ربح المتحكم واحد والثانية عندما يكون الربح لايساوي الواحد.

جرى اختبار قدرة المتحكم على التحكم بنظام خطي ونظام اخر لاخطي وفي كلتا الحالتين أظهرت نتائج المحاكاة قدرة الإشارة الفعلية على تتبع الإشارة المرغوبة [12].

قام الباحث F. E. Tim في عام 2017 بتعديل البنية الجديدة للمتكم الانزلاقي ذو النموذج الحر بحيث يمكن استخدامها من أجل التحكم بالأنظمة متعددة المداخل ومتعددة المخارج. تحتاج هذه الطريقة تضمين الخطأ بين دخل التحكم الحالي ودخل التحكم السابق ولا تحتاج معلومات عن نموذج النظام الرياضي وإنما فقط معرفة درجة النظام.

تم اختبار قدرة هذه التقنية على التحكم بالأنظمة الخطية والأنظمة اللاخطية وأظهرت نتائج المحاكاة قدرة النظام على إعطاء الاستجابة المطلوبة [7].

وفي عام 2018 نفذ الباحثان E. Schulken, and A. Crassidis بحثاً يهدف إلى إجراء مقارنة بين الأداء الذي يقدمه متحكم PID وأداء المتحكم الانزلاقي ذو النموذج الحر. استخدم المتحكمان من أجل التحكم بطائرة رباعية حيث أظهرت نتائج المحاكاة قدرة المتحكم الانزلاقي ذو النموذج الحر على إعطاء أداء مشابه لأداء متحكم PID ولكن دون الغناء الموجود في توليف بارامترات المتحكم PID [6].

وفي عام 2019 أجرى الباحث A. R. K. Sreera بحثاً تم في هذا البحث تطوير خوارزمية التحكم الانزلاقي ذو النموذج الحر وتعميمها من أجل جميع أصناف أنظمة الطائرات دون طيار. تم إجراء اختبار طيران حقيقي ومقارنة الأداء الذي يقدمه المتحكم الانزلاقي ذو النموذج الحر مع أداء المتحكم التقليدي حيث أظهرت النتائج قدرة المتحكم الانزلاقي ذو النموذج

2.1 الدراسات المرجعية في التحكم الانزلاقي:

توجد العديد من الدراسات التي تناوت موضوع التحكم الانزلاقي سنذكر بعض منها:

قام الباحثون S. Laghrouche, F. Plestan and A. Glumineau في عام 2003 بنشر بحث تم فيه تصميم متحكم انزلاقي ذات درجة عالية وذلك من أجل الأنظمة اللاخطية أصغرية الطور. ناقش البحث العديد من المشاكل منها مشكلة الاهتزاز الموجودة في التحكم الانزلاقي حيث تم التغلب على هذه المشكلة باستخدام متحكم انزلاقي ذات درجة عالية وأيضاً تم التغلب على المشاكل التي تسببها البارامترات اللاخطية غير المؤكدة الموجودة في النظام وذلك عن طريق اعتبارها بارامترات محدودة وهكذا نستطيع اعتبار النظام اللاخطي وكأنه نظام خطي غير مؤكد. تم أيضاً في هذا البحث تصميم متحكم انزلاقي مثالي وذلك عن طريق تصميم سطح الانزلاق الذي يضمن أن تقل دالة الإنجاز خلال وقت محدد.

تم اختبار أداء المتحكم من أجل التحكم بنموذج بسيط للسيارة حيث استخدم متحكم انزلاقي من درجة الرابعة ذو ربح تبديل متغير. أعطى نظام التحكم أداء ممتاز وأفضل تتبع للإشارة المرغوبة دون وجود اهتزازات في إشارة التحكم [14].

وفي نفس العام قام الباحثون J. P. V. S. Cunha, H. Liu, R. R. Costa, and F. Lizarralde بتطوير أدوات التحكم الانزلاقي بهدف حل مشكلة تتبع الخرج وذلك في الأنظمة الخطية متعددة المتغيرات الغير مؤكدة حيث استخدم متحكم انزلاقي ذو نموذج مرجعي.

أظهرت نتائج البحث أن نظام الحلقة المغلقة مستقر وأداء النظام غير متأثر باضطرابات الدخل المحدودة والبارامترات غير المؤكدة [11].

وفي عام 2006 قام الباحثان H. YU, and U. Ozguner بإيجاد طريقة جديدة لتصميم سطح الانزلاق عرفت باسم المتحكم الانزلاقي التكيفي حيث يتم السعي للوصول إلى سطح الانزلاق بشكل تكيفي وهذه الطريقة خاصة بالأنظمة اللاخطية. ناقش البحث مشكلة الريح العالي للتغذية العكسية حيث تزداد هذه المشكلة عند تعرض النظام للاضطرابات وكذلك عندما يحتوي على بارامترات غير مؤكدة حيث تم حل هذه المشكلة عن طريق تطبيق ربح عائم تتغير قيمته بشكل تكيفي.

تم تطبيق طريقة التحكم الجديدة من أجل التحكم بسرعة المركبات على الطرق الوعرة وقد أظهرت نتائج المحاكاة قدرة النظام على تتبع السرعة المرجعية مع وجود القليل من الأخطاء [8].

وفي عام 2003 نفذ الباحثان S. H. Lee, and C. C. Chung بحثاً باستخدام التحكم الانزلاقي المتقطع زمنياً حيث تم استخدام أخذ عينات في الخرج. قام الباحثان في هذا البحث بتحديد القيم الذاتية لنظام الحلقة المغلقة بشكل اعتباطي وركزا خلال تصميم المتحكم على استقرار النظام وعلى الاستجابة العابرة وبهدف تقليل الاهتزازات الموجودة في إشارة التحكم قام الباحثان بتضمين طبقة من الحدود إلى قانون المتحكم.

أظهرت نتائج اختبار أداء المتحكم الانزلاقي المتقطع زمنياً قدرة النظام على إعطاء الإستجابة المطلوبة [13].

نفذ الباحثان A. Ferrara and M. Rubagotti في عام 2008 بحثاً تحدث عن مشكلة استخدام التحكم الانزلاقي عند وجود مشغلات مشبعة في النظام حيث تم التغلب على هذه المشكلة عن طريق استخدام متحكم أمثلي بشكل جزئي.

إن وجود مشغلات مشبعة في النظام يجعل توجيه متغيرات الانزلاق باتجاه وضع التوازن غير مضمون دائماً لذلك عند وصول إشارة التحكم إلى إحدى قيم الإشباع يتم إجبارها بشكل قسري لتتناقص على التوالي وخلال هذه العملية إذا كانت قيمة التبديل لم تصل إلى القيمة المطلوبة عندها تعود إشارة التحكم لزيادة من جديد.

7. النموذج الحر المطور:

تم إجراء تعديل على العلاقة السابقة بحيث تم إضافة الضجيج الذي يتعرض إليه النظام على العلاقة فتصبح على الشكل التالي:

$$\dot{x}^n \approx x^n + u - u_{k-1} + d \quad (4)$$

حيث أن d تعبر عن الضجيج الذي يتعرض له النظام حيث يفترض أن تكون حدود هذا الضجيج معروفة.

