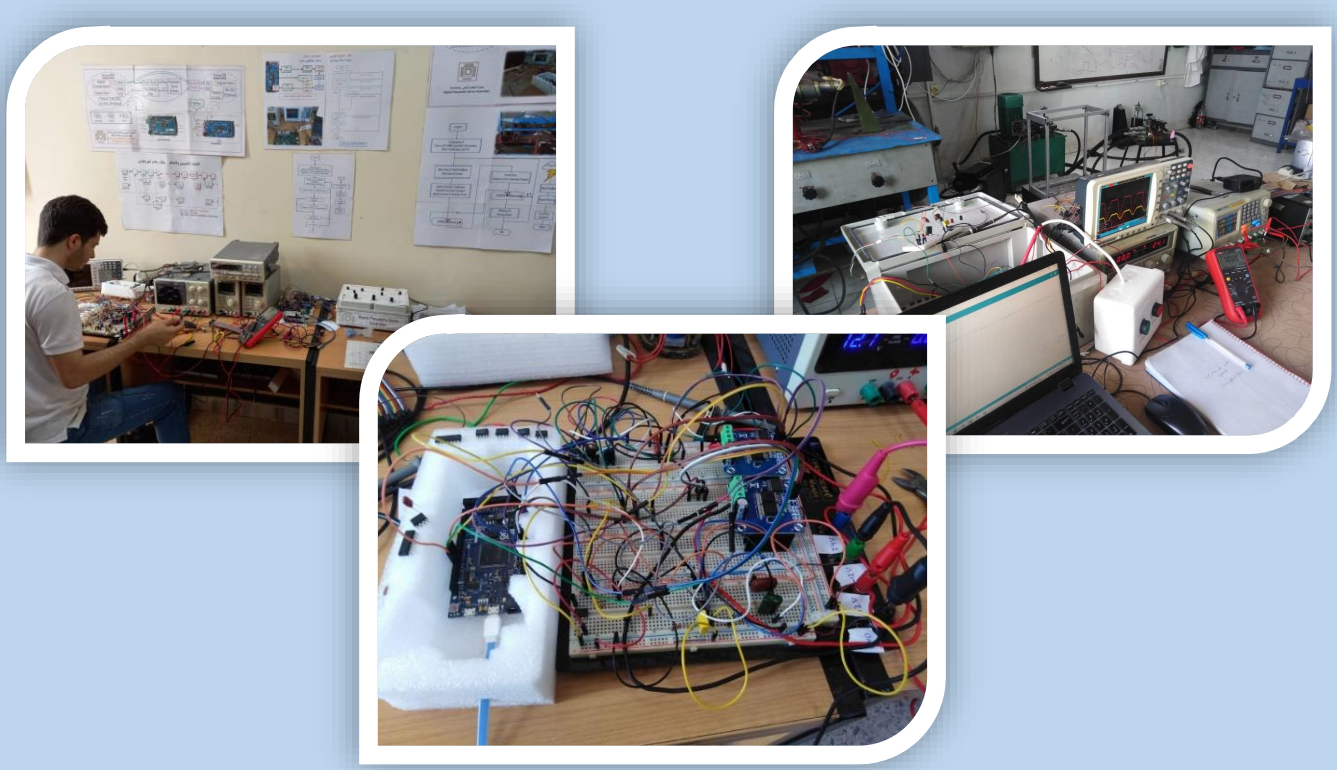
الجمهورية العربية السورية
المعهد العالي للعلوم التطبيقية والتكنولوجيا
هندسة الطيران/ فرع حلب.

HIAST

التعرف التجريبي والتحكم بمخدم كهروهيدروليكي



قُدّمَ هذا العمل استكمالاً لمتطلبات الحصول على درجة الإجازة في هندسة الطيران

إعداد:

محمد طه برازي

إشراف:

م. محمد سمان ما. منذر مصطفى د. عبد الغني البكار د. سعد الدين عطار

2024-2023

شكر وتقدير

أشكر **الله ربّي عزّ وجل**

على فضله وتوفيقه لنا في إتمام هذا العمل المتواضع

كما أتقدم بخالص الشكر والتقدير إلى السادة المشرفين

م. محمد سمان ما. منذر مصطفى د. عبد الغني البكار د. سعد الدين عطار

على ما بذلوه من جهد لإتمام هذا العمل

والشكر موصول إلى الأساتذة أعضاء لجنة التحكيم الذين تفضلوا بقراءة هذا البحث والاطلاع عليه

وأخصُّ بالشكر **الدكتور نضال السيد سليمان الأتاسي** لدعمه ومتابعته لسير المشروع

وأخيراً كل الشكر والتقدير لكل من ساهم في إتمام هذا العمل.

محمد طه برازي

الإهداء

إلى من ربّاني عند الصِغرِ وآخاني عند الكِبرِ ووضعني على سكّة الحياة وقال: انطلق . . .

والدي العزيز

إلى من علمتني الصّبر بصبرها، إلى القـــلب المعطاء والحضن الدافئ، إلى السيدة الأولى في حياتي . . .

والدتي الحبيبة

إلى من هم سندي وعزوتي في هذه الحياة، وبهم أفتخر . . .

إخـوتي

إلى كل من دعمني وسندني في سرّائي وضرّائي حتى بلغتُ هذا المبلغ . . إلى عائلتي التي بها أعلو وأفتخر . . .

أقاربي الأعزاء

إلى من قضيت معهم لحظات لا تنسى . . . . .

أصدقائي وزملائي

إلى كل هؤلاء: أُهدي هذا العمل، الذي أسال الله تعالى أن يتقبله خالصًا . . .

محمد طه برازي

ملخص المشروع

يهدف هذا المشروع إلى تطوير دارة قيادة موثوقة تلبي متطلبات التشغيل والتحكم بالمنظومة الكهروهيدروليكية، وتطبيق إجرائية التعرف على النظام بهدف تحصيل نماذج معاملاتية خطية ولاخطية تُستخدم في تصميم مصحح للتحكم بالموضع مع تغذية أمامية للتغلب على العناصر اللاخطية، واستخدام تقنية التحكم التتابعي للتحكم بالتسارع كحلقة رئيسية إضافةً إلى حلقة الموضع الثانوية.

Abstract

This project aims to develop a reliable driver circuit that meets the operational and control requirements of the electro-hydraulic system. It also aims to apply system identification procedures to obtain linear and nonlinear parametric models used in designing a position control corrector with feedforward to overcome nonlinear elements. Furthermore, the project uses cascade control techniques to control acceleration as the main loop, in addition to a secondary position loop.

فهرس المحتويات

الفصل الأول: التعريف بالمنظومة الكهروهيدروليكية 2

1.1 مقدمة: 3

1.2 المخطط الصندوقي للدارة الهيدروليكية: 3

1.3 المكونات الأساسية للدارة الهيدروليكية المستخدمة: 3

1.3.1 وحدة التغذية الهيدروليكية: 3

1.3.2 وحدة التحكم الكهروهيدروليكية : 4

1.4 المخدم Actuator: 6

الفصل الثاني: تطوير وتنفيذ دارة القيادة 9

2.1 مقدمة: 10

2.2 وحدة القيادة BTS7960 : 11

2.3 دارة الملائمة بين خرج مقسم الجهد (Potentiometer) ودخل المحول ADC : 14

2.4 دارة مرشح تمرير منخفض تشابهي Low Pass Filter Circuit: 15

2.5 دارة تنظيم الجهد Regulator Voltage Circuit: 18

2.6 بطاقة المتحكم الصغري Arduino Due: 20

2.7 المحول التشابهي الرقمي A/D: 21

2.8 مولد إشارة الـPWM: 22

2.9 برنامج المتحكم الصغري: 22

2.10 المرشح الرقمي: 23

الفصل الثالث: التعرف التجريبي 27

3.1 مقدمة 28

3.2 التعرف في الحلقة المغلقة: 30

3.3 إشارات التحفيز المستخدمة في التعرف: 31

3.4 الإشارة الثنائية العشوائية المزيفة PRBS :..... 32
3.5 تصميم تجربة التعرف: 33
3.6 إجرائية تنفيذ التعرف التجريبي: 35
3.7 برنامج المتحكم الصغري في تجربة التعرف:..... 36
3.8 تحليل النتائج ومناقشتها: 38
3.9 تجربة التعرف على نموذج التحكم Process Model:..... 39
3.10 تجارب التعرف على نماذج التنبؤ والنمذجة والمحاكاة: 41
الفصل الرابع: التحكم بالمخدم..... 48
4.1 مقدمة: 49
4.2 نمذجة النظام المدروس باستخدام برنامج المحاكاة MATLAB\Simulink:..... 49
4.3 العناصر اللاخطية Non-Linear Items:..... 50
4.3.1 المنطقة الميتة (Dead zone):..... 51
4.3.2 التأخير الزمني (Time delay):..... 54
4.3.3 حد الإشباع (Saturation):..... 56
4.4 التحكم بالموضع: 57
4.4.1 تحديد بارامترات المصحح: 57
4.4.2 المعادلة الفرقيّة لمصحح مقدّم الطور:..... 60
4.4.3 تجارب الدارة المغلقة مع مصحح مقدم الطور بعد عملية tuning:... 61
4.5 التحكم التتابعي Cascade Control:..... 63
4.5.1 التحكم التتابعي باستخدام حلقة التسارع وحلقة الموضع:..... 64
الخاتمة والتوصيات المستقبلية:..... 70
المراجع العلمية..... 71

فهرس الأشكال

شكل 1–المخطط الصندوقي للدارة الكهروهيدروليكية..... 3
شكل 2–وضعيات عمل صمام التوجيه..... 4
شكل 3–استجابة صمام التوجيه حسب شروط عمل محددة..... 5
شكل 4–شروط العمل لصمام التوجية حسب النشرة الفنية..... 5
شكل 5–مخطط صمام تخفيض الضغط..... 6
شكل 6–استجابة صمام تخفيض الضغط..... 6
شكل 7–انواع اسطوانات الطاقة..... 7
شكل 8–مقسم الجهد potentiometer..... 7
شكل 9–المخطط العام للدارة الكهروهيدروليكية..... 8
شكل 10–المخطط العام لدارة القيادة..... 10
شكل 11–دارة مرشح منخفض للتيار..... 12
شكل 12–العلاقة بين الجهد Vis وتيار الحمولة I..... 12
شكل 13–تحويل الاشارة النبضية إلى اشارة مستمرة..... 13
شكل 14–دارة ملائمة جهد خرج ال potentiometer مع دخل المحول A/D..... 15
شكل 15–مرشح تمرر منخفض تشكيلة Sallen Kay من المرتبة الأولى..... 16
شكل 16–مرشح تمرر منخفض تشكيلة Sallen Kay من المرتبة الثانية..... 16
شكل 17–مرشح تمرير منخفض نوع Butterworth تشكيلة sallen kay من المرتبة الثالثة..... 18
شكل 18–مخطط بود لمرشح التمرير المنخفض من المرتبة الثالثة..... 18
شكل 19–دارة منظم جهد 10v..... 19
شكل 20–المرشح الوسطي..... 24
شكل 21– المخطط العام لدارة القيادة..... 24
شكل 22–دارة القيادة أثناء الاختبار..... 25
شكل 23–مراحل تنفيذ عملية التعرف..... 29
شكل 24-البنية الأساسية لنظام في الحلقة المغلقة..... 30
شكل 25-آلية إرسال واستقبال الأوامر من وإلى المتحكم في تجربة التعرف..... 34
شكل 26–مراحل تنفيذ التعرف التجريبي..... 35
شكل 27-خوارزمية عمل المتحكم في تجربة التعرف..... 37

شكل 28–الواجهة التخاطبية لصندوق أدوات تعريف النظام في ماتلاب..... 39
شكل 29–بيانات دخل وخرج النظام المحصلة من أجل إشارة تحفيز نبضية..... 40
شكل 30–مخطط البواقي..... 40
شكل 31–نسبة الباس نموذج Process Model المقدر لبيانات التحقق 41
شكل 32–بيانات دخل وخرج النظام المحصلة من أجل إشارة تحفيز PRBS..... 42
شكل 33–بنية نموذج Hammerstein-Wiener اللاخطي..... 43
شكل 34–نسبة الالباس لنماذج Hammerstein-Wiener و Transfer Function , $\boldsymbol{Tclck} =$ $\boldsymbol{28ms}$..... 43
شكل 35- نسبة الالباس لنماذج Hammerstein-Wiener و Transfer Function , $\boldsymbol{Tclck} =$ $\boldsymbol{28ms}$..... 45
شكل 36–تحليل البواقي لنماذج Hammerstein-Wiener و Transfer Function 46
شكل 37– مكونات الجزء الخطي من نموذج Hammerstein-Wiener..... 46
شكل 38–نمذجة نموذج Hammerstein-Wiener في Simulink 47
شكل 39–حلقة التحكم بنظام المخدم الكهروهيدروليكي..... 49
شكل 40–نمذجة النظام باستخدام برامجMATLAB\Simulink 50
شكل 41– محاكاة استجابة النظام من أجل دخل قفزة..... 50
شكل 42–تعريف المنطقة الميتة..... 51
شكل 43–نمذجة المنطقة الميتة..... 51
شكل 44–محاكاة استجابة النظام بوجود المنطقة الميتة..... 52
شكل 45– نمذجة حل لاخطية المنطقة الميتة..... 52
شكل 46– استجابة النظام بعد إدخال حل لاخطية المنطقة الميتة..... 53
شكل 47–استجابة النظام الحقيقية بعد زرع حل لاخطية المنطقة الميتة..... 53
شكل 48–تعريف التأخير الزمني Time delay..... 54
شكل 49– التأخيرالزمني من أجل دخل $\boldsymbol{step = 2.4volt}$..... 55
شكل 50–نمذجة التأخير الزمني..... 56
شكل 51–استجابة النظام بعد نمذجة التأخير الزمني..... 56
شكل 52–المتطلبات التصميمية لنظام التحكم بالمخدم الكهروهيدروليكي..... 57
شكل 53–مخطط بود للنظام قبل وبعد إضافة مصحح مقدم الطور..... 59
شكل 54–مخطط مسار الجذور للنظام قبل وبعد إضاقة مصحح مقدم الطور 59
شكل 55–الاستجابة الزمنية للنظام قبل وبعد إضافة مصحح مقدم الطور 60

شكل 56–استجابة النظام الحقيقية قبل وبعد إضافة مصحح مقدم الطور..... 62
شكل 57–التحكم التتابعي Cascade control..... 63
شكل 58–استجابة النظام في أداة ***controlSystemDesigner***..... 64
شكل 59–المتطلبات التصممية للنظام في حلقتي التحكم في التسارع والموضع..... 65
شكل 60–اختيار بنية حلقتي تحكم في أداة ***controlSystemDesigner***..... 65
شكل 61–استجابة النظام بعد إضافة حلقتي تحكم..... 67
شكل 62–معاملات مصحح حلقة التسارع..... 68
شكل 63–معاملات مصحح حلقة الموضع..... 68

فهرس الصور

صورة 1–وحدة التغذية الكهروهيدروليكية 3
صورة 2–صمام التوجيه 4
صورة 3–صمام تخفيض الضغط التناسبي ويليه صمام التوجيه..... 5
صورة 4–المخدم مع الطاولة..... 6
صورة 5–BTS7960..... 11
صورة 6–آلية التحكم جسر H..... 14
صورة 7– بطاقة Arduino DUE 20
صورة 8–الواجهة التخاطبية للقيادة والتحكم بالمخدم نمط Open loop..... 25
صورة9 – الواجهة التخاطبية للقيادة والتحكم بالمخدم نمط Closed loop..... 26
صورة 10–صورة عن بيئة العمل وعرض بيانات الدخل والخرج أثناء التحصيل 38

فهرس الجداول

جدول 1–قيم الثوابت حسب مرشحات Butterworth.....17
جدول 2-نسب التطابق لنماذج Hammerstein-Wiener و Transfer Function من أجل N=10 و
$Tclck$ متغيرة.....44
جدول 3– نسب التطابق لنماذج Hammerstein-Wiener و Transfer Function من أجل N=12 و
$Tclck$ متغيرة.....45
جدول 4–قيم التأخير الزمني من جهد دخل محدد.....55
جدول 5–مقارنة بين خصائص النظام قبل وبعد إضافة مصحح مقدم الطور.....62

مقدمة عن المشروع:

تعتبر الأنظمة الهيدروليكية جزءً أساسياً من التكنولوجيا الحديثة المستخدمة في مجموعة واسعة من التطبيقات. تعتمد هذه الأنظمة على استخدام السوائل المضغوطة لنقل الطاقة وتحقيق الحركات الميكانيكية بدقة وكفاءة عالية. يتطلب تشغيل الأنظمة الهيدروليكية بشكل صحيح وجود تحكم دقيق في الضغط والتدفق، مما يستدعي تصميم حلقات تحكم قادرة على تلبية هذه المتطلبات بكفاءة ووثوقية.