7.1 استنتاج إشارة التحكم:

نوجد المعادلة التي تعبر عن مشتق سطح الانزلاق ونساوي المعادلة الناتجة للصفر، وبعد ذلك نقوم بتعويض معادلة النظام التقريبية في علاقة مشتق سطح الانزلاق، ومن المعادلة الناتجة نقوم بإيجاد إشارة التحكم فنحصل على العلاقة التالية:

$$\dot{u} = -e^n - \lambda e^{n-1} + u_{k-1} - d \quad (5)$$

إن إشارة التحكم السابقة تقدم أفضل أداء وذلك عندما يكون نموذج النظام مطابقاً للنموذج التقريبي الموضوع ولكن بما أن النظام يحتوي على بارامترات غير مؤكدة فإن جزءاً يجب أن يضاف إلى إشارة التحكم لكي تتمكن من قيادة متغيرات الحالة نحو سطح الانزلاق على الرغم من وجود هذه البارامترات فنحصل على إشارة التحكم المعرفة بالعلاقة التالية:

$$u = -e^n - \lambda e^{n-1} + u_{k-1} - d - \varepsilon Sgn(s) \quad (6)$$

حيث أن ε عبارة عن ثابت موجب يدعى ربح التبديل وتابع $Sgn(s)$ هو تابع سيغموي أو تابع التأخير الذي يعرف على الشكل التالي:

$$Sgn(s) = 1 \quad \text{if } s > 0 \quad (7)$$

$$Sgn(s) = -1 \quad \text{if } s < 0 \quad (8)$$

نلاحظ من العلاقة السابقة أن جميع القيم معلومة ما عدا قيمة الضجيج وبالتالي إشارة التحكم السابقة لا يمكننا استخدامها للتحكم، لحل هذه المشكلة سوف نقوم باستبدال الضجيج الموجود في العلاقة السابقة بقيمة يمكننا معرفتها عن طريق معرفة الحد الأدنى والحد الأعلى للضجيج فتصبح العلاقة على الشكل التالي:

$$u = -e^n - \lambda e^{n-1} + u_{k-1} - d_n - \varepsilon Sgn(s) \quad (9)$$

7.2 إيجاد قيمة d_n :

يتم إيجاد قيمته بحيث نضمن الاستقرار حسب طريقة ليابونوف المباشرة، حيث تنص هذه الطريقة على مايلي: يكون النظام الذي يمتلك وضع توازن صفري مستقراً إذا وجد تابع وحيد القيمة $v(x)$ موجب التحديد وكان مشتقه $\dot{v}(x)$ سالب التحديد [9]. في معظم الأحيان يعطى تابع ليابونوف بالعلاقة التالية:

$$v(x) = \frac{1}{2} S^2 > 0 \quad (10)$$

نلاحظ أن التابع السابق هو موجب التحديد وهذا يحقق أول شرط. يعطى مشتق تابع ليابونوف بالعلاقة التالية:

$$\dot{v}(x) = s \dot{s} \quad (11)$$

وبالتالي حتى يكون النظام مستقراً يجب أن يكون التابع السابق سالب التحديد. اعتمدنا على هذه الخاصية لإيجاد قيمة d_n في البداية تم إيجاد قيمة

الحر على إعطاء أفضل تتبع للمسار المطلوب وأقل استهلاك للطاقة مقارنة مع المتحكم التقليدي [4].

وفي ذات العام نفذ الباحثون E. H. Karam, T. Tashan, and E. F. Mohsin بحثاً تم في هذا البحث تطوير المتحكم الانزلاقي ذو النموذج الحر وذلك بالاعتماد على خوارزمية BBO (Biogeography-Based Optimization) التي تعتبر من طرق الأمثلة العشوائية حيث اقترح هذا التعديل من أجل منظم معدل ضربات القلب. وبما أنه من الصعب وضع نموذج مناسب لعضلة القلب لذلك فإن لهذه الخوارزمية فائدة كبيرة لكونها لا تعتمد على نموذج النظام. لتقليل آثار الاهتزازات الموجودة في إشارة التحكم تم تضمين طبقة من الحدود إلى علاقة المتحكم.

تم اختيار أداء خوارزمية التحكم الانزلاقي ذو النموذج الحر المعدلة وذلك بدون تضمين طبقة الحدود ومع تضمين طبقة الحدود حيث أظهرت نتائج الاختبار أن أداء الخوارزمية بوجود طبقة الحدود يكون أفضل ومن أجل التأكد من قدرة المتحكمين تم اختبارهما بعد إضافة الاضطرابات حيث حصلنا على استجابة جيدة في كلا المتحكمين رغم الاضطرابات [5].

3. هدف البحث:

يهدف البحث إلى إيجاد علاقة جديدة للمتحكم الانزلاقي ذو النموذج الحر. تتميز هذه العلاقة أنها تأخذ بالحسبان الضجيج الذي يتعرض له النظام وبالتالي نحصل على بنية تحكمية متينة وغير معتمدة على النموذج الرياضي للنظام.

4. مواد وطرق البحث:

سيستخدم البحث برنامج Simulink ضمن الحزمة البرمجية MATLAB وذلك لاختبار قدرة إشارة التحكم على التحكم بنظام لا خطي من درجة الثانية.

5. سطح الانزلاق (Sliding Surface):

توجد العديد من العلاقات التي تعبر عن سطح الانزلاق، حيث أننا في هذا البحث اعتمدنا على علاقة سطح الانزلاق بدلالة إشارة الخطأ حيث تعطى علاقة سطح الانزلاق لنظام من درجة n وحيد الدخل ووحيد الخرج بالعلاقة التالية:

$$S(t) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda \right)^{n-1} e(t) \quad (1)$$

حيث أن λ عبارة عن ثابت موجب يعبر عن ميل سطح الانزلاق و S تعبر عن سطح الانزلاق و e تعبر عن إشارة الخطأ. تعرف إشارة الخطأ بالعلاقة التالية:

$$e(t) = x(t) - x_d(t) \quad (2)$$

حيث أن $x(t)$ تمثل قيمة متغيرات الحالة المقاسة و $x_d(t)$ تمثل قيمة متغيرات الحالة المرغوبة [10].

6. النموذج الحر (Free-Model):

تقوم هذه الخوارزمية بوصف النظام في فضاء الحالة وذلك باستخدام المعادلة التقريبية التالية حيث تكتب هذه المعادلة من أجل النظام وحيد الدخل ووحيد الخرج من الدرجة n على الشكل التالي:

$$\dot{x}^n \approx x^n + u - u_{k-1} \quad (3)$$

حيث أن x^n تمثل متغيرات الحالة التي نريد التحكم بها، u تمثل إشارة التحكم و u_{k-1} تمثل قيمة إشارة التحكم السابقة [2].

حيث أن التابع $\text{sat}\left(\frac{s}{\varphi}\right)$ يعرف على الشكل التالي :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Sat}\left(\frac{s}{\varphi}\right) = \frac{s}{\varphi} \rightarrow \text{if } \left|\frac{s}{\varphi}\right| \leq 1 \quad (23) \\ \text{Sat}\left(\frac{s}{\varphi}\right) = \text{Sgn}\left(\frac{s}{\varphi}\right) \rightarrow \text{otherwise} \quad (24) \end{array} \right\}$$

وأخيراً يتم تحديد ديناميكية طبقة الحدود باستخدام العلاقة التالية:

$$\dot{\varphi} + \lambda\varphi = \bar{\varepsilon}(\bar{x}_d) \quad (25)$$

حيث أن $\varphi(0) = \frac{\varepsilon}{\lambda}$. وإن مع هذا المقترح نضمن أن يكون التتبع في أفضل أحواله [1].

9. الدراسة العملية:

9.1 اختبار أداء الخوارزمية الأساسية والخوارزمية المطورة بدون تضمين طبقة الحدود:

سوف يتم اختبار قدرة الخوارزمية الجديدة على التحكم بنظام لاخطي علاقته على الشكل التالي:

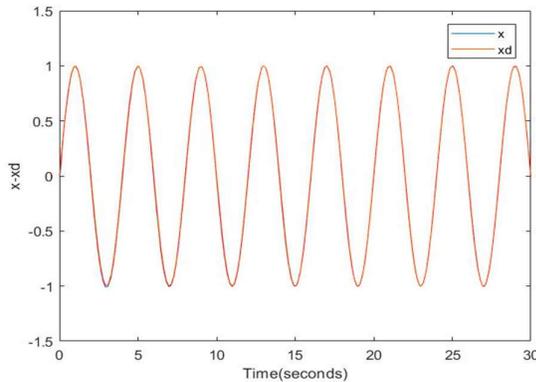
$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx^2 = u \quad (26)$$

حيث أن m: هي كتلة النظام

C: معامل التخميد

K: ثابت النابض

تؤخذ قيمة هذه الثوابت في المحاكاة على الشكل التالي $m=2 \text{ Kg}$, $c=0.8$ تؤخذ قيمة هذه الثوابت في المحاكاة على الشكل التالي $t=30 \text{ sec}$ ثانية و زمن أخذ العينات المستخدم 0.0001 ثانية. قيمة $\lambda=20$ و $\varepsilon=0.1$. الإشارة المرغوبة التي نريد الحصول عليها $x_d(t) = \sin\left(\frac{\pi}{2}t\right)$ تكون نتائج محاكاة الخوارزمية الأساسية في حالة عدم وجود ضجيج على الشكل التالي:



الشكل 2: الإشارة الفعلية والإشارة المرغوبة في الخوارزمية الأساسية

من الشكل (2) نلاحظ انطباق الإشارة الفعلية على الإشارة المرغوبة.

مشتق سطح الانزلاق وتعويض قيمة إشارة التحكم فيها فنحصل على العلاقة التالية :

$$\dot{s} = d - d_n - \varepsilon \text{Sgn}(s) \quad (12)$$

$$s(t) > 0 \rightarrow \dot{s} = d - d_n - \varepsilon \quad (13)$$

ولكي يتحقق الشرط يجب أن يكون مشتق سطح الانزلاق سالب لذلك نكتب علاقة مشتق سطح الانزلاق على الشكل التالي:

$$\dot{s} = d - d_h - \varepsilon \quad (14)$$

حيث أن d_h يمثل الحد الأعلى للضجيج . وعندما يكون سطح الانزلاق سالب فنحصل على العلاقة التالية:

$$s(t) < 0 \rightarrow \dot{s} = d - d_n + \varepsilon \quad (15)$$

ولكي يتحقق الشرط يجب أن يكون مشتق سطح الانزلاق موجب لذلك نكتب علاقة المشتق على الشكل التالي:

$$\dot{s} = d - d_l + \varepsilon \quad (16)$$

حيث أن d_l تعبر عن الحد الأدنى للضجيج . نقوم بجمع المعادلتين (14) و(16) فنحصل على المعادلة التالية:

$$d = \frac{d_l + d_h}{2} \quad (17)$$

بعد ذلك نقوم بطرح المعادلتين (14) و(16) فنحصل على المعادلة التالية:

$$\varepsilon = \frac{d_l - d_h}{2} \quad (18)$$

من المعادلة (12) نساوي مشتق سطح الانزلاق للصفر ونقوم بحساب الضجيج فنحصل على العلاقة التالية:

$$d_n = d - \varepsilon \text{Sgn}(s) \quad (19)$$

هكذا أصبحت القيم معلومة ويمكننا استخدام إشارة التحكم.

8. طبقة الحدود:

من أجل التمكن من تقليل التذبذبات الموجودة في إشارة التحكم فإن طبقة من الحدود سوف يتم إضافتها إلى إشارة التحكم ولكن من أجل ضمان المحافظة على شرط الانزلاق يجب أن نضمن أن تكون المسافة إلى طبقة الحدود متناقصة باستمرار لذلك نقوم بتعديل شرط الانزلاق ليصبح على شكل التالي:

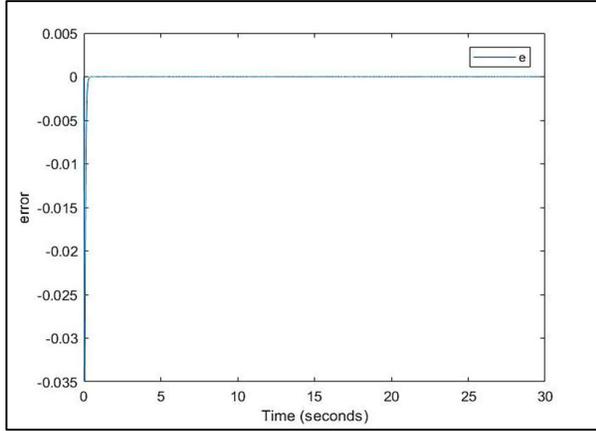
$$|s| \geq \varphi \rightarrow \frac{1}{2} \frac{d}{dt} S^2 \leq (\varphi - \varepsilon)|s| \quad (20)$$

لذلك من أجل ضمان تحقيق المعادلة السابقة فإن ربح التبديل يصبح على الشكل التالي:

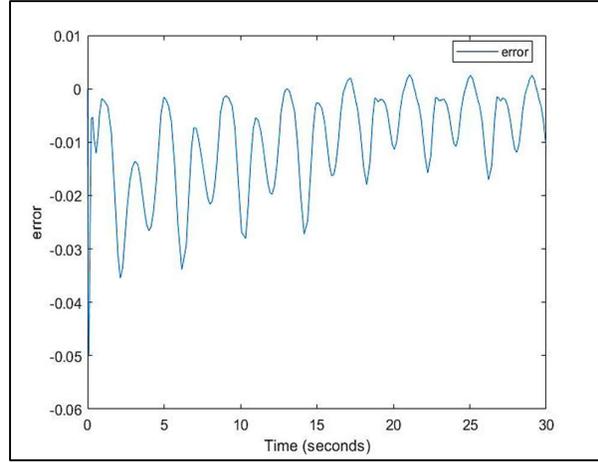
$$\bar{\varepsilon} = \varepsilon - \varphi \quad (21)$$