يهدف هذا المشروع إلى تصميم دارة قيادة الكترونية لمنظومة كهروهيدروليكية، تتضمن التحكم في صمام تخفيض الضغط وصمام التوجيه الهيدروليكي لقيادة مخدم كهروهيدروليكي متصل مع طاولة رجاجة تهتز وفق محور وحيد. بالإضافة إلى ذلك، سيتناول المشروع إجرائية التعرف على المنظومة، وذلك من أجل تطبيق تقنيات التحكم لتصميم متحكم قادر على تحسين أداء النظام.

تتكون مراحل المشروع من عدة خطوات رئيسية تشمل: دراسة المكونات الأساسية للنظام الهيدروليكي، تصميم وتنفيذ دارة القيادة، تحصيل البيانات العملية من النظام، تحليل البيانات للتعرف على النظام، وأخيرًا تصميم وتنفيذ واختبار متحكم مناسب.

سيسهم هذا المشروع في تقديم فهم أعمق لتطبيقات الأنظمة الهيدروليكية والتحكم فيها، مع التركيز على تطوير حلول تساهم في تحسين الأداء وضمان الاستقرار والوثوقية. تعتبر النتائج المتوقعة من هذا المشروع خطوة مهمة نحو تعزيز المعرفة في مجال الأنظمة الهيدروليكية والتحكم بها، وتقديم حلول عملية يمكن تطبيقها في الصناعة.

تتكون الأطروحة من أربعة فصول على الشكل التالي:

1. التعريف بالمنظومة الهيدروليكية.
2. تطوير وتنفيذ دارة القيادة.
3. التعرف التجريبي على المخدم.

التحكم بالمخدم.

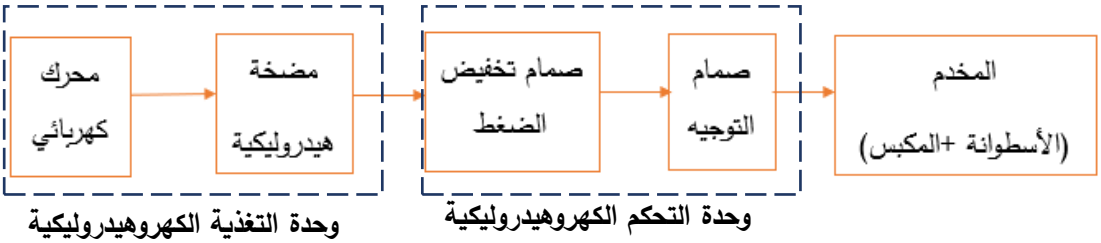
الفصل الأول: التعريف بالمنظومة الكهروهيدروليكية

1.1 مقدمة:

تعتبر المخدمات الهيدروليكية من الأدوات الهامة في التطبيقات المدنية والعسكرية بسبب قدرتها العالية على توليد الطاقة وتمتعها بخصائص عديدة. انتشرت المخدمات الهيدروليكية بشكل واسع في مجموعات متنوعة من الصناعات بسبب صغر حجمها مقارنة مع الطاقة التي تقدمها، وأدائها الأكثر سلاسة عند السرعات المنخفضة، وقدرتها على تطبيق قوة وعزم دوران كبيرين للغاية ولا تزال هذه الأنظمة مستخدمة بكثرة في التطبيقات عالية الأداء مثل أنظمة التصنيع وآلات اختبار المواد ومحاكاة الطيران والسفن والروبوتات.

في التطبيقات الهيدروليكية، يمكن قيادة المخدمات الكهروهيدروليكية عن طريق أوامر الكترونية تتحكم بالتدفق المطلوب، ومع ذلك فإن مشاكل النظام الهيدروليكي هي انعدام خطيتها وانخفاض التخميد، ويصعب في بعض التطبيقات التحكم الدقيق في هذه الأنظمة بسبب اللاخطية، ولتحسين أداء المخدم الكهروهيدروليكي يلزم وجود متحكم مناسب.

1.2 المخطط الصندوقي للدارة الهيدروليكية:



شكل 1-المخطط الصندوقي للدارة الكهروهيدروليكية

1.3 المكونات الأساسية للدارة الهيدروليكية المستخدمة:

1.3.1 وحدة التغذية الهيدروليكية:

صورة 1-وحدة التغذية الكهروهيدروليكية

تتضمن محرك كهربائي يقوم بتشغيل المضخة الهيدروليكية التي تقوم بتحويل الطاقة الميكانيكية إلى طاقة هيدروليكية (قوة وضغط)، بالإضافة إلى صمام تنفيس الضغط الذي يقوم بتحديد الضغط الأعظمي الخارج من المضخة على القيمة $125\ bar$، وصمام توجيه 3/4 يعمل بجهد 24v. كما تحتوي على فلتر الضغط العالي وفلتر خط العودة اللذان يقومان بتنقية السائل الهيروليكي (زيت) من الشوائب والمحافظة

على نظافته.

1.3.2 وحدة التحكم الكهروهيدروليكية :

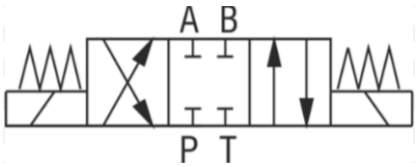
تتضمن وحدة التحكم الصمامين التاليين:

1.3.2.1صمام التوجيه Directional Valve 3/4:

صورة 2-صمام التوجيه

الغرض الأساسي من هذا الصمام هو التحكم باتجاه الجريان باتجاهين متعاكسين إذ يملك ثلاث وضعيات، وضعية إغلاق ووضعيتين فتح تسمحان بمرور السائل باتجاهين متعاكسين، ويملك أربع مسارات : المضخة p والخزان T والمسارين A و B يتصلان بطرفي المخدم. لا

يقبل الصمام تطبيق إشارة جهد متغيرة فإما أن يكون في حالة ON او في حالة OFF وفق اتجاه معين. يتكون بشكل اساسي من ملفين (وشيعتين) ملفوفين على طرفي الصمام، ومنزلقة ونابضين.



شكل 2-وضعيات عمل صمام التوجيه

حالات عمل الصمام وفق الشكل (2):

1. حالة عدم وجود تحريض على الملفات(الوضعية المتوسطة):

يكون الصمام في حالة إغلاق(لا يوجد تدفق للسائل).

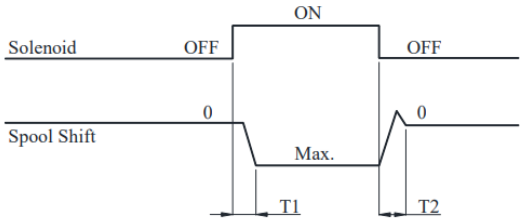
2. حالة وجود تحريض على أحد الملفين: يمر تيار في الملف فيؤدي ذلك الى توليد قوة محركة كهربائية تدفع المنزلقة مبتعدةً عن الملف مما يؤدي إلى فتح الصمام وعبور السائل.

بتلك الآلية السابقة يتم التحكم بجهة الجريان.

موديل الصمام المستخدم هو DSG-01-3C2-D24-N-50.

كما توضح النشرة الفنية الخاصة بالصمام فإن التدفق الأعظمي للصمام هو $63\ L/min$ وضغط العمل الأعظمي هو $315\ Kg_f/cm^2$ ، ويجب تغذيته بتغذية مستمرة (DC) 24v ويكون تيار الحمل الأعظمي 1.1A.

يوضح الشكل (3) شكل استجابة الصمام وأزمنة الاستجابة عند شروط العمل المذكورة في الشكل (3) :



Type	Model Numbers	Changeover Time ms	
		T1	T2
Standard Type	DSG-01-3C2-A※	15	23
	DSG-01-3C2-D※	48	19
	DSG-01-3C2-R※	50	100

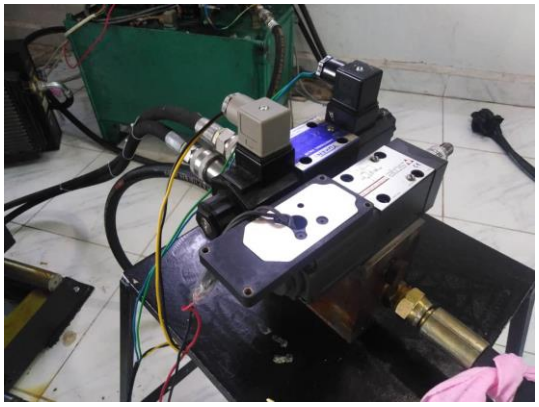
شكل 3-استجابة صمام التوجيه حسب شروط عمل محددة

[Test Conditions]
Pressure : 160 Kgf/cm^2
Flow Rate: 31.5 L/min
Viscosity: 35cSt
Voltage : 100% V
(After coil temperature rise and saturates)

شكل 4-شروط العمل لصمام التوجية حسب النشرة الفنية

في حالة $off \rightarrow on$ كان زمن الاستجابة للصمام $T_1 = 48ms$، وفي حالة $on \rightarrow off$ كان الزمن $T_2 = 19ms$.

1.3.2.2 صمام تخفيض الضغط التناسبي Proportional reducing pressure valve:



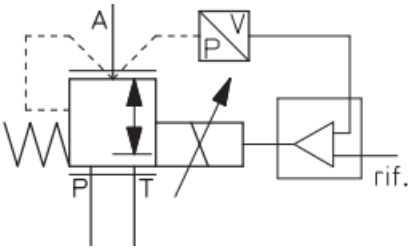
صورة 3-صمام تخفيض الضغط التناسبي ويليه صمام التوجيه

يعمل هذا الصمام الموضح بالصورة (3) على التحكم بالتدفق عن طريق تخفيض الضغط العالي القادم من المضخة. يملك الصمام وضعيتين وثلاث مسارات : المضخة p والخزان T ومخرج الصمام A وتتغير وضعية الصمام بشكل تناسبي من حالة الاغلاق إلى حالة الفتح. يتكون بشكل رئيسي من منزلقة وملف (وشيعة) ملفوف على أحد أطرافه، بالاضافة إلى نابض ارجاع في الطرف الأخر. في حالة عدم تطبيق جهد كهربائي على الملف، يعيد نابض الارجاع المنزلقة إلى وضعها الطبيعي ويكون الصمام في

حالة إغلاق. بتطبيق جهد كهربائي متغير على الملف يتم توليد قوة محركة كهربائية تدفع المنزلقة مبتعدة عن الملف، وبالتالي يزداد ضغط السائل فيزداد التدفق. تتناسب إزاحة المنزلقة مع الجهد المطبق على الملف.

موديل الصمام المستخدم هو RZGO-TERS-PS-010/210/1.

كما توضح النشرة الفنية الخاصة بالصمام، فإن التدفق الأعظمي للصمام $12\ L/min$ وضغط العمل الأعظمي هو $210\ Kg_f/cm^2$.



شكل 5-مخطط صمام تخفيض الضغط

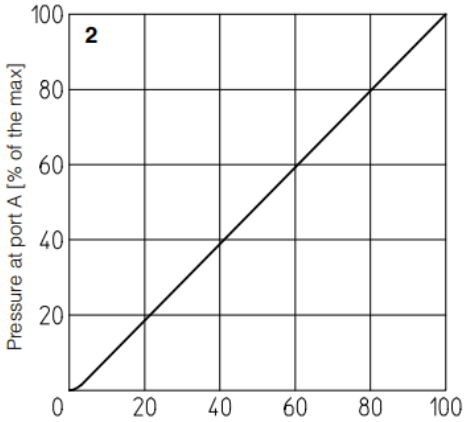
الخصائص الكهربائية للصمام :

مقاومة الملف : $\Omega(3 \sim 3.3)$ من أجل جهد مستمر 12v.

تيار الملف الأعظمي : 2.7A من أجل جهد مستمر 12v.

استطاعة الملف الأعظمية : 40Watt.

وفقاً للنشرة الفنية، من أجل سائل هو زيت من نوع ISO VG 46 وبدرجة حرارة $50C^0$ تم اختبار الصمام ونتج عنه المخطط (الشكل (6)) الذي يوضح العلاقة بين الاشارة المرجعية المطبقة(كنسبة مئوية من القيمة العظمى 12v) والضغط عند مخرج الصمام. نلاحظ أن العلاقة



شكل 6-استجابة صمام تخفيض الضغط

خطية مع وجود تأخير زمني بسيط. عند تطبيق إشارة مرجعية على شكل قفزة، وجد أن زمن الاستجابة كان $40\ ms$.

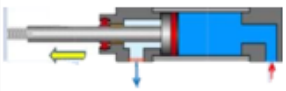
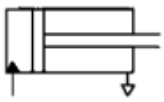
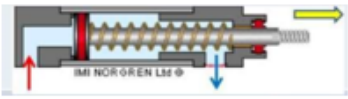
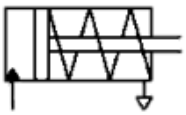
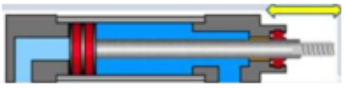
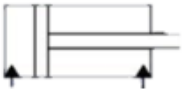
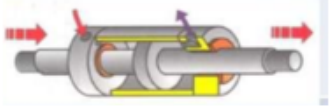
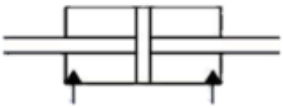
1.4 المخدم Actuator:

يقوم المخدم بتحول الطاقة الهيدروليكية القادمة من المضخة إلى طاقة ميكانيكية تقوم بتحريك الطاولة بحركة خطية باتجاهين متعاكسين.

المخدم المستخدم هو عبارة عن اسطوانة ومكبس. يوجد عدة أشكال للاسطوانات (الشكل(7)) الطاقة التي يمكن استخدامها حسب التطبيق المطلوب والاسطوانة المستخدمة هي اسطوانة ثنائية

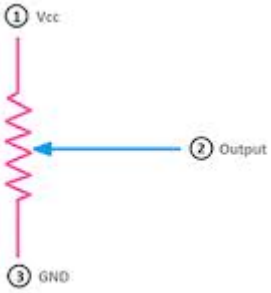
صورة 4-المخدم مع الطاولة

التأثير وثنائية النهاية، يمكن فيها أن يتعرض كلا سطحي المكبس للضغط العالي وبالتالي يمكن تحريك الحمل في اتجاهين متعاكسين. إن طول شوط المكبس المستخدم هو $74mm$.