وقانون التحكم يصبح على الشكل التالي :

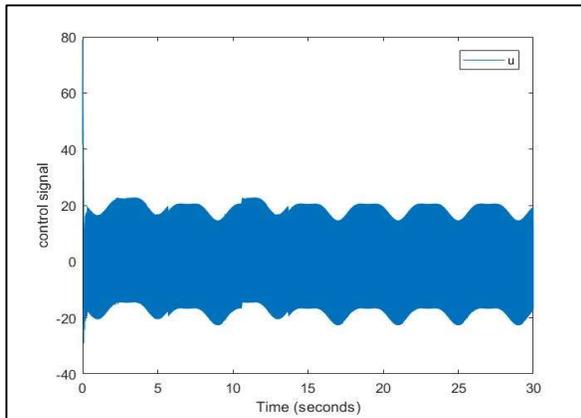
$$\hat{u} = u - \bar{\varepsilon} \text{Sat}\left(\frac{s}{\varphi}\right) \quad (22)$$



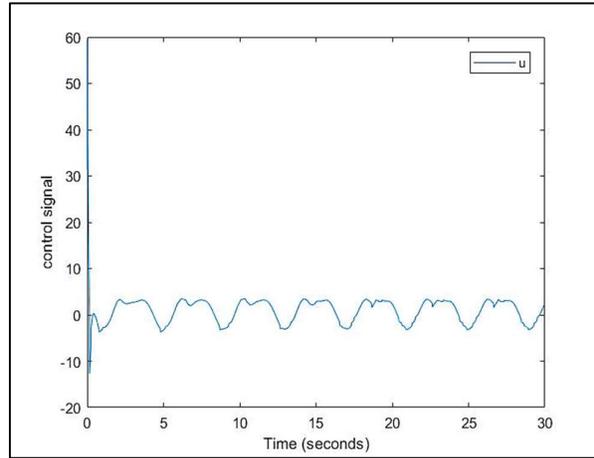
الشكل 6: إشارة الخطأ في الخوارزمية المطورة



الشكل 3: إشارة الخطأ في الخوارزمية الأساسية

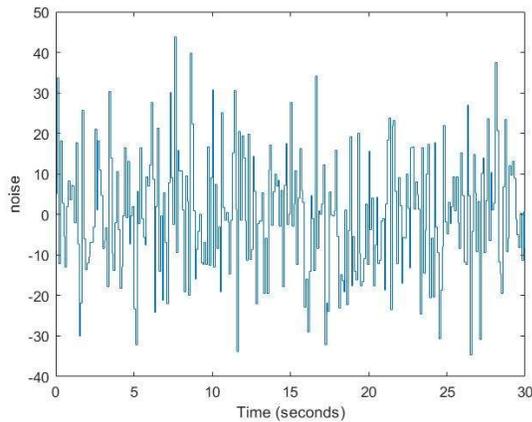


الشكل 7: إشارة التحكم في الخوارزمية المطورة

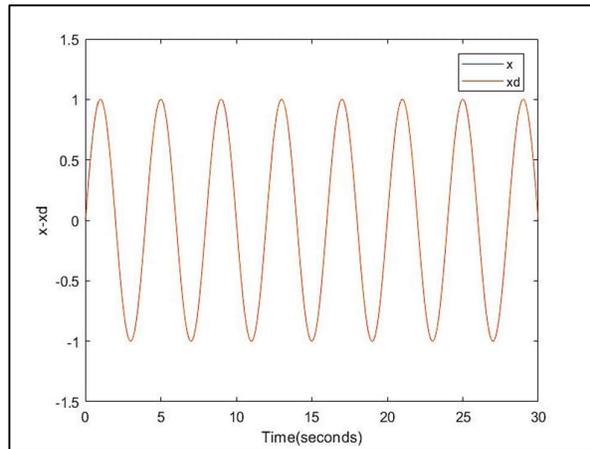


الشكل 4: إشارة التحكم في الخوارزمية الأساسية

نلاحظ من الشكل 5 أن الخوارزمية المطورة تعطي أفضل تتبع للإشارة المطلوبة والشكل 6 يوضح أن قيمة الخطأ تساوي الصفر تقريباً. أما عندما نعرض النظام إلى ضجيج طاقته تساوي العشرين موضح في الشكل التالي:



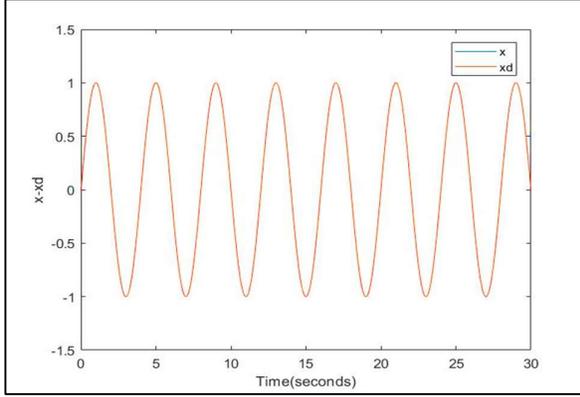
الشكل 8: إشارة الضجيج المطبقة على النظام



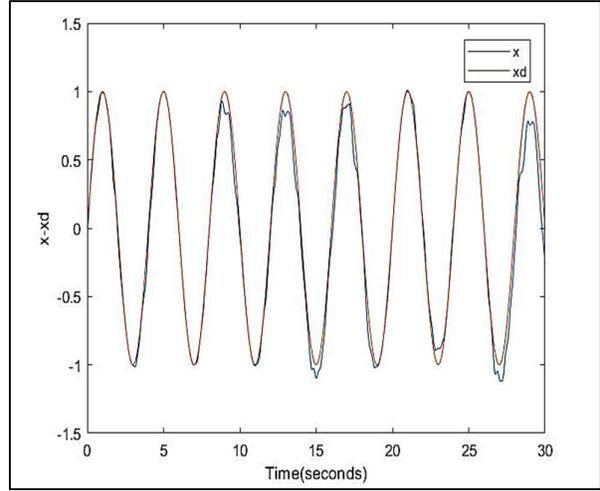
الشكل 5: الإشارة الفعلية والإشارة المرغوبة في الخوارزمية المطورة

فتصبح النتائج في الخوارزمية الأساسية على الشكل التالي:

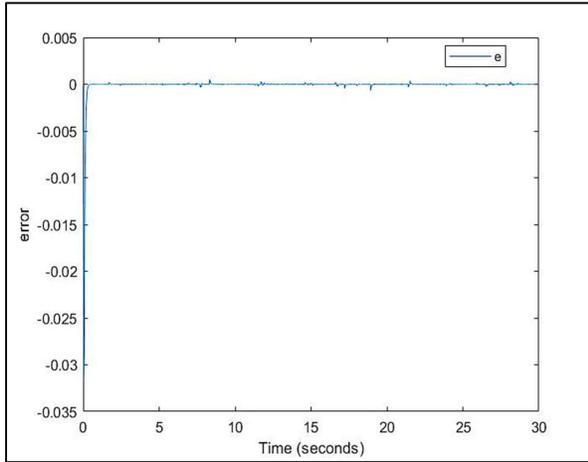
بالنسبة للخوارزمية المطورة تكون النتائج عند تعرض النظام لنفس قيمة الضجيج السابقة على الشكل التالي:



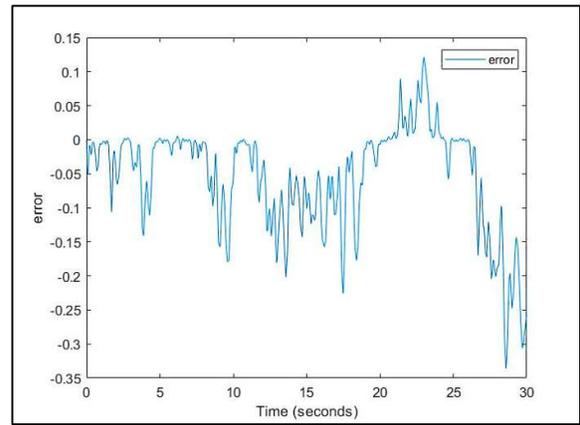
الشكل 12: الإشارة الفعلية والإشارة المرغوبة في الخوارزمية المطورة بوجود الضجيج



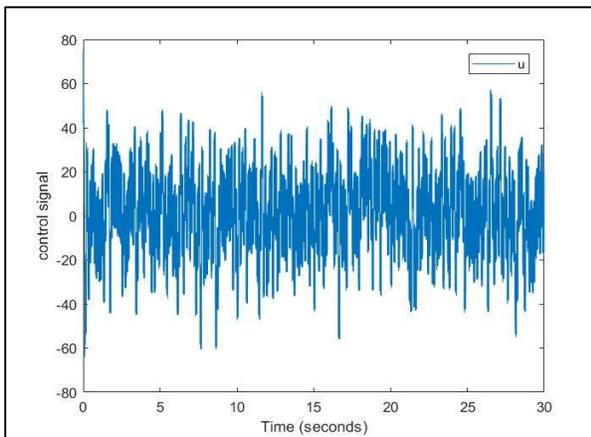
الشكل 9: الإشارة الفعلية والإشارة المرغوبة في الخوارزمية الأساسية بوجود الضجيج



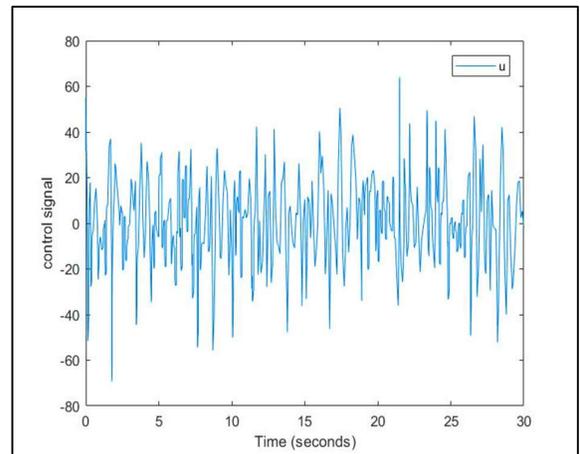
الشكل 13: إشارة الخطأ في الخوارزمية المطورة بوجود الضجيج



الشكل 10: إشارة الخطأ في الخوارزمية الأساسية بوجود الضجيج



الشكل 14: إشارة التحكم في الخوارزمية المطورة بوجود الضجيج



الشكل 11: إشارة التحكم في الخوارزمية الأساسية بوجود الضجيج

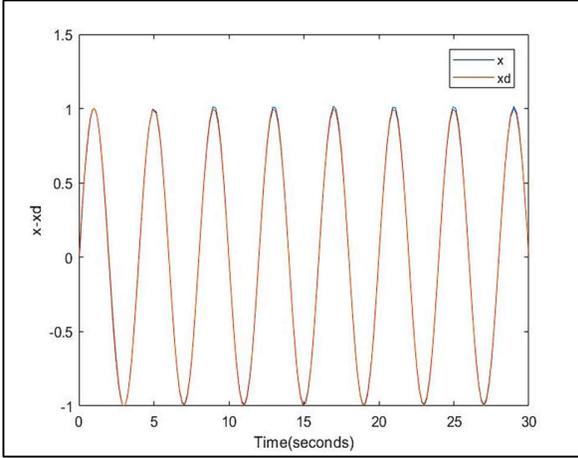
نلاحظ من الشكلين السابقين أن الخوارزمية المطورة تكون أكثر متانة ضد الضجيج من الخوارزمية الأساسية ولكن إشارة التحكم تصبح تعاني من اهتزازات حيث سوف يتم تقليل هذه المشكلة باستخدام طبقة الحدود كما

نلاحظ من الشكل 8 أن النظام يصبح غير قادر على إعطاء الإستجابة المطلوبة عند تعرضه للضجيج والشكل 9 يوضح كيف أن قيمة الخطأ تزداد بوجود الضجيج وتصبح إشارة التحكم مهتزة كما هو موضح في الشكل 10.

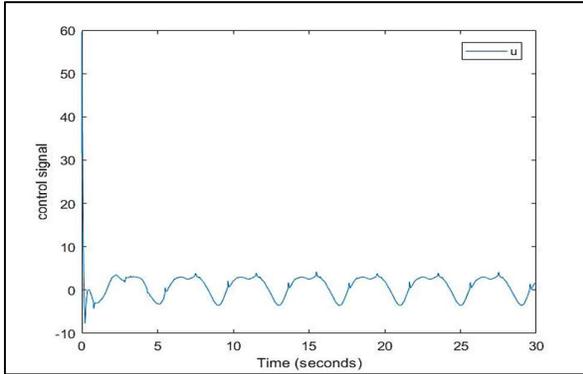
لذلك قمنا بتضمين طبقة الحدود إلى إشارة التحكم لكي نقلل من هذه الاهتزازات.