الشكل التوضيحي	الرمز	اسم العنصر
		أسطوانة أحادية التأثير، أحادية النهاية
		أسطوانة أحادية التأثير، أحادية النهاية مع نابض إرجاع
		أسطوانة ثنائية التأثير، أحادية النهاية
		أسطوانة ثنائية التأثير، ثنائية النهاية

شكل 7-انواع اسطوانات الطاقة

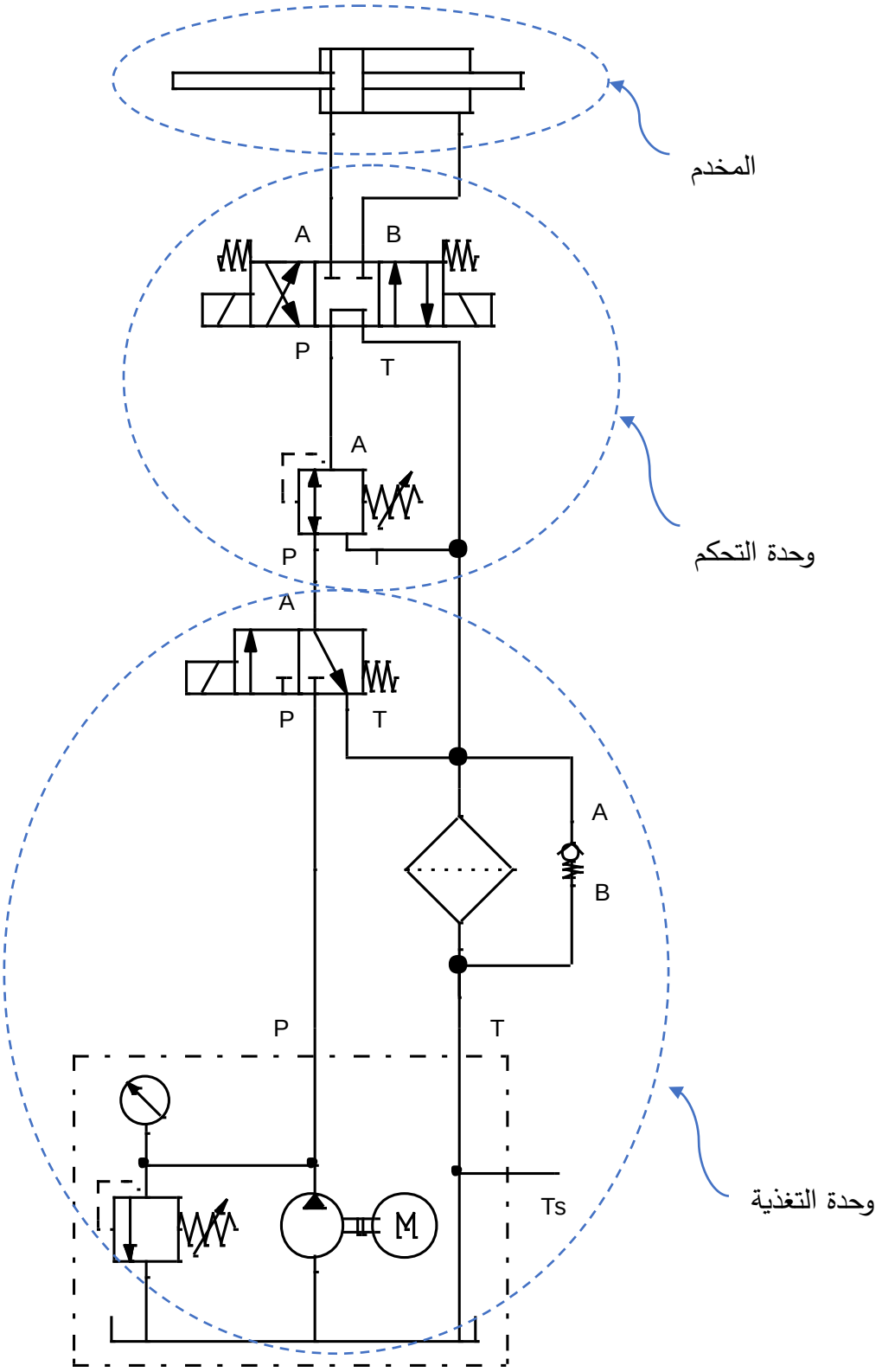
يتوضع المخدم أسفل الطاولة ويتصل بها بواسطة ذراع، كما يتصل مع المخدم حساس إزاحة (مقسم جهد) Potentiometer والذي هو عبارة عن مقاومة متغيرة تعمل عمل مقسم الجهد الشكل (8)، تتصل مع ذراع المخدم وتقوم بتحديد موضع الطاولة الحالي من خلال قياس فرق الجهد بين نقطة الوقوف الحالية والأرضي ويتم تحويل قيمة الجهد المقاسة إلى مسافة من خلال ضربها بمقلوب ربح مقسم الجهد. يتم تحديد ربح المقسم من خلال معرفة طول المنزلقة والتغذية المطبقة، طول المنزلقة



شكل 8-مقسم الجهد potentiometer

للمقسم المستخدم هو 300mm ويقبل تغذية مستمرة حتى 28v. تم تغذية مقسم الجهد المستخدم ب 10v وبالتالي يكون ربحه $\frac{1}{30}\frac{volt}{mm}$. تم تحديد مجال عمل المخدم من خلال قياس خرج مقسم الجهد عند كل من بداية الشوط ونهاية الشوط فوجد [1.05 3.56]v.

يوضح الشكل (9) المخطط العام للدارة الكهروهيدوليكية:

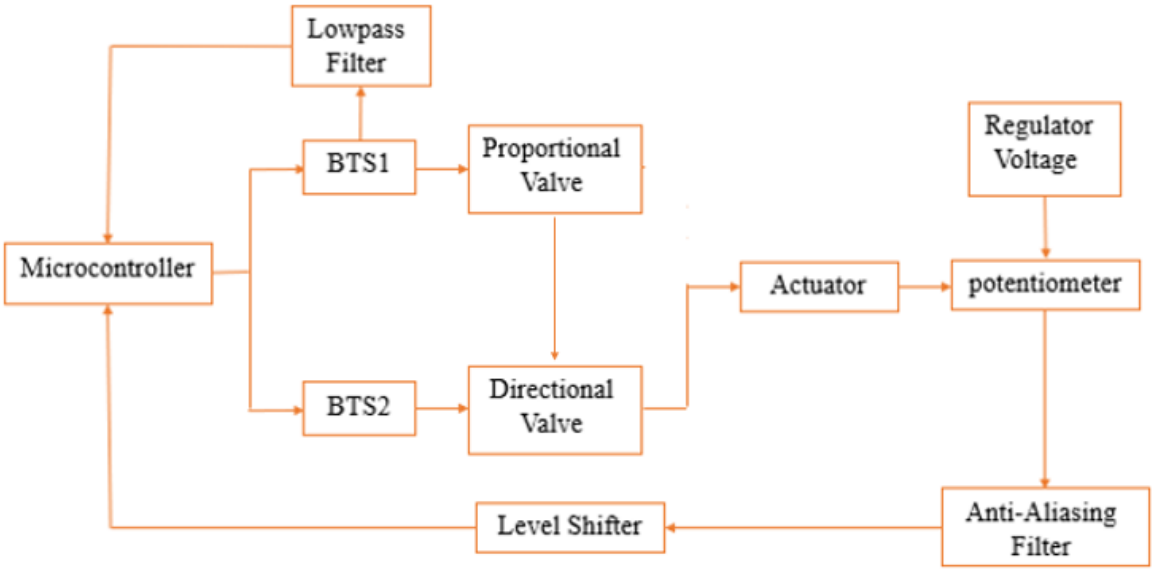


شكل 9-المخطط العام للدارة الكهروهيدروليكية

الفصل الثاني: تطوير وتنفيذ دارة القيادة

2.1 مقدمة:

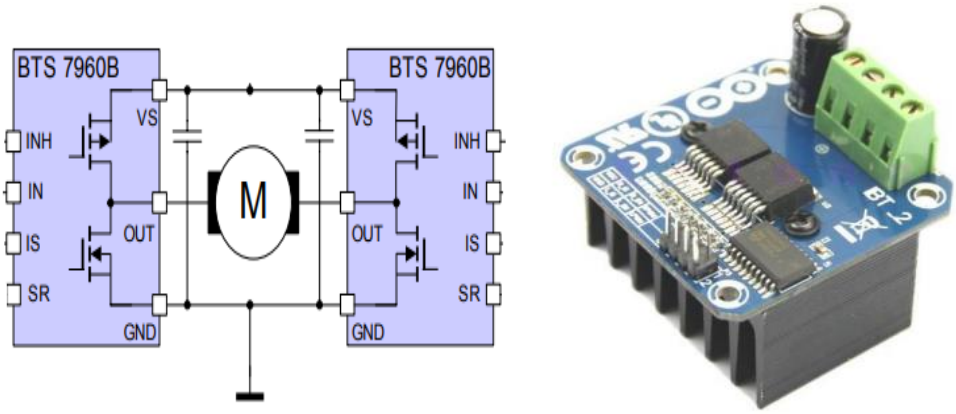
تم تطوير دارة قيادة موثوقة للمخدم الكهروهيدروليكي تقوم بتأمين كافة متطلبات التشغيل والتحكم بصمام تخفيض الضغط وصمام التوجيه اللذان هما عنصرا التحكم في المنظومة الهيدروليكية. تتكون الدارة من وحدتي قيادة BTS 7960 بشكل رئيسي واللتان تقومان بتأمين الاستطاعة اللازمة لعمل الصمامين السابقين بالإضافة إلى دارات إضافية ملحقة مثل دارة ملائمة ودارات ترشيح ودارة تنظيم الجهد. يوضح المخطط الصندوقي التالي الشكل العام لدارة القيادة:



شكل 10-المخطط العام لدارة القيادة

2.2 وحدة القيادة BTS7960 :

تم استخدام وحدتي قيادة BTS7960 المبينة بالصورة (5) من أجل قيادة كل من صمام التدفق وصمام التوجيه من خلال تأمين الاستطاعة اللازمة لعمل الصمامين. بدايةً تم استخدام وحدة التحكم LM298 ولكن بسبب عدم تحملها لتيار الحمل (3A) وعدم امتلاكها لمبرد كافي، تم اللجوء إلى الوحدة BTS7960 التي تتحمل تيار يصل ل 43A مع امتلاكها لمبرد كافي، وكما أنها تستخدم ترانزستورات Mosfet التي تتمتع بكفاءة عالية مقارنة مع الترانزستورات الثنائية التي تستخدمها الوحدة LM298، لذلك تعتبر الوحدة BTS7960 أنسب للمشروع المطروح.



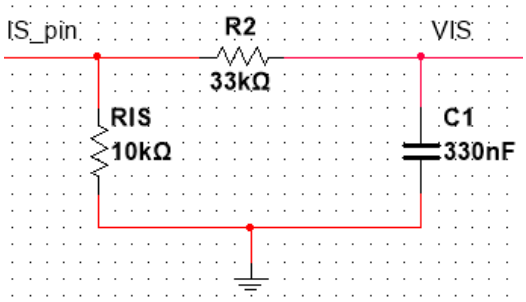
صورة BTS7960-5

مميزات الوحدة BTS7960 الموضحة في النشرة الفنية :

1. جهد التغذية : 6~27v.
2. تيار الحمولة الأعظمي: 43A.
3. جهد التحكم: 3.3~5v.
4. اشارة التحكم: مستوى (Level) او بتعديل عرض النبضة (PWM) بتردد يصل حتى 25kHz.
5. تؤمن الحماية من تيار قصر جهد الأرضي، الحماية من تيار قصر جهد التغذية، الحماية من تيار قصر الحمولة.
6. الحماية من ارتفاع الحرارة فأي ارتفاع في الحرارة يتم اغلاق مرحلة الخرج لحين تصفير الحالة.

أهم ميزة للدراة BTS7960 أنها تتيح إمكانية تحسس تيار الحمل.

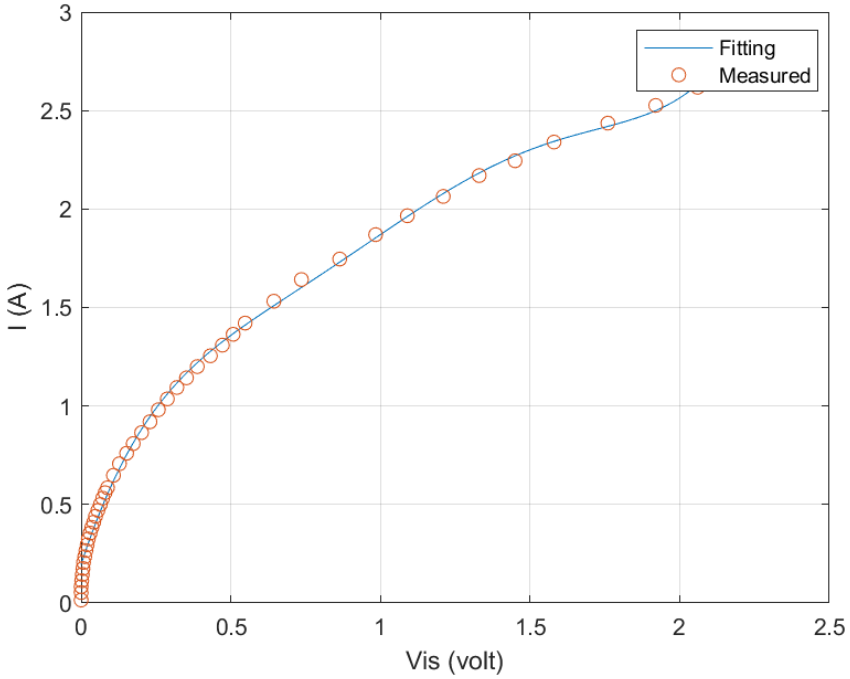
سيتم قياس تيار الحمولة لصمام التوجيه من النقطة IS وفق الدارة المبينة في الشكل(11):



شكل 11-دارة مرشح منخفض للتيار

من أجل المقاومة $R_{IS} = 10k\Omega$ تم الحصول على أكبر قيمة جهد $V_{IS} = 2.25volt$ وهي مناسبة كقيمة دخل للمحول A/D.