9.2 اختبار أداء الخوارزمية الأساسية والخوارزمية المطورة بعد تضمين طبقة الحدود:

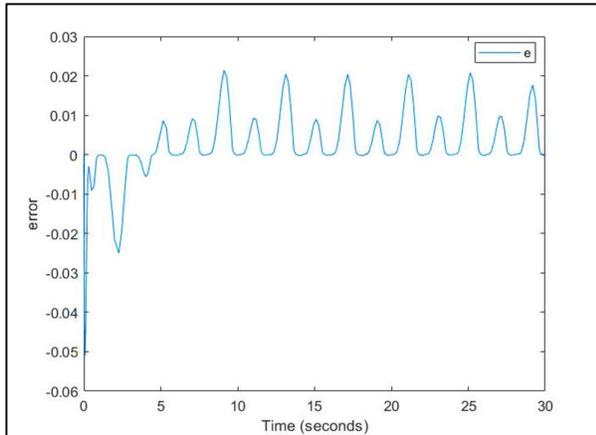
بعد تضمين طبقة الحدود إلى إشارة التحكم تكون نتائج الخوارزمية الأساسية بدون وجود الضجيج على الشكل التالي:



الشكل 15: الإشارة الفعلية والإشارة المرغوبة في الخوارزمية الأساسية بعد تضمين طبقة الحدود وبدون وجود ضجيج



الشكل 16: إشارة التحكم في الخوارزمية الأساسية بعد تضمين طبقة الحدود وبدون وجود ضجيج



سنرى لاحقاً. الجدول 1 يوضح قيمة الخطأ الصغرى والعظمى والمتوسط في الخوارزمية الأساسية والجدول 2 يوضح القيم ذاتها في الخوارزمية المطورة وذلك في حالة عدم وجود الضجيج وفي حالات وجود الضجيج بقيم مختلفة.

الجدول 1: قيم الخطأ في الخوارزمية الأساسية

الخوارزمية الأساسية			
المتوسط	قيمة كبرى	قيمة صغرى	
-0.007	0.0026	-0.05	دون ضجيج
-0.0021	0.0059	-0.05	طاقة ضجيج=0.1
-0.0024	0.0299	-0.0771	طاقة ضجيج=5
-0.0068	0.047	-0.2124	طاقة ضجيج=10
-0.0244	0.1214	-0.336	طاقة ضجيج=20

الجدول 2: قيم الخطأ في الخوارزمية المطورة

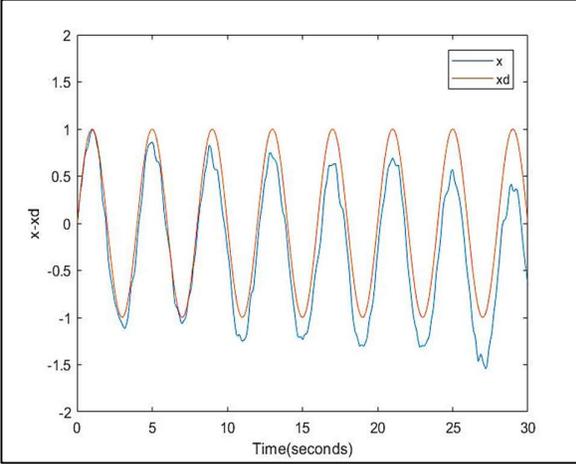
الخوارزمية المطورة			
المتوسط	قيمة كبرى	قيمة صغرى	
-4.5687	2.7035	-0.0349	دون ضجيج
$*10^{-5}$	$*10^{-5}$		
-4.3242	1.2707	-0.035	طاقة ضجيج=0.1
$*10^{-5}$	$*10^{-4}$		
-9.0701	1.0289	-0.0322	طاقة ضجيج=5
$*10^{-6}$	$*10^{-4}$		
-3.4514	3.4068	-0.0321	طاقة ضجيج=10
$*10^{-5}$	$*10^{-4}$		
-3.5379	5.1871	-0.032	طاقة ضجيج=20
$*10^{-5}$	$*10^{-4}$		

من الجدولين نجد أن قيمة الخطأ تكون أقل في الخوارزمية المعدلة بالإضافة لقدرة هذه الخوارزمية على إعطاء الأداء ذاته رغم تعرض النظام للضجيج في حين أن الخطأ في الخوارزمية الأساسية يكون أكبر ويزداد بوجود الضجيج.

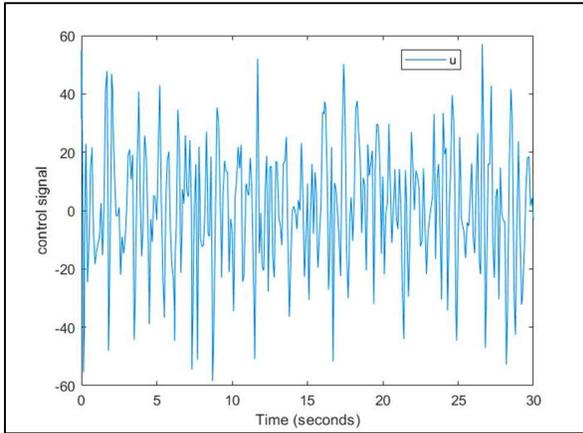
من أشكال إشارات التحكم السابقة نلاحظ وجود اهتزازات في إشارة التحكم في كلتا الخوارزميتين وتزداد هذه الاهتزازات عند تعرض النظام للضجيج

الشكل 20: إشارة الخطأ في الخوارزمية المطورة بعد تضمين طبقة الحدود ودون وجود ضجيج

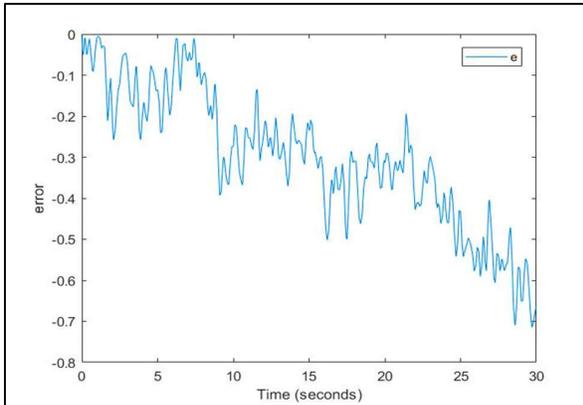
أما عند تعرض النظام للضجيج تكون نتائج الخوارزمية الأساسية بعد تضمين طبقة الحدود كما يلي:



الشكل 21: الإشارة الفعيلة والإشارة المرغوبة في الخوارزمية الأساسية بعد تضمين طبقة الحدود بوجود الضجيج



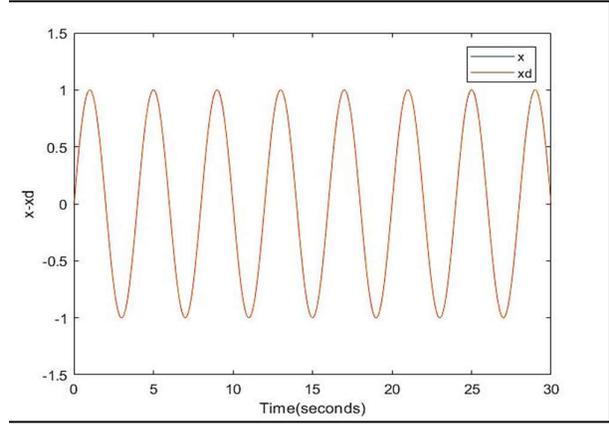
الشكل 22: إشارة التحكم في الخوارزمية الأساسية بعد تضمين طبقة الحدود بوجود الضجيج