من أجل قياس التيار، تم تحديد العلاقة بين الجهد V_{IS} وتيار الحمل I وذلك من خلال أخذ عدة قراءات للجهد والتيار حيث تم وضع مقياس تيار على التسلسل مع الحمل من أجل أخذ قراءة التيار وتم أخذ قراءة الجهد V_{IS} من خلال وصل المخرج IS إلى راسم الاشارة. تم أخذ عدة قراءات بخطوة مناسبة وتم مسح كامل مجال التغذية لصمام تخفيض الضغط التناسبي [0~12]v وتسجيل قراءات كلا من الجهد V_{IS} والتيار I . ثم تم رسم النقاط وتم الباسها بأفضل منحني على الشكل التالي:

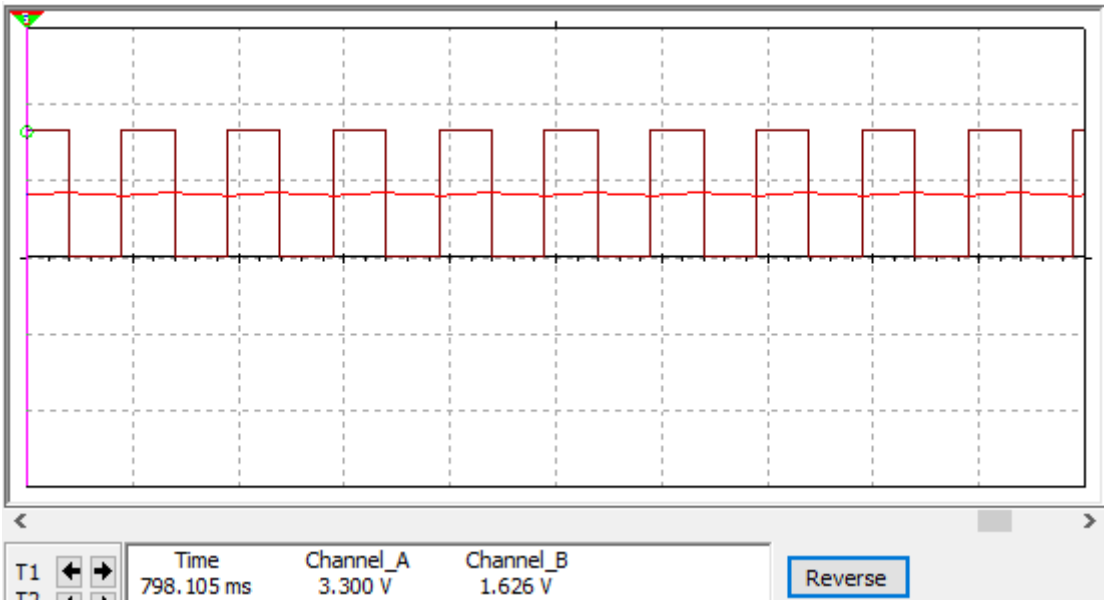


شكل 12-العلاقة بين الجهد Vis وتيار الحمولة I

وتم استنتاج علاقة منحني الالباس وزرعها في المتحكم من أجل حساب قيمة التيار المقابلة لقيمة الجهد V_{IS} المقاسة وكانت العلاقة من الشكل :

$$I = 0.6677V_{IS}^5 - 3.775V_{IS}^4 + 7.911V_{IS}^3 - 7.814V_{IS}^2 + 4.685V_{IS} + 0.198$$

كما تمت إضافة دارة مرشح تمرير منخفض كما في الشكل(11) مكون من المقاومة R_2 و المكثف C_1 من أجل تحويل إشارة التحكم النبضية (PWM) إلى إشارة مستمرة. تم اختيار قيم المقاومة والمكثف للحصول على تردد قطع $f = \frac{1}{2\pi RC} = 15Hz$ وهو بعيد بشكل كافي عن تردد حزمة النظام $7Hz$.



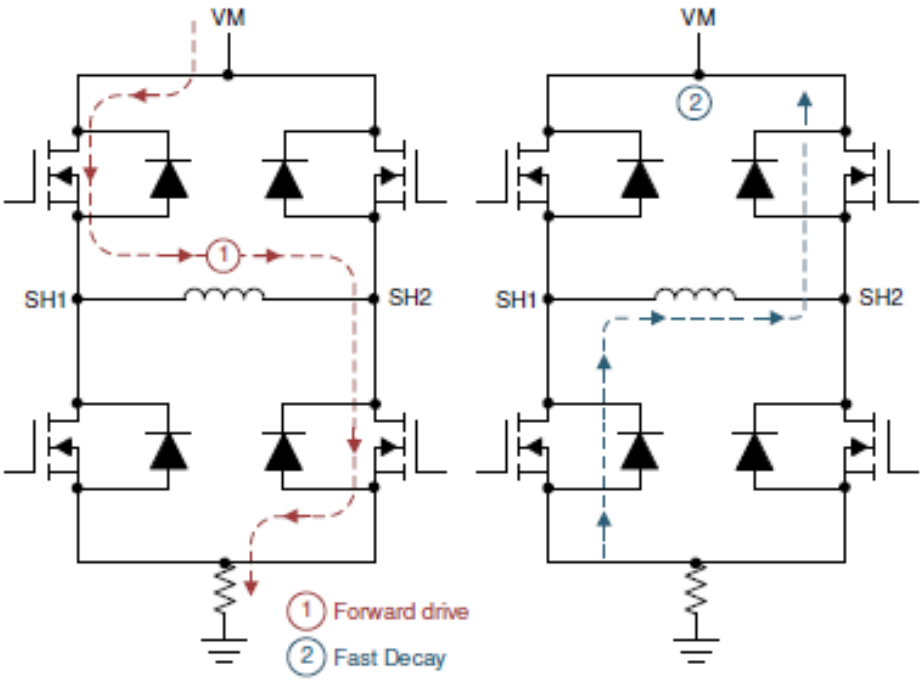
شكل 13-تحويل الاشارة النبضية إلى اشارة مستمرة

يوضح الشكل (13) أعلاه كيف يقوم المرشح بتحويل إشارة التحكم النبضية إلى إشارة مستمرة متوسطة القيمة بالنسبة لإشارة التحكم.

توضح الصورة (6) آلية التحكم المعتمدة للتحكم في صمام تخفيض الضغط وصمام التوجيه.

حيث انه في صمام التوجيه يتم استخدام كلا فرعي الجسر H من أجل التحكم بجهة جريان السائل في الدارة الكهروهيدروليكية وكل فرع يكون مسؤول عن اتجاه معين إما Forward او Backward. أما في صمام تخفيض الضغط التناسبي فيتم فيه استخدام فرع واحد فقط من الجسر من أجل التحكم في قيمة الضغط على مخرج الصمام من خلال التحكم في إزاحة المنزلقة ولا حاجة

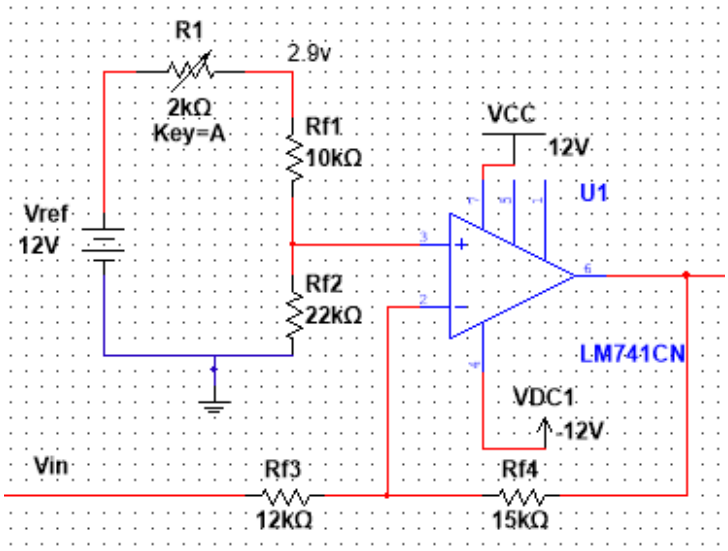
لاستخدام الفرع الاخر لإغلاق الصمام بسبب وجود نابض إرجاع موجود في بنية الصمام كما تم شرحه سابقاً.



صورة 6-آلية التحكم جسر H

2.3 دارة الملائمة بين خرج مقسم الجهد (Potentiometer) ودخل المحول ADC :

يقتصر عمل الدارة على تخفيض مستوى خرج من [1.05 ~3.56]v إلى المستوى [0 ~3.3]v ليتلائم مع دخل Arduino Due الذي لا يمكن أن يستقبل او يرسل قيمة اكبر من 3.3v. يوضح الشكل (14) نمذجة الدارة باستخدام برنامج Multisim.



شكل 14-دارة ملائمة جهد خرج ال potentiometer مع دخل المحول A/D

يكون خرج الدارة السابقة مقلوب أي من أجل دخل [1.05 3.56]v يكون الخرج [3.3 0]v، تم أخذ هذا القلب بعين الاعتبار في البرنامج.

2.4 دارة مرشح تمرير منخفض تشابهي Low Pass Filter Circuit:

تم اختيار المرشح من نوع Butterworth وبتشكيلة Sallen Kay لانه يتميز بحزمة تمرير وحزمة منع مسطحة بحيث يحافظ على الربح (ربح المرشح واحدي)، وكذلك الأمر في حزمة المنع مما يجعل حزمة العبور عريضة. من أجل الحصول على حزمة عبور ضيقة تم اختيار مرتبة المرشح من المرتبة الثالثة.

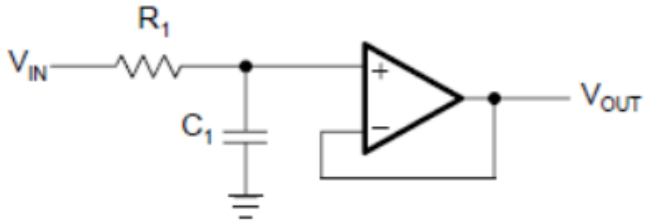
يقوم المرشح التشابهي بإزالة ضجيج التردد العالي المتراكب على الإشارة التشابهية قبل أن تصل إلى المحول A/D. يشمل هذا قمم الضجيج الخارجي، بينما لا يمكن للمرشح الرقمي القضاء على هذه القمم التي تتراكب على الاشارة التشابهة. يعمل المرشح على إزالة ضجيج الترددات الأعلى من تردد نيكويست أو يقللها بشكل كبير.

من المشروع السابق [1] تم اقتباس عرض حزمة النظام $BW = 7Hz$ وعليه يمكن استرجاع الإشارة عملياً إذا كان تردد التعيين أكبر بكثير من 7Hz . لذا تم افتراض $f_s = 500\ Hz$ بما المتحكم الرقمي الذي سيستخدم يتيح هذه السرعة، ولتحقيق شرط نيكويست يجب أن يكون تردد قطع المرشح $f_c \leq \frac{1}{2} f_s$. إذن تم اختيار $f_c = 100\ Hz$ وهو مناسب لحالة النظام المدروس.

سيتم حساب بارامترات المرشح على مرحلتين :

1. مرشح مرتبة أولى:

يبين الشكل (15) شكل مرشح المرحلة الأولى :



شكل 15-مرشح تمرر منخفض تشكيلة Sallen Kay من المرتبة الأولى

يتم حساب معاملات المرشح من العلاقة التالية:

$$R_1 = \frac{a_0}{2\pi f_c C_1}$$

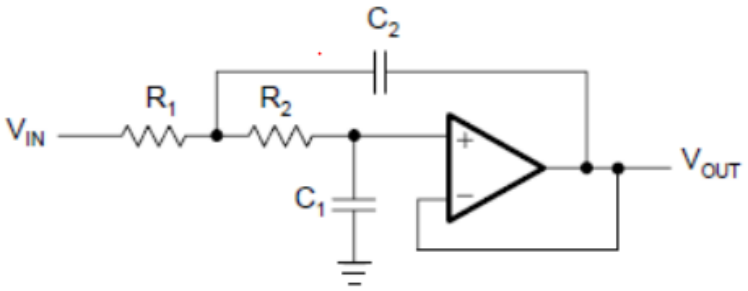
حيث تم اختيار قيمة المكثفة $\boldsymbol{C_1 = 100nF}$ حسب القيم المتوفرة و تم الحصول على قيمة $a_0 = 1$ من الجدول(1) الذي يعطي قيم هذه الثوابت حسب مرشحات Butterworth.

وعليه تكون قيمة المقاومة:

$$\boldsymbol{R_1 = 15.9\ K\Omega}$$

2. مرشح مرتبة ثانية:

يبين الشكل (16) شكل مرشح المرحلة الثانية:



شكل 16-مرشح تمرر منخفض تشكيلة Sallen Kay من المرتبة الثانية

يتم حساب معاملات المرشح من العلاقات التالية:

$$R_{1,2} = \frac{a_1 C_2 \mp \sqrt{a_1^2 C_2^2 - 4 b_1 C_1 C_2}}{4\pi f_c C_1 C_2}$$

$$C_2 \geq C_1 \frac{4 b_2}{a_2^2}$$

تم اختيار قيمة المكثفة $C_1 = 47nF$ ، وقيم الثوابت $a_2 = 1$, $b_2 = 1$ من الجدول (1).

وعليه يمكن حساب قيم المكثف C_2 والمقاومات $R_{1,2}$:

$$\rightarrow C_2 \geq 188nF$$

تم اختيار $\boldsymbol{C_2 = 330nF}$ حسب القيم المتوفرة.

$$\rightarrow R_1 = 5824.8\ \Omega\ , R_2 = 28037\ \Omega$$

تم تقريب قيم المقاومات لقيم متوفرة على الشكل :

$$\rightarrow \boldsymbol{R_1 = 5.6K\Omega\ , R_2 = 27K\Omega}$$

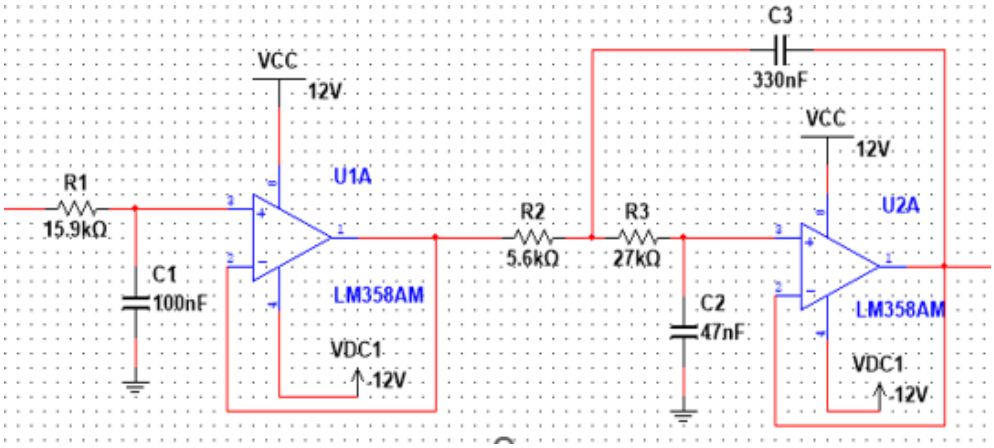
تم حساب الانزياح في تردد قطع المرشح الناتج عن تعديل قيم المقاومات فكان على الشكل:

$$\Delta f_c = 3Hz$$

n	i	a_i	b_i	$k_i = f_{Ci} / f_C$	Q_i
1	1	1.0000	0.0000	1.000	—
2	1	1.4142	1.0000	1.000	0.71
3	1	1.0000	0.0000	1.000	—
	2	1.0000	1.0000	1.272	1.00
4	1	1.8478	1.0000	0.719	0.54
	2	0.7654	1.0000	1.390	1.31