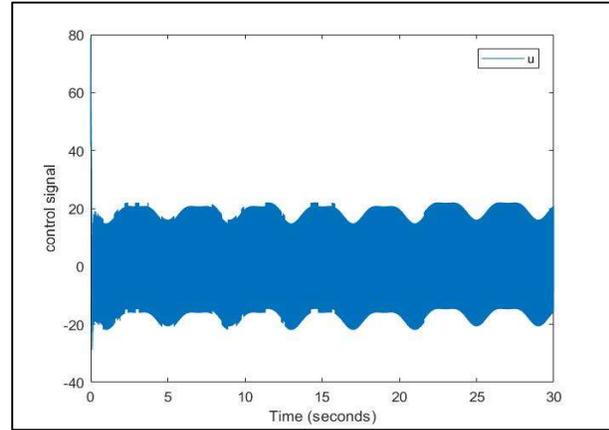
الشكل 23: إشارة الخطأ في الخوارزمية الأساسية بعد تضمين طبقة الحدود بوجود الضجيج

الشكل 17: إشارة الخطأ في الخوارزمية الأساسية بعد تضمين طبقة الحدود ودون وجود ضجيج

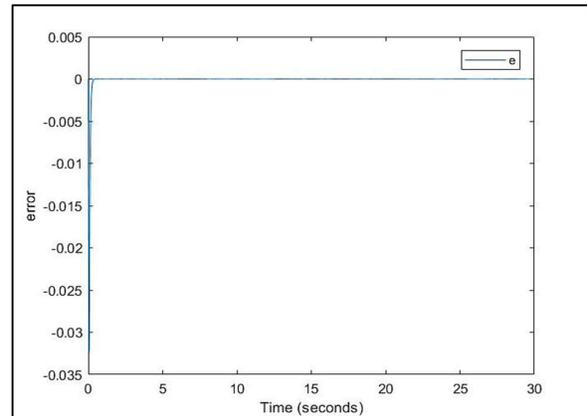
نلاحظ أن إضافة طبقة الحدود إلى إشارة التحكم لم تساهم في تحسين الأداء في الخوارزمية الأساسية. تكون نتائج الخوارزمية المطورة بعد تضمين طبقة الحدود على الشكل التالي:



الشكل 18: الإشارة الفعلية والإشارة المرغوبة في الخوارزمية المطورة بعد تضمين طبقة الحدود ودون وجود ضجيج



الشكل 19: إشارة التحكم في الخوارزمية المطورة بعد تضمين طبقة الحدود ودون وجود ضجيج



الحدود على تقليل اهتزازات إشارة التحكم وإنقاص مطالها. ولمعرفة أثر إضافة طبقة الحدود كيف تؤثر على قيم الخطأ نعرض الجدولين التاليين:

الجدول 3: قيم الخطأ في الخوارزمية الأساسية بعد تضمين طبقة الحدود

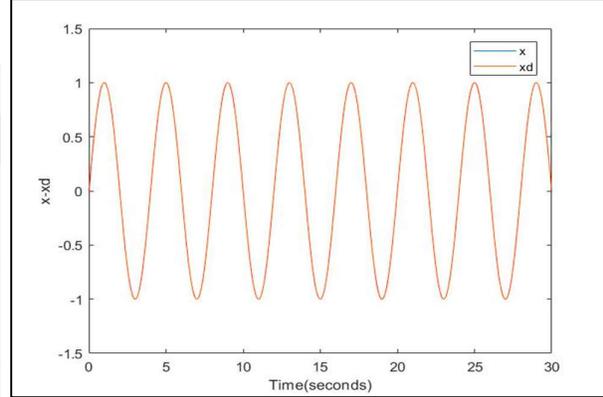
الخوارزمية الأساسية			
المتوسط	قيمة كبرى	قيمة صغرى	
3.6146 $\times 10^{-4}$	0.0214	-0.05	دون ضجيج
-1.4085 $\times 10^{-4}$	0.0108	-0.05	طاقة ضجيج=0.1
-0.0083	0.1387	-0.1641	طاقة ضجيج=5
-0.2347	0	-0.4381	طاقة ضجيج=10
-0.2712	0	-0.7143	طاقة ضجيج=20

الجدول 4: قيم الخطأ في الخوارزمية المطورة بعد تضمين طبقة الحدود

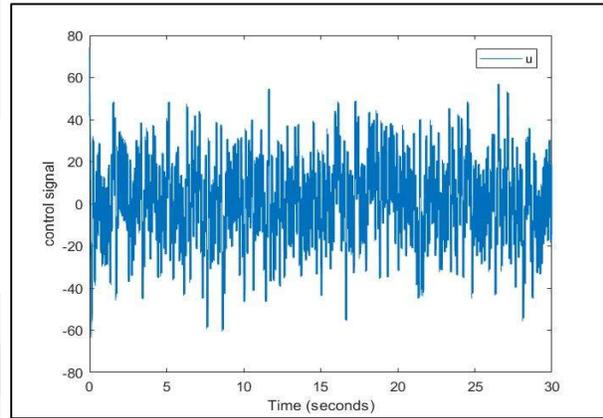
الخوارزمية المطورة			
المتوسط	قيمة كبرى	قيمة صغرى	
-8.1622 $\times 10^{-5}$	9.5468 $\times 10^{-6}$	-0.0327	دون ضجيج
-3.5722 $\times 10^{-5}$	1.4374 $\times 10^{-5}$	-0.0322	طاقة ضجيج=0.1
-1.0885 $\times 10^{-4}$	1.1698 $\times 10^{-5}$	-0.0326	طاقة ضجيج=5
-3.4189 $\times 10^{-5}$	2.0034 $\times 10^{-5}$	-0.0323	طاقة ضجيج=10
-4.2062 $\times 10^{-5}$	2.2107 $\times 10^{-5}$	-0.0323	طاقة ضجيج=20

نلاحظ من خلال مقارنة قيم الجدولين (3,4) مع قيم الجدولين (1,2) أن إضافة طبقة الحدود ساعدت في تقليل قيمة الخطأ في كلتا الخوارزميتين ولكن في الخوارزمية المعدلة يكون الخطأ أقل بكثير من الخوارزمية الأساسية.

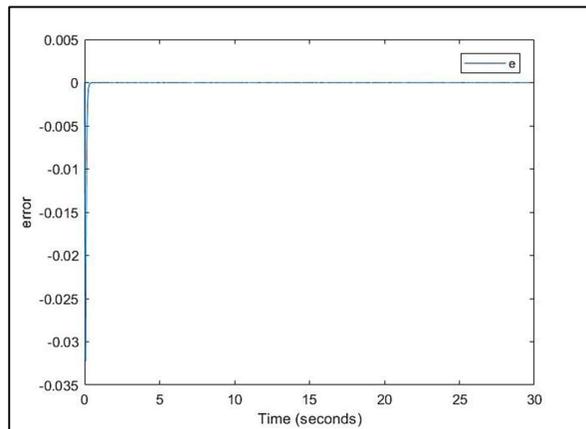
نلاحظ من الشكل 20 أن إضافة طبقة الحدود لم يحسن الأداء في الخوارزمية الأساسية. بالنسبة للخوارزمية المطورة تكون نتائج على شكل تالي:



الشكل 24: الإشارة الفعلية والإشارة المرغوبة في الخوارزمية المطورة بعد تضمين طبقة الحدود بوجود الضجيج



الشكل 25: إشارة التحكم في الخوارزمية المطورة بعد تضمين طبقة الحدود بوجود الضجيج



الشكل 26: إشارة الخطأ في الخوارزمية المطورة بعد تضمين طبقة الحدود بوجود الضجيج

نلاحظ من الأشكال 23 و24 و25 أن إضافة طبقة الحدود إلى إشارة التحكم في الخوارزمية المطورة لم يؤثر سلباً على الأداء وإنما ساعدت طبقة

- [5] E. H. Karam, T. Tashan, and E. F. Mohsin, Design of Model-Free Sliding Mode Controller based on BBO Algorithm for Heart Rate Pacemaker, ResearchGate, vo. 11, pp. 31-37, March. 2019.
- [6] E. Schulken, and A. Crassidis, Model-free Sliding Mode Control Algorithms Including Application to a Real-Word Quadrotor, proceedings of the 5th International Conference of Control, Dynamic Systems, and Robotics, NO. 112, pp. 1-9, June. 2018.
- [7] F. E. Tin, A Model-Free Control System Based on the Sliding Mode Control Method with Applications to Multi-Input-Multi-Output Systems (2017). Thesis. Rochester Institute of Technology. Accessed from <https://scholarworks.rit.edu/theses/9458>.
- [8] H. Yu, and U. Ozguner, Adaptive Seeking Sliding Mode Control, proceedings of the 2006 American Control Conference, Minneapolis, Minnesota, USA, pp. 4694-4699, June. 2006.
- [9] J. Diab, Electronic automatic control\3\, Publications of Al-Baath University, pp. 596, 2013.
- [10] J. Liu, and X. Wang, Advanced Sliding Mode Control for Mechanical Systems, Springer, pp. 356, 2011.
- [11] J. P. V. S. Cunha, H. Liu, R. R. Costa, and F. Lizarralde, Output-feedback Model-Reference Sliding Mode Control of Uncertain Multivariable Systems, Automatic Control, IEEE Transactions, vol. 48, no. 12, pp. 2245-2250, December. 2003.
- [12] R. M. Reis, A New Model-Free Sliding Mode Control Method with Estimation of Control Input Error, (2016). Thesis. Rochester Institute of Technology. Accessed from <https://scholarworks.rit.edu/theses/9013>.
- [13] S. H. Lee, and C. C. Chung, Sliding Mode Control Design Using Fast Output Sampling, 42nd IEEE International Conference on Decision and Control, vol. 4, pp. 3543-3548, December. 2003.
- [14] S. Laghrouche, F. Plestan, and A. Glumineau, Higher Order Sliding Mode Control Based On Optimal Linear Quadratic Control, European control conference(ECC), Saint Petersburg, Russia, pp.910-915, January. 2003.
- [15] Z. Kai, W. Xingcheng, and J. Yi, New Sliding Surface Design for a Class of Nonlinear Sliding Mode Control Systems, proceedings of the 33rd Chinese control conference, pp. 104-108, July. 2014.

10. الاستنتاجات والتوصيات:

10.1 الاستنتاجات:

من خلال مقارنة النتائج السابقة نجد أن الخوارزمية المطورة مكنت النظام من إعطاء الأداء المطلوب منه رغم وجود الضجيج حيث حصلنا على قيمة خطأ أصغر من الخطأ الموجود في الخوارزمية الأساسية ولكن لاحظنا وجود اهتزازات في إشارة التحكم لذلك قمنا بتضمين طبقة الحدود إلى علاقة المتحكم واختبرنا أداء المتحكم من جديد. أفادت طبقة الحدود بتقليل اهتزازات إشارة التحكم دون التأثير على عملية تتبع المسار المرغوب وأيضاً قللت طبقة الحدود قيمة الخطأ. بالنتيجة تم الحصول على بنية تحكمية متينة تحافظ على تتبع الاستجابة المطلوبة رغم تعرض النظام للضجيج الذي يؤدي في كثير من الحالات إلى فشل العملية التحكمية وتكون هذه البنية مستقرة لأننا اعتمدنا على نظرية ليابونوف المباشرة في استنتاج الخوارزمية.

10.2 التوصيات:

- إجراء تعديل على علاقة النموذج الحر بحيث يصبح ربح المتحكم لا يساوي الواحد ودراسة تأثير قيمة الربح على أداء المتحكم.
- تعديل الخوارزمية المطورة بحيث يمكننا استخدامها للتحكم بالأنظمة متعددة المداخل ومتعددة المخارج.
- دراسة تأثير ربح التبديل للمتحكم الانزلاقي على الأداء الذي يقدمه المتحكم.

11. المصادر:

- [1] A. Mizov, A Model-Free Control Algorithm Derived Using the Sliding Model Control Method (2015). Thesis. Rochester Institute of Technology, New York, Accessed from <https://scholarworks.rit.edu/theses/8666>
- [2] A. Crassidis, and A. Mizov, A Model-Free Control Algorithm Derived Using the Sliding Mode Control Method, proceedings of the 2nd International Conference of Control, Dynamic Systems, and Robotics, Ottawa, Ontario, Canada, NO. 166, PP. 9, May. 2015.
- [3] A. Ferrara, M. Rubagotti, A Sub-Optimal Second Order Sliding Mode Controller for Systems with Saturating Actuators, 2008 American Control Conference , Westin Seattle Hotel, Seattle, Washington, USA, June. 2008.
- [4] [4] A. R. K. Sreeraj, A Model-Free Control Algorithm Based on the Sliding Mode Control Method with Applications to Unmanned Aircraft Systems, (2019). Thesis. Rochester Institute of Technology. Accessed from <https://scholarworks.rit.edu/theses/10043>.

Improved Model-Free Sliding Mode Control Algorithm for Control Non-Linear Systems

*Hasnaa Wasouf^{1, *}, Jomana Diab²*

¹Department of Biomedical Engineering, Al Andalus University for Medical Sciences, Al-Qadmous, Tartous, Syria.

²Faculty of Biomedical Engineering, Al Baath University, Syria

Corresponding author: Hasnaa wasouf, hasnaa.wasouf@gmail.com

Published online: 31 December 2020

Abstract: When testing the performance of the model-free sliding mode control algorithm, it was found that it could not maintain good performance when the system was exposed to noise. This research suggests designing a noise-resistant model-free sliding mode control algorithm. The importance of this algorithm is that it takes into account the effect of the noise, where the noise value is implemented in the model-free algorithm. The sliding surface of the controller is designed based on the improved relationship and to ensure the stability of the system in the closed-loop the control signal was derived based on the direct Lyapunov method. To minimize the effects of chattering in the control signal, the control law was reconfigured using a boundary layer. The improved algorithm was implemented to a second-order non-linear system and the simulation results showed the system's ability to track the desired signal in spite of the presence of the noise as well as its ability to maintain the stability of the controlled system.

Keywords: Sliding Mode Control, Model-Free, Improved Model-Free, Lyapunov.