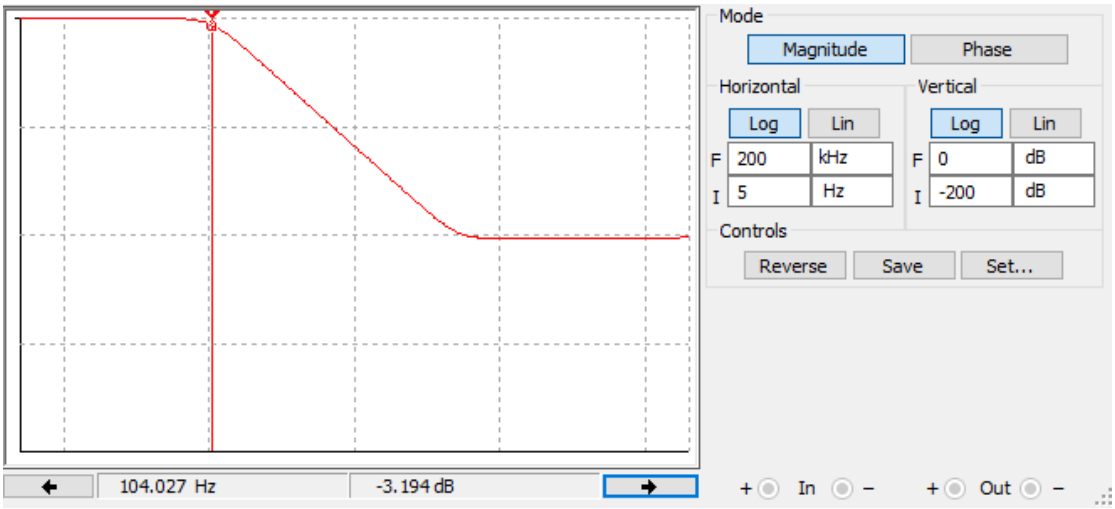
جدول 1-قيم الثوابت حسب مرشحات Butterworth

تم نمذجة دارة المرشح السابقة باستخدام *Multisim* كما يوضح الشكل (17):



شكل 17-مرشح تمرير منخفض نوع Butterworth تشكيلة sallen kay من المرتبة الثالثة

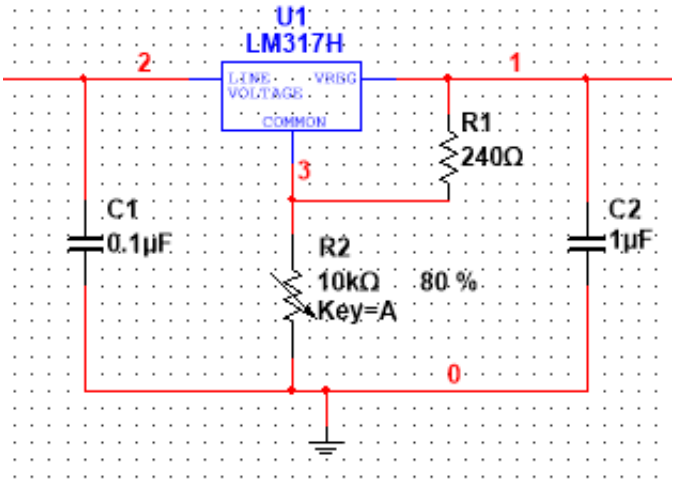
يبين الشكل (18) مخطط بود للمرشح والذي يوضح تردد قطع المرشح $f_c \approx 103Hz$ والموافق لربح $-3dB$. تم سابقاً تفسير الانزياح في قيمة تردد القطع والناتج عن تغيير في قيم المقاومات بما يتلاءم مع القيم المتوفرة.



شكل 18-مخطط بود لمرشح التمرير المنخفض من المرتبة الثالثة

2.5 دارة تنظيم الجهد Regulator Voltage Circuit:

الهدف من الدارة هو تأمين جهد 10v منظم ودقيق من أجل تغذية عنصر التغذية العكسية وهو ال potentiometer الذي هو عبارة عن مقاومة متغيرة تعمل عمل مقسم الجهد. تم استخدام الشريحة LM317 من أجل تحقيق ذلك وفق الدارة التالية:

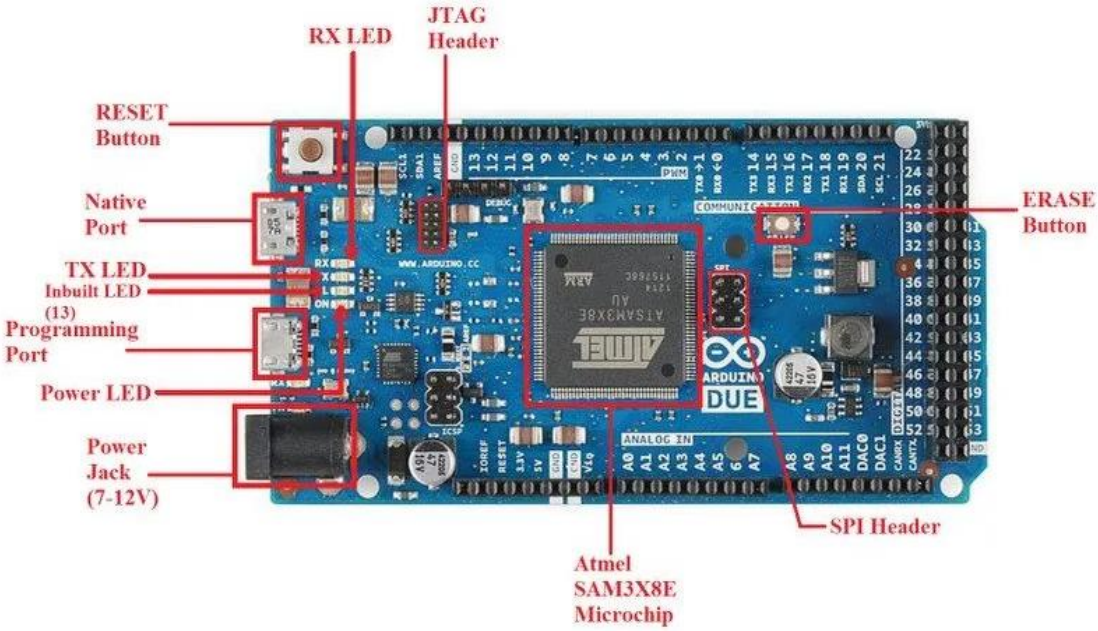


شكل 19-دارة منظم جهد 10v

تم تغذية الدارة السابقة بجهد 12v وضبط قيمة المقاومة المتغيرة للحصول على قيمة جهد الخرج المطلوبة 10v لتغذية ال potentiometer.

2.6 بطاقة المتحكم الصغري Arduino Due:

Arduino Due هو لوحة تطوير، كما توضح الصورة (7) ، تحتوي على معالج ARM Cortex-M3 بسرعة 84MHz. تحتوي اللوحة على 54 دبوس إدخال/إخراج رقمي، 12 منها يمكن استخدامها كمخارج PWM، 12 مدخل تشابهي، 4 منافذ اتصال تسلسلي و مخرجين DAC. . ويجب التحذير من أن الجهد الأعظمي المسموح للمداخل والخارج هو 3.3V.



صورة 7- بطاقة Arduino DUE

ما يميز أداء بطاقة المتحكم أردينو ديو [2] أنها تعتمد معالج نوع ARM [3] يملك المواصفات التالية:

- ✓ نواة بـ32bit تسمح بعمليات على بيانات بعرض 4 بايت في دور ساعة وحيد للـCPU
- ✓ تردد ساعة الـCPU 84MHz.
- ✓ ذاكرة 96 Kbytes RAM.
- ✓ ذاكرة الكود 512kBytes.
- ✓ DMA تريح الـCPU من مهام ذاكرة ضخمة.
- ✓ بالإضافة إلى منفذين للـDAC(12bit).

المواصفات التقنية للبطاقة:

- ✓ جهد الدخل $7\sim12V$
- ✓ الجال الأعظمي لتغير الجهد: 6~16V
- ✓ جهد التشغيل النظامي 3.3V
- ✓ التيار المستمر الإجمالي على خطوط I/O هو 130 mA.
- ✓ التيار المستمر الأعظمي للمخرج 3.3V هو 800 mA.
- ✓ الثنائي الضوئي المدمج مربوط مع المخرج 13 وهو منفذ PWM ايضاً
- ✓ كل منفذ I/O يمكن أن يقدم تيار من 3 mA / 15 mA ويستهلك تيار من 6 mA / 9 mA ويمتلك مقاومة للتغذية $100\ k\Omega$.

2.7 المحول التشابهي الرقمي A/D:

يأتي هذا المحول ضمن بطاقة المتحكم بدقة تصل حتى (12bits) كما هو وارد في نشرة المواصفات الفنية لبطاقة الأردينو ديو. إن دقة المحول A/D يجب أن تكون أكبر بكثير من دقة حساس التغذية العكسية (potentiometer). تم سابقاً تحديد حساسية ال potentiometer وهي:

$$\frac{(3.65-1.05)[V]}{(74-0)[mm]}=34[mV/mm]$$

لذلك تكون دقة المحول A/D المطلوبة من رتبة 5 إلى 10 أمثال هذه الدقة أي

6.8 – 3.4mv. يوافق هذا على الأقل الدقة

$$ADC-resolution=\frac{3300[mV]}{3.4[mV]}=970$$

وهي تقابل دقة 10bits ولكن تم اعتماد الدقة 12bits. من جهة ثانية فإنه لا فائدة لهذه الدقة إذا كان مستوى ضجيج حساس التغذية العكسية أكبر من دقة المحول A/D. تم مراعاة هذا الأمر عند تصميم مرشح التغذية العكسية حيث تم أخذ دقة المحول بعين الاعتبار عند تحدد رتبة المرشح بحيث يكون مطال الإشارة المرشحة في حزمة المنع أقل من دقة المحول A/D.

2.8 مولد إشارة الـPWM:

يأتي مولد النبضات المعدل عرضياً ايضاً ضمن بنية المتحكم وهو متغير الدقة ويتبع تردد ضبط مولد النبضات. لذلك لابد من تحديد دقة الـPWM المناسبة.

إن شرط تحديد دقة الـPWM يجب أن يكون أكبر أو يساوي دقة الـA/D أي أكبر أو يساوي 10bit.

من جهة أخرى يجب تحديد تردد الـPWM على أن يكون أكبر بكثير من عرض حزمة النظام المتحكم به.

من جهة ثانية يجب مراعاة أن زيادة التردد يضاعف من الأثر الحراري المتولد في ملف الصمام لذلك لابد من التوازن بين تخفيض التأثير الحراري وتحقيق سرعة الاستجابة.

ولمراعاة الدقة والتردد فقد تم اعتماد دقة الـPWM هي 12bits وبتردد 1kHz، إذ لوحظ أثناء العمل أنه عند استخدام ترددات أعلى من 1kHz يبدء أداء ملف الصمام بالتراجع، إذ تزداد العتبة الدنيا لحركة المنزلقة بسبب الضياعات في الطاقة بفعل الأثر الحراري المتولد في الملف.

2.9 برنامج المتحكم الصغري:

كما أسلفنا فإن مهمة المتحكم الصغري في بطاقة الأردينو DUE هي توليد إشارات التحكم اللازمة لدارة القيادة سواء في نمط التحكم أو نمط التعرف، كما يقوم تحصيل كلا من بيانات الموضع والتيار المفلترة تشابهياً من حساسات التغذية العكسية. يتم بعدها تطبيق المرشح الرقمي على هذه البيانات للتخلص من الضجيج المتراكب على الاشارات وزيادة درجة الترشيح ضمن حزمة استجابة النظام.

تم تحديد تردد التقطيع المناسب لتحصيل بيانات إشارات الخرج بالاعتماد على المعرفة المسبقة في نظام المخدم الكهروهيدروليكي والذي يملك عرض حزمة $BW = 7Hz$، بالتالي تم اختيار تردد التقطيع بحيث يكون أكبر بكثير من عرض حزمة النظام $f_s = 500Hz$ والذي يقابل دور هو $T_s = 2ms$. لذلك فقد تم تصميم مقاطعة مؤقت تحدث كل $2ms$. يتم فيها تحصيل حالة مرشحة لبيانات الموضع والتيار وضبط مؤقت القاعدة الزمنية المستخدم لمراقبة إشارات الأمر وحالة عمل البرنامج.

ولكي لا تحدث عملية تصادم بين إجرائية الكتابة في الموقع الذاكري المخصص لبيانات الموضع والتيار وإجرائية القراءة منها، يتم نسخ عينة إضافية من البيانات في الوقت الذي تُحجب فيه مقاطعة المؤقت ما يمنع حدوث ظاهرة الدخول الآني لإجرائيتين في الذاكرة.

ويتألف البرنامج ككل من البرمجيات التالية:

1) برمجيات تهيئة المؤقتات لتأمين قاعدة زمنية مضبوطة وتهيئة مولد إشارات الـPWM وتهيئة المداخل والمخارج الرقمية وتهيئة المحول ADC ومنافذ الـPWM.

2) برمجية مراقبة إشارات الأوامر والاستجابة للموضع.

3) برمجية مراقبة دورة عمل المتحكم.

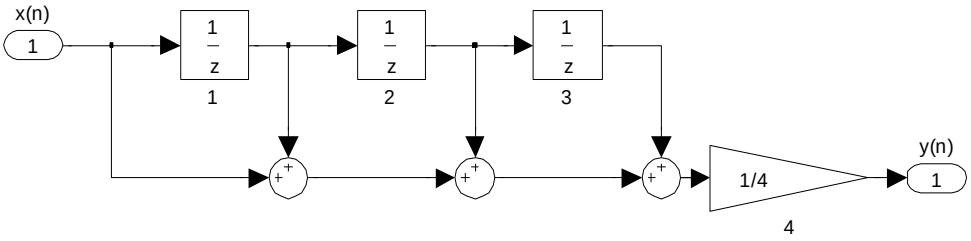
4) برمجية مقاطعة المؤقت.

2.10 المرشح الرقمي:

يستخدم المرشح الرقمي تقنيات الـover-sampling والوسطي لتقليل الضجيج ضمن مجال حزمة النظام. نظرًا لأن الترشيح الرقمي يحدث بعد عملية التحويل A/D، فيمكن إزالة الضجيج المتولد أثناء عملية التحويل (مثل ضجيج التكميم) والذي لا يمكن ترشيحه باستخدام المحول التشابهي. من السهولة برمجة المرشح الرقمي مما يسمح ببرمجة تردد قطع المرشح. إن زيادة تردد التقطيع يزيد من خطأ التكميم والذي بدوره يتطلب مرشح رقمي بتردد وطول أكبر من جهة أخرى والذي عادة ما يكون تردده أكبر بكثير من تردد التقطيع. تعطى معادلة المرشح الفرقية بالشكل:

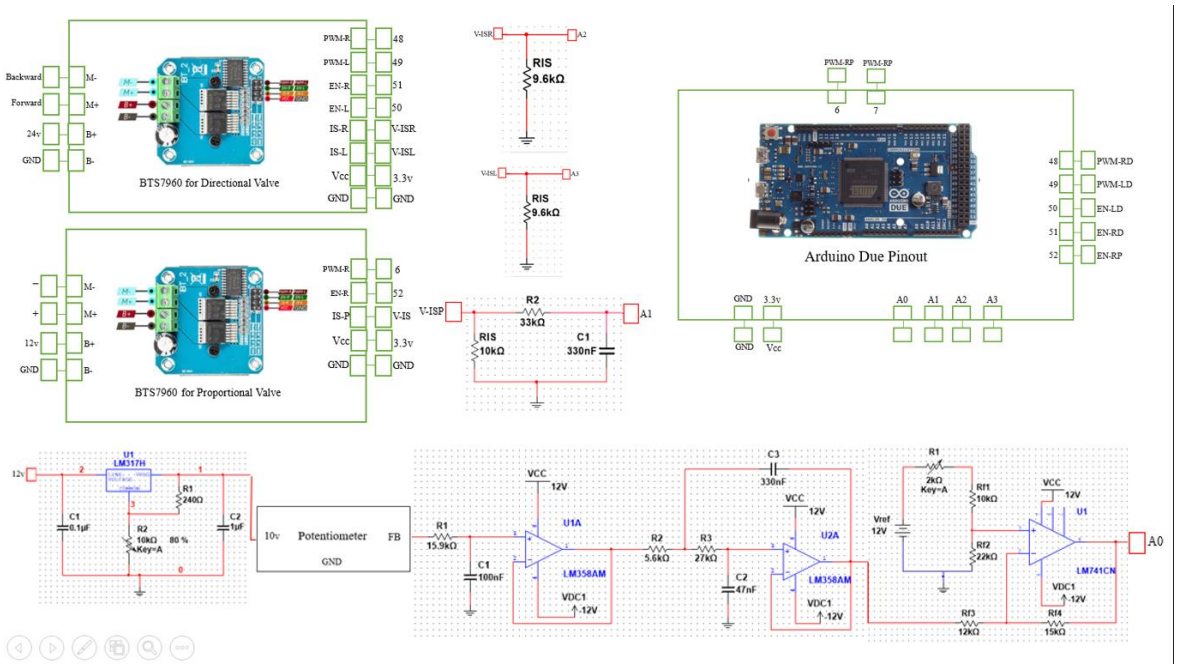
$$y(n) = \frac{1}{M+1}\sum_{k=0}^{M} x(n-k)$$

تم تنفيذ هذا المرشح الوسطي باعتبار أربع عينات وثلاث مراحل تأخير كما يظهر في الشكل (20).



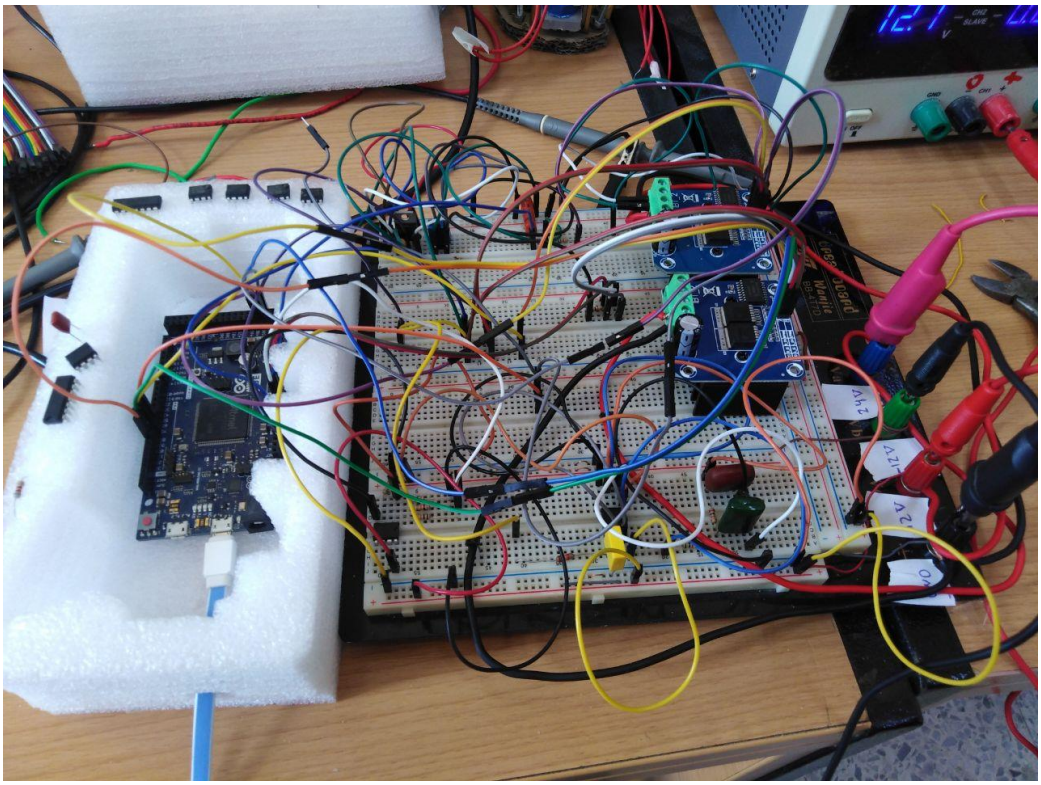
شكل 20-المرشح الوسطي

يوضح الشكل (21) المخطط العام لدارة القيادة :



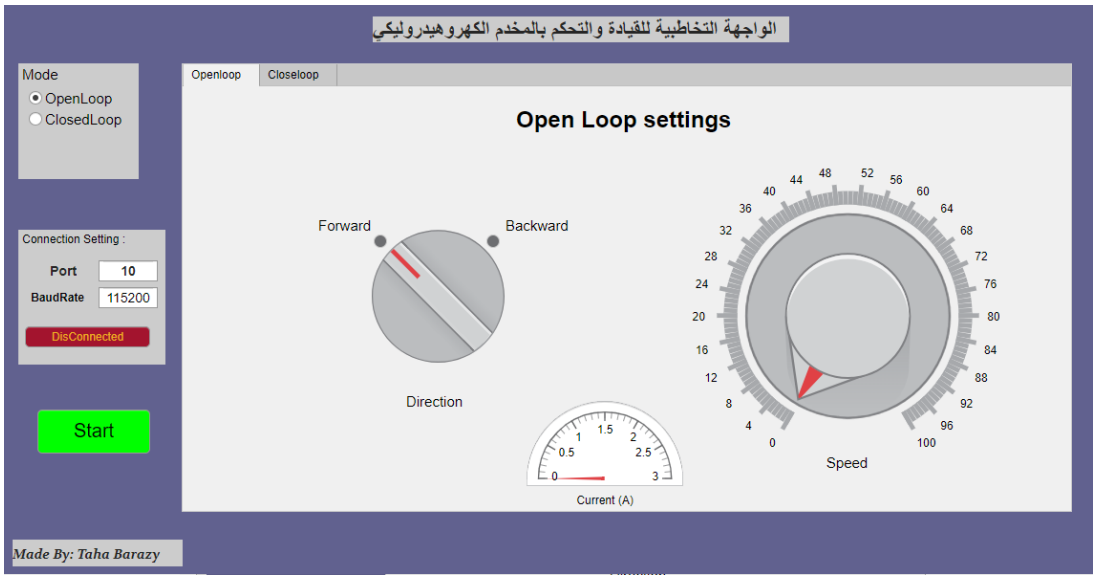
شكل 21- المخطط العام لدارة القيادة

يوضح الشكل (22) الشكل الحقيقي لدارة القيادة أثناء الاختبار:

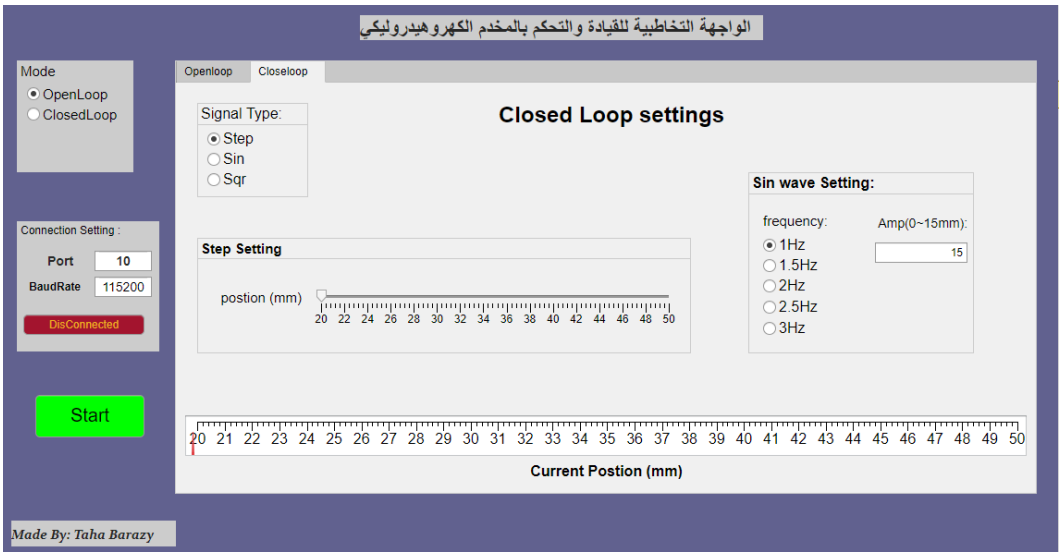


شكل 22-دارة القيادة أثناء الاختبار

من أجل تسهيل عملية القيادة والتحكم بالمخدم الكهروهيدروليكي، تم تصميم الواجهة التخاطبية الموضحة في الصورة(8-9) في بيئة ماتلاب :



صورة 8-الواجهة التخاطبية للقيادة والتحكم بالمخدم نمط Open loop



صورة9 - الواجهة التخاطبية للقيادة والتحكم بالمخدم نمط Closed loop

يتم في نمط الدارة المفتوحة (Open loop) قيادة المخدم من خلال تحديد جهة وسرعة الحركة حيث تقابل قيمة السرعة قيمة جهد الدخل المطبق (12v من أجل سرعة 100%)، ويمكن في هذا النمط ملاحظة قيمة المنطقة الميتة (Dead zone) حيث لا تتحرك الطاولة عند تطبيق إشارة سرعة أقل من 12% (1.44v). كما يمكن مرقبة تيار الحمولة بشكل مستمر من القائس Current.

أما في نمط الدارة المغلقة (Closed loop)، يتم فيها التحكم في المخدم من خلال اختيار نوع إشارة الدخل (step-sin-sqr). في حالة اختيار إشارة دخل قفزة Step يجب تحديد مطال الإشارة أو الموقع المطلوب من خلال Step setting. من أجل تطبيق قطار من النبضات يمكن اختيار نوع الإشارة sqr. أما في حالة تطبيق إشارة جيبية Sin يمكن فيها تحديد التردد ومطال الإشارة (0~15mm) من sin wave setting.

تم تحديد مجال عمل المخدم هو من 20mm إلى 50mm حيث وجد أنه أفضل مجال خطي لعمل المخدم. يمكن مراقبة موقع الطاولة الحالي من القائس Current position.

كذلك يجب التأكد من تهيئة إعدادات الاتصال مع المتحكم من Connection setting قبل إجراء أي تجربة.

الفصل الثالث: التعرف التجريبي

3.1 مقدمة

يهدف التعرف إلى بناء نماذج رياضية من أصل بيانات دخل وخرج. وهي مسألة فرعية مهمة في علم الإحصاء، كذلك العديد من طرق التعرف وأدوات التحليل تكون خصائصها لها أصل في الإحصاء. بدأ تطور تعريف النظام في الستينيات [4]. كانت القوة الدافعة المهمة لهذا التطور هي الاهتمام المتزايد بالتحكم المعتمد عل إيجاد النموذج والذي حفزه عمل كالمن في مجال التحكم الأمثلي. منذ ذلك الحين، شهد مجال تعريف النظام نموًا سريعًا وهو اليوم مجال بحث راسخ.

من وجهة نظر هندسة التحكم والنظم يستخدم التعرف لأهداف متعددة نذكر منها:

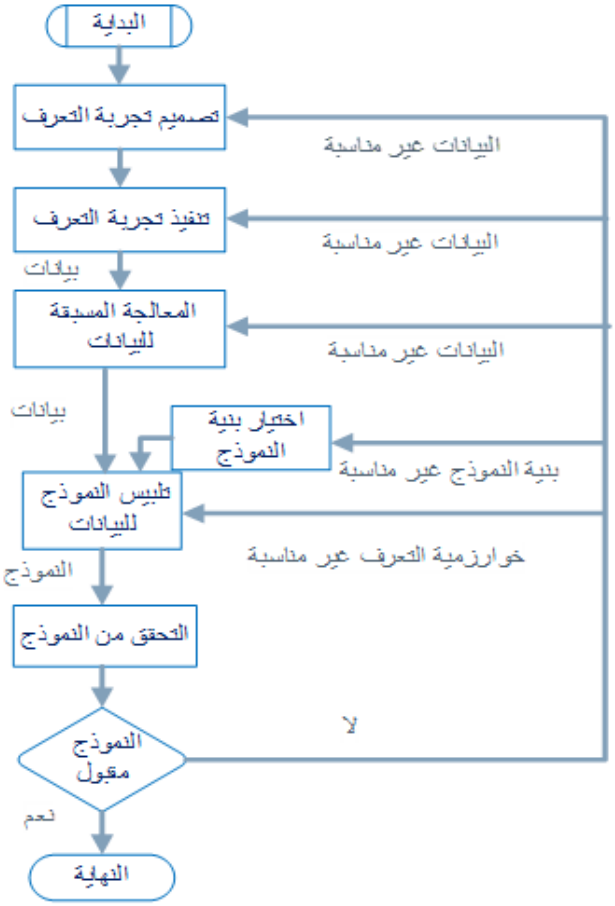
- ✓ في النمذجة والمحاكاة، لأن النموذج الناتج يمكنه محاكاة سلوك لا يستطيع التقاطه نموذج المبدأ الأول.
- ✓ في تصميم المصححات ما يسمح بتصميم المتحكم الأكثر ملائمة لسلوك النظام في الحلقة المغلقة.
- ✓ في التنبؤ في خطوة واحدة للأمام أو بعدة خطوات تمثل أفق معين في المستقبل القريب.
- ✓ في كشف أخطاء النظام عن طريق رصد البواقي أو خطأ المتنبئ.

يمكن تقسيم مسألة التعرف إلى عدد من المراحل التكرارية :

1. تصميم تجربة التعرف، وهو المحتوى الأهم لتجربة التعرف. وإن أحد أهم عوامل نجاح التجربة أن تنفذ التجربة في ظروف أقرب ما يكون فيها من النظام.
2. جمع البيانات، ويجب أن تحمل البيانات المحصلة على أكبر كم ممكن من البيانات المعلوماتية.
3. اختيار بنية النموذج، وهي المرحلة الأصعب على الإطلاق. يجب أن تعتمد على المعلومات المسبقة عن النظام وخصائصه. ويمكن أن ينظر في استخدام هذا النموذج إذا لم تتوفر معلومات مسبقة.

4. تحديد قواعد تقييم النموذج، وتعتمد على مدى مقدرة النموذج على إعادة انتاج البيانات المقاسة. مثل معيار كلفة خطأ التقدير وهو مجموع مربعات خطأ التقدير (الفرق بين الخرج المقدر والخرج المقاس)،

5. التحقق من جودة النموذج، وهي خطوة مهمة للتأكد من أن النموذج التجريبي مقبول بالنسبة للهدف الذي سيستخدم لأجله. لذلك يجب الخوض بخطوات أعمق من معيار كلفة الخطأ بحساب معامل الارتباط الذاتي للبواقي والارتباط المتبادل للدخل مع البواقي للتأكد من قدرة النموذج على تفسير كامل طيف إشارة الدخل.



شكل 23-مراحل تنفيذ عملية التعرف

يتضمن تصميم تجربة التعرف مسائل مثل اختيار الإشارات المراد قياسها وزمن تعيينها وتوصيف إشارات الإثارة المستخدمة. إذا كان النظام خطي ووحيد الدخل والخرج فإن إشارة الدخل يجب أن تغطي كامل المجال الترددي الذي يعمل عليه هذا النظام.

وبمجرد تسوية هذه المسائل، يمكن إجراء تجربة التعرف الفعلية وجمع البيانات العملية. تأتي بعدها مسألة اتخاذ قرار بشأن هيكل نموذج مناسب. هذه الخطوة حاسمة في عملية التعرف والحصول على نموذج جيد ومفيد، ويجب أن تتم بعناية. بالنظر إلى بنية النموذج المناسبة والبيانات المقاسة، يمكننا بعدها أن ننتقل إلى التقدير الفعلي لمعاملات النموذج. لإجراء ذلك توجد أدوات برمجية ذات أغراض خاصة تتسم بالكفاءة وسهولة الاستخدام مثل صندوق أدوات التعرف المقدم من شركة ماتلاب، ما يسهل تنفيذ هذه الخطوة.

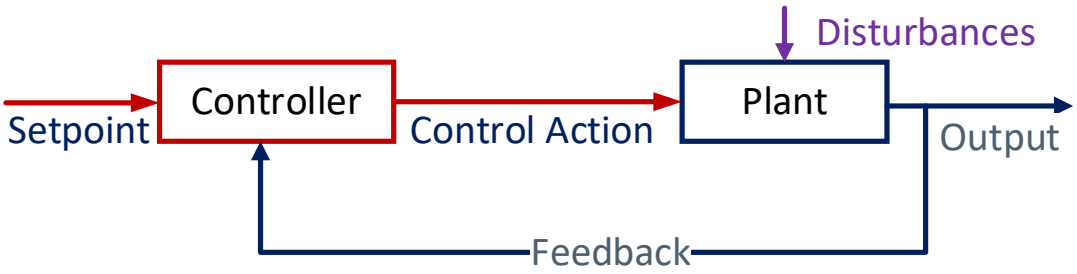
قبل أن يتم اعتماد النموذج، يجب أن يجتاز بعض اختبارات التحقق من الصحة. يمكن القول بأن التحقق من صحة النموذج يعتمد على مسألة ما إذا كان النموذج الأفضل جيد بما يكفي للاستخدام

المقصود. من ضمن أدوات التحقق الشائعة هي المقارنة بين خرج النموذج مع الخرج الحقيقي. حيث تتم محاكاة النموذج باستخدام بيانات جديدة غير البيانات المستخدمة في تقدير النموذج ومقارنة خرج النموذج بالخرج المقاس وإيجاد نسبة تلبيس النموذج المئوية. أيضاً هناك عمليات تحليل البواقي، ودراسة الارتباط الذاتي له، كذلك الارتباط المتبادل ما بين البواقي وإشارة الدخل للتأكد من خلو البواقي من أية ارتباطات مع الدخل. إذا فشل النموذج في اجتياز اختبارات التحقق من الصحة، فيجب تكرار بعض الخطوات المذكورة أعلاه أو كلها حتى يتم العثور على نموذج يجتاز اختبارات التحقق من الصحة.

يهدف هذا الفصل إلى التعرف على نظام المخدم الكهروهيدروليكي من خلال تقدير نماذج معاملاتية تفيد في التحكم والمحاكاة، وسيتم الاعتماد على خرج هذه المرحلة في عملية تصميم المتحكمات المناسبة لحلقة الموضع والتسارع والتي سيتم شرحها في الفصل التالي.

3.2 التعرف في الحلقة المغلقة:

سيتم تطبيق إجرائية التعرف على النظام في الحلقة المغلقة التي تستخدم التغذية العكسية لتغيير سلوك الأنظمة الديناميكية. يكون الهدف، على سبيل المثال، تحسين سرعة استجابة النظام، أو جعله أقل حساسية إلى الاضطراب أو الضجيج. يبين الشكل (24) البنية الأساسية لنظام في الحلقة المغلقة، حيث تم ربط النظام بمتحكم من خلال تغذية عكسية. يعطي المتحكم دخل إلى النظام وإذا كان هناك مزيد من الاضطراب في خرج النظام سيعود إلى المتحكم كدخل بعد تطبيق المعاملات والذي يعود مرة أخرى إلى النظام وتستمر العملية لطالما لم يتحقق الخرج المطلوب.



شكل 24–البنية الأساسية لنظام في الحلقة المغلقة

في معظم الأنظمة، يتم التعرف في الحلقة المفتوحة ولكنه غير ممكن في بعض الحالات، لذلك نلجأ إلى الحلقة المغلقة لأنها تضعف من تأثير الاضطراب. هناك عدد من الحالات تستدعي تطبيق التعرف في الحلقة المغلقة:

- ✓ النظام غير المستقر لا يمكن تعريفه أو اختباره في الحلقة المفتوحة.
- ✓ يتطلب تطبيق قيود التشغيل استخدام الحلقة المغلقة في كثير من الأحيان.
- ✓ يحافظ متحكم الحلقة المغلقة على إبقاء النظام في جوار نقاط العمل المرغوبة.
- ✓ إذا كان النظام يتغير زمنياً ما يتطلب هذا مواكبة معاملات النموذج لتغيرات سلوك النظام مع الزمن.

3.3 إشارات التحفيز المستخدمة في التعرف:

يوجد عدد كبير من الإشارات التي يمكن استخدامها في إجرائية التعرف على الأنظمة منها:

1. الإشارة النبضية (Impulse Signal): عبارة عن إشارة قصيرة وقوية وتحمل طيف جيد من الترددات التي يمكن أن تحفز ديناميك النظام.
2. الإشارات الجيبية.
3. إشارة الضجيج الأبيض (White Noise Signal): هي إشارة عشوائية ذات طيف تردد ثابت تستخدم لاختبار استجابة النظام.
4. إشارة ال Sin Sweep : هي إشارة جيبية متغيرة التردد مع الزمن، حيث تبدأ عند تردد منخفض وتزداد تدريجياً إلى ترددات أعلى. تستخدم لتحليل استجابة الأنظمة عبر نطاق واسع من الترددات. تعرف أيضاً ب "Chirp Signal".
5. السلسلة الثنائية العشوائية المزيفة PRBS (Pseudo-Random Binary Sequence): هي إشارة ثنائية تتكون من سلسلة من الأصفار والواحدات يتم توليدها بترتيب يبدو عشوائيًا، لكنها في الحقيقة تتبع نمطًا معينًا يمكن إعادة إنتاجه. تُستخدم PRBS في اختبارات الأنظمة للتحقق من استجابتها والتأكد من أدائها.

3.4 الإشارة الثنائية العشوائية المزيفة PRBS :

تم اعتماد السلسلة الثنائية العشوائية المزيفة $PRBS$ لأنها تملك طيف عريض شبيه بالطيف العشوائي يمكن التحكم به ليغطي أنماط عمل النظام [5]. يتم اختيار أعلى تردد تتغير فيه الإشارة لكي يسمح بتحصيل ما بين 10 إلى 15 عينة خلال فترة زمن الاستقرار[5]. بالنسبة لمطال هذه الإشارة فيجب أن يكون في حدود نقطة العمل المرغوبة والتي يحددها شروط تشغيل النظام المطلوبة. ويتفرع عن حالة النظام الخطي حالة النظام متعدد الدخل والخرج ويجب على عينات الدخل أن تغطي كامل مجال التردد ولكن أن تكون مستقلة عن بعضها البعض. الحالة الثانية عندما يكون النظام لاخطي ففي هذه الحالة يجب أن يكون لدينا إشارات دخل تغطي كامل نقاط العمل المرغوبة.

يتم توليد الإشارة الثنائية العشوائية برمجياً على سبيل المثال من أجل توليد هذه الإشارة ويمكن استخدام صندوق أدوات ماتلاب [6] لتوليد هذه الإشارة باستخدام التابع $idinput.m$

$$idinput([Period, NumChannel, NumPeriod], 'prbs', Band, Range)$$

طولها الأعظمي يحدد بـ $2^n - 1$ حيث أن n تمثل مرتبة الـPRBS.

دور الإشارة الكامل يجب أن يكون أقل أو يساوي طولها الأعظمي.

$$Range = [min\ max];$$
$$Band\ = [0\ B];$$

B هو مقلوب دور ساعة الـPRBS.

<u>من أجل تحقيق إثارة مطبقة على دخل النظام المراد التعرف عليه يجب تحقيق ما يلي:</u>

- ✓ أن تحتوي إشارة الـPRBS المستخدمة في إثارة النظام على نبضات طويلة الأمد (تردد منخفض) تعالج وتفسر استجابة الحالة المستقرة (الربح). إن أكبر عرض نبضة يتم توليده بواسطة إشارة الـPRBS يعطى بالعلاقة:

$$T_{max} = n \times T_{clck}$$

✓ وأن تحتوي ايضاً إشارة الـPRBS على نبضات قصيرة المدى تفيد في التقاط وتفسير ديناميكيات النظام للحالة العابرة. إن أقصر نبضة يتم توليدها بواسطة مولد إشارة الـPRBS هي بعرض دور ساعة الـPRBS :

$$T_{min} = T_{clck}$$

وبالتالي يكون طيف إشارة هو :

$$[\frac{1}{n * T_{clck}} \sim \frac{1}{T_{clck}}]$$

ويجب أن يحوي عرض حزمة النظام المدروس.

بناءاً على طول الإشارة ودور الساعة يمكن حساب الزمن الذي تستغرقه تجربة التعرف :

$$time = (2^N - 1) \times T_{clck}$$

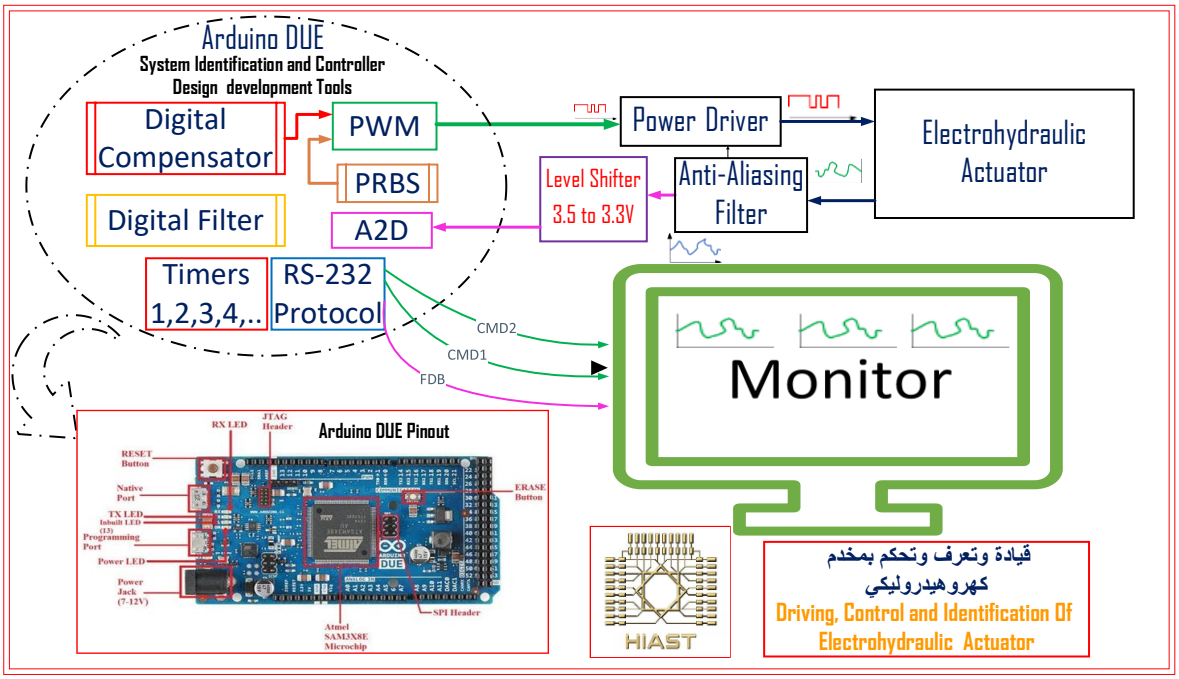
كما ذكر سابقاً، سيتم تركيب الإشارة فوق إشارة الـSetpoint في الحالة المستقرة (نقطة التشغيل)، وبالتالي سيتراوح مطال إشارة الـ*PRBS* حول نقطة التشغيل بنسبة معينة:

$$u_{min} \leq u(t) \leq u_{max}$$

مع مراعاة القيود المادية على المشغلات وتجنب الاستجابة اللاخطية للنظام.

3.5 تصميم تجربة التعرف:

يعتمد تصميم التجربة على الخبرة الفيزيائية التي تتوفر لدينا عن النظام[7] . إن مصدر هذه المعرفة هو النموذج الفيزيائي الذي يتم استخراجه من القوانين الطبيعية، مثل قانون نيوتن لديناميك الأنظمة الميكانيكية. هذه النماذج الفيزيائية يتم وصفها بواسطة المعادلات التفاضلية المستمرة. أو من خلال تحصيل نموذج استجابة القفزة للنظام.



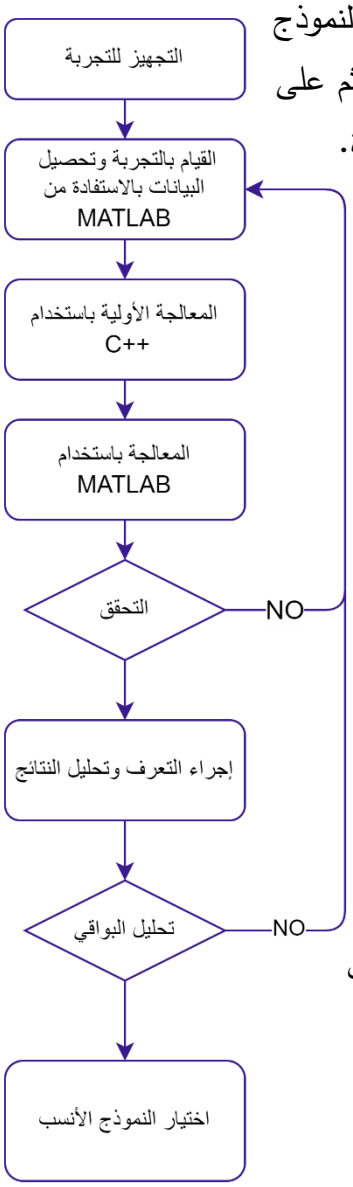
شكل 25–آلية إرسال واستقبال الأوامر من وإلى المتحكم في تجربة التعرف

يوضح الشكل(25) آلية إرسال واستقبال الأوامر من وإلى المتحكم في تجربة التعرف. يقوم المتحكم DUE بإرسال إشارات الدخل والتي هي عبارة عن إشارة الـPRBS (المولدة باستخدام ماتلاب) المضافة لإشارة ال Setpoint والتي يتم إرسالها على شكل إشارة PWM، بعدها يتم حساب إشارة الخطأ وإرسال قيمة الأمر المناسبة لدراة القيادة والتي بدورها تقوم بإثارة المخدم ضمن منطقة العمل الخطية له. يقوم المخدم بتحريك الطاولة بحركة خطية نحو الموضع المطلوب، وفي هذه الأثناء تتغير قراءة عنصر التغذية العكسية (مقسم الجهد) بما يتناسب مع حركة الطاولة. يستقبل مرشح تمرير منخفض بتردد قطع $f_c = 100Hz$ إشارة الموضع ما يحجب الترددات التي تقع خارج مجال استجابة المخدم (الضجيج العشوائي). بعدها تصل الإشارة إلى مدخل دارة الإزاحة من أجل ملائمة مستوى الإشارة مع دخل المحول (0~3.3v). تصل الإشارة المفيدة جاهزة إلى مدخل المحول التشابهي الرقمي فيقوم بتقطيع هذه الإشارة بدور تقطيع $T_s = 2msec$. ويقوم المتحكم بتسجيل الإشارة وترشيحها باستخدام مرشح رقمي نوع الوسطي المتحرك. ويقوم المتحكم بعدها ببث كل من بيانات إشارة الدخل والخرج المرشحة إلى الحاسب عبر منفذ الاتصال التسلسلي من أجل التخزين والمعالجة اللاحقة.

3.6 إجرائية تنفيذ التعرف التجريبي:

بعد تنفيذ تجربة التعرف وجمع البيانات ومعالجتها يتم اختيار النموذج المطلوب والذي يعتمد على المعلومات المسبقة عن النظام أولاً ومن ثم على الهدف من النموذج على سبيل المثال نموذج تقدير أو نموذج محاكاة. بعدها يجب أن نتطلع إلى معيار لتقدير المعاملات ونستخدم لذلك معيار خطأ التقدير [4] وهو مجموع مربعات خطأ التقدير والذي يمكن أن ينتج عنه تقدير معاملات النموذج. بعد تحصيل كل المعاملات نستعرض النموذج ونتحقق من النموذج باستخدام بيانات التحقق ونقارن بين بيانات الاستجابة المعروفة، وأخطاء تقدير المعاملات [5].

بعد كل هذه المراحل من الإجراء، نتحقق إذا كان النموذج مقبول نستخدمه وإذا لم يكن مقبول، نعود في الإجرائية إلى الخطوة السابقة أو التي تسبقها من أجل تعديل معاملات النموذج ونتحقق من النموذج مرة ثانية. ننفذ الإجرائية مرات عديدة إلى أن يتم قبول النموذج ويصبح قيد الاستخدام، من الممكن ايضاً العودة إلى توليد البيانات من جديد إذا تبين أنها لا تغطي طيف ديناميك النظام. ووفق هذه الخوارزمية يمكن بسهولة أن نستنتج أن إجرائية تعريف النظام هي إجرائية تكرارية.



شكل 26-مراحل تنفيذ التعرف التجريبي

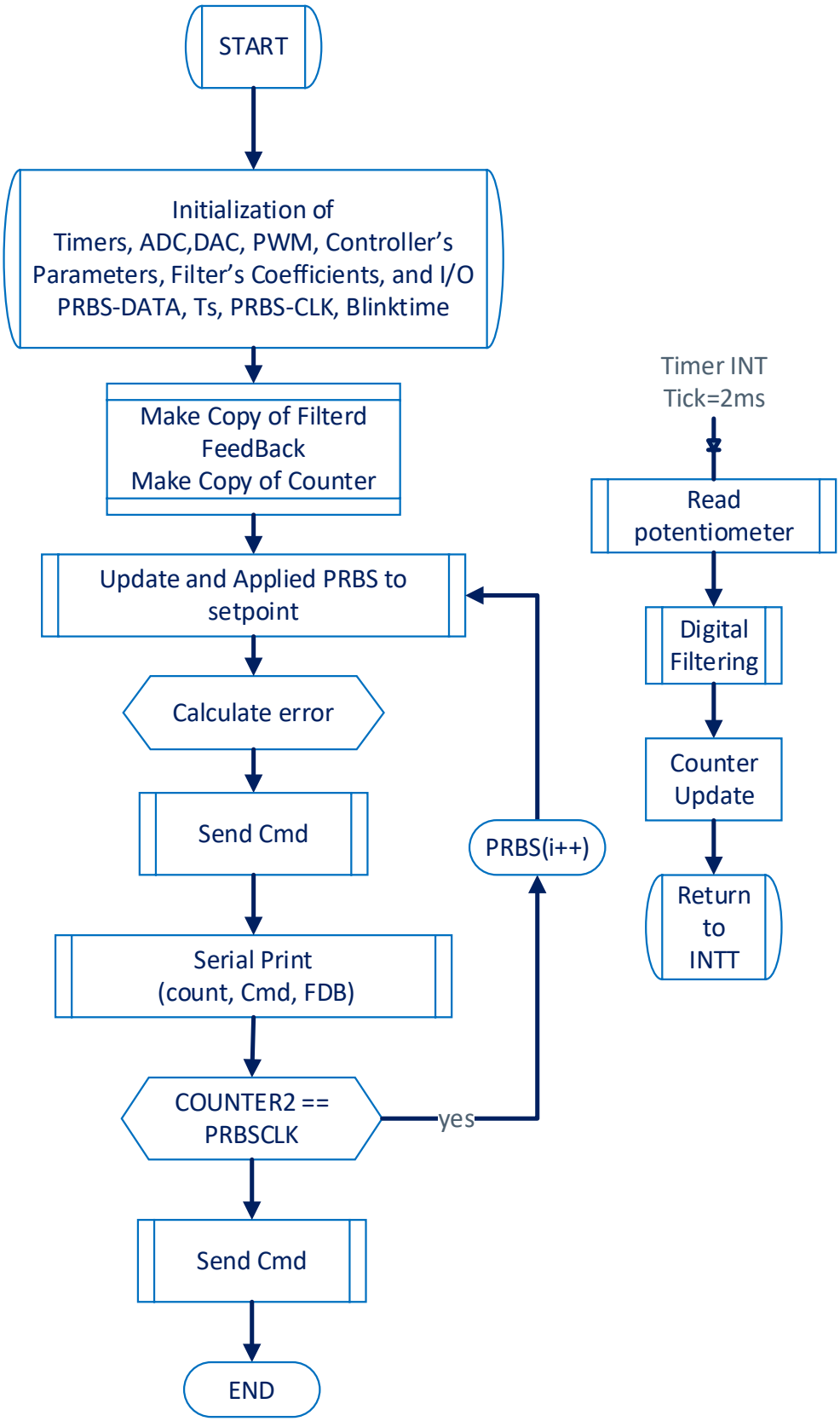
3.7 برنامج المتحكم الصغري في تجربة التعرف:

بعد إحكام الحلقة المغلقة تم تشكيل إشارة التحفيز وهي إشارة ال PRBS والتي يتم إضافتها إلى القيمة المرغوبة Setpoint عند مدخل حلقة التحكم ثم يتم حساب الخطأ، وبعدها يتم تنفيذ معادلة التحكم وإرسال أمر التحكم للمخدم. سيناريو تجربة التعرف المعتمد هو توضيع المخدم عند منتصف الشوط، والذي يعتبر نقطة التشغيل الأساسية، أولاً ومن ثم يتم تحركه حول نقطة التشغيل بمطال محدد يتعلق بمطال إشارة التحفيز.

لإحكام زمن الحلقة، يتم استخدام مقاطعة المؤقت الزمني بدور 2ms، وتُحدّث قيم إشارة التحفيز باستمرار وفقًا لدورة الساعة T_{clck} المحددة في بداية العملية.

نظرًا للحجم الكبير لإشارة التحفيز، والذي يستهلك قسم كبير من الذاكرة، يتم استخدام ذاكرة الفلاش المتاحة في المتحكم باستخدام تعليمة $PROGMEM$. رغم أن هذا الأسلوب يحقق توفيرًا ملحوظًا في استهلاك الذاكرة، فإنه لا يتيح إمكانية التعديل على البيانات المخزنة، أثناء تنفيذ البرنامج وهذا لا يؤثر على طبيعة استخدامنا للذاكرة التي لا نحتاج إلى تغييرها.

يوضح الشكل (27) خوارزمية عمل المتحكم في تجربة التعرف:



شكل 27-خوارزمية عمل المتحكم في تجربة التعرف

3.8 تحليل النتائج ومناقشتها:

قبل أن نستعرض النتائج لابد من عرض صورة عن بيئة عمل تجربة التعرف. تعرض الصورة (9) بيئة تجربة التعرف التي تتكون من:

منصة التحكم الرقمي بما فيها:

بطاقة المتحكم ARM المسمى DUE من شركة Arduino.

دارة مرشح التمرير المنخفض (مانع التراكب) بين خرج ال potentiometer ودخل دارة الملائمة التي تلائم مستوى الجهود لتصبح 3.3v مناسبة لدخل المحول A/D.

دارة القيادة التي تستقبل إشارات التحكم PWM وتقوم بتأمين التغذية المناسبة للصمامات.

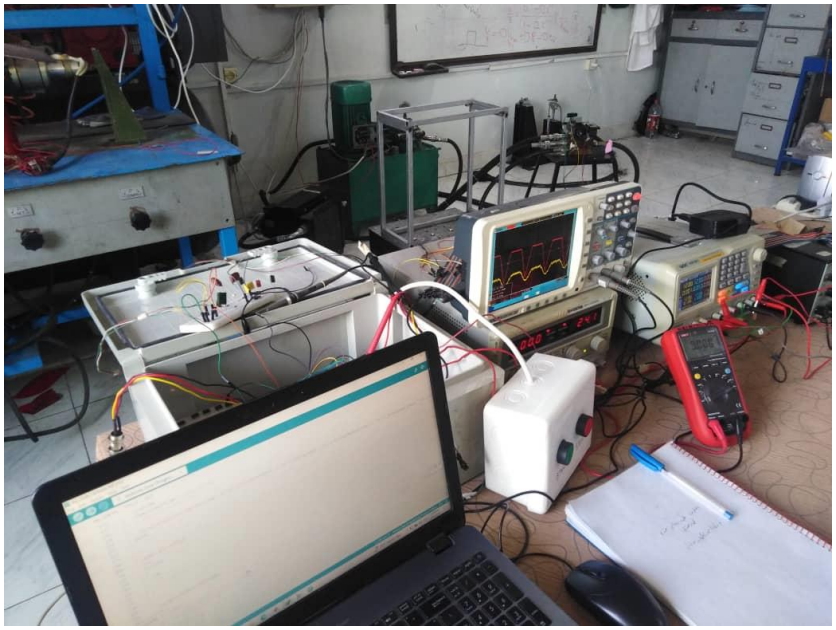
دارة تأمين التغذية +10V من المنبع $+12V$.

التجهيزات المستخدمة بما فيها:

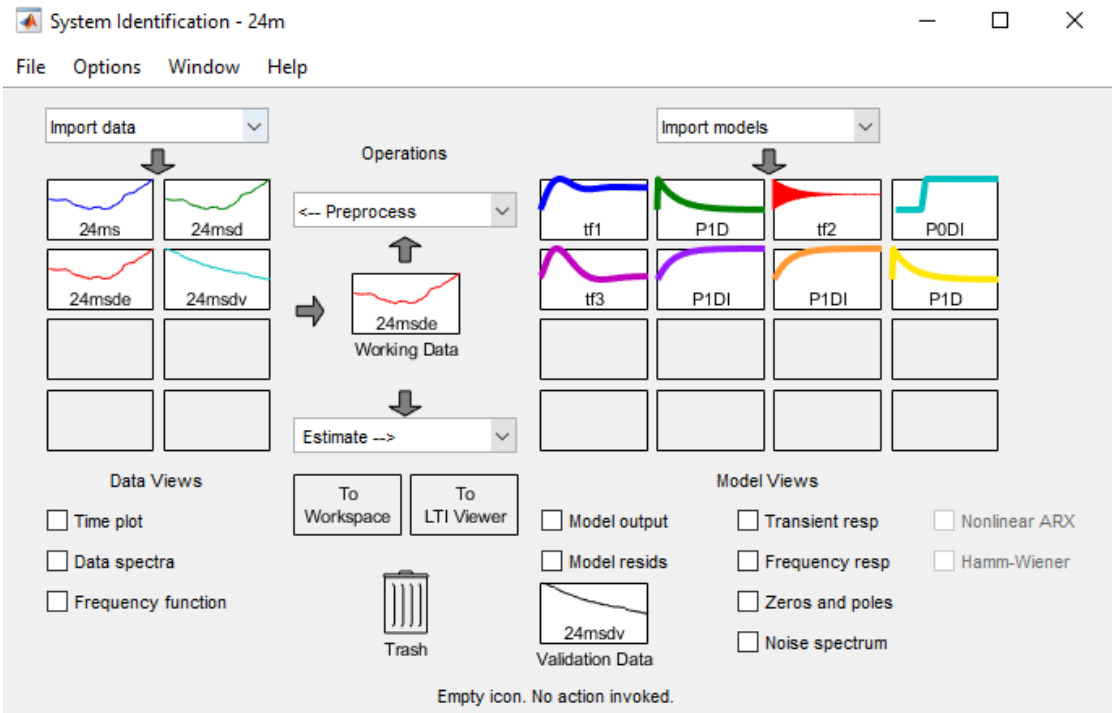
منبع التغذية مستمر.

راسم الإشارة الرقمي.

أسلاك توصيل متنوعة.



صورة 10-صورة عن بيئة العمل وعرض بيانات الدخل والخرج أثناء التحصيل



شكل 28-الواجهة التخاطبية لصندوق أدوات تعريف النظام في ماتلاب

يظهر الشكل (28) **Error! Reference source not found.** الواجهة التخاطبية لصندوق أدوات تعريف النظام في ماتلاب التي تم استخدامها في تقدير نماذج التعرف التجريبي على المخدم الكهروهيدروليكي في الحلقة المغلقة.

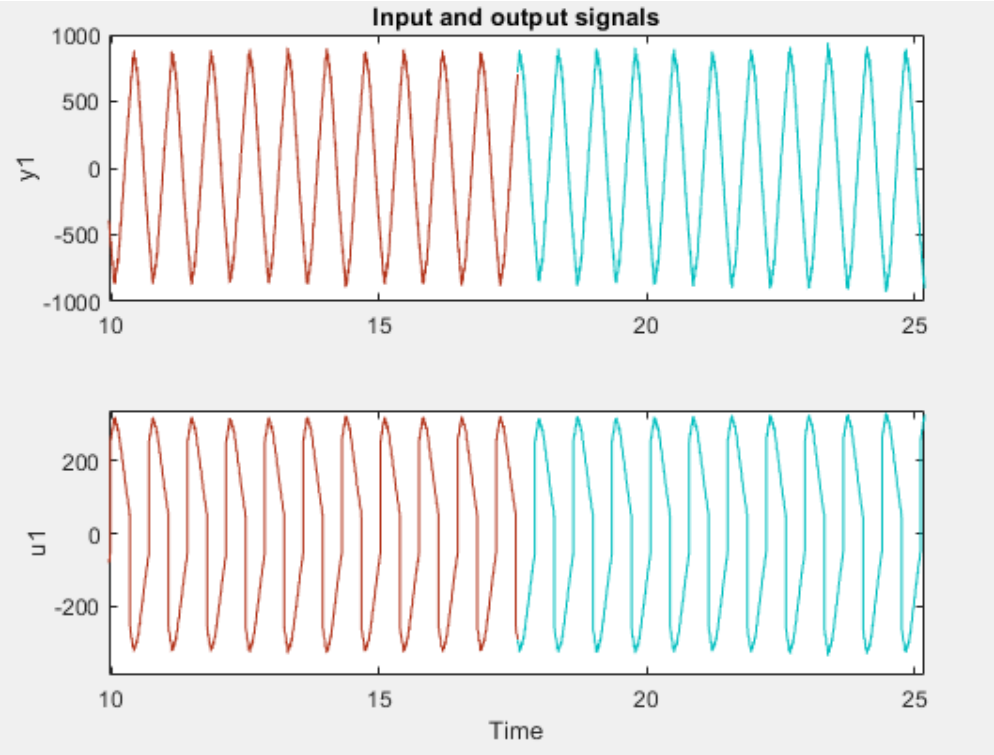
في إطار تطبيق التعرف التجريبي على نظام المخدم الكهروهيدروليكي ، تم إجراء التجارب التالية:

1) تجربة التعرف على نموذج التحكم Process Model استخدمت فيه إشارة تحفيز نبضية.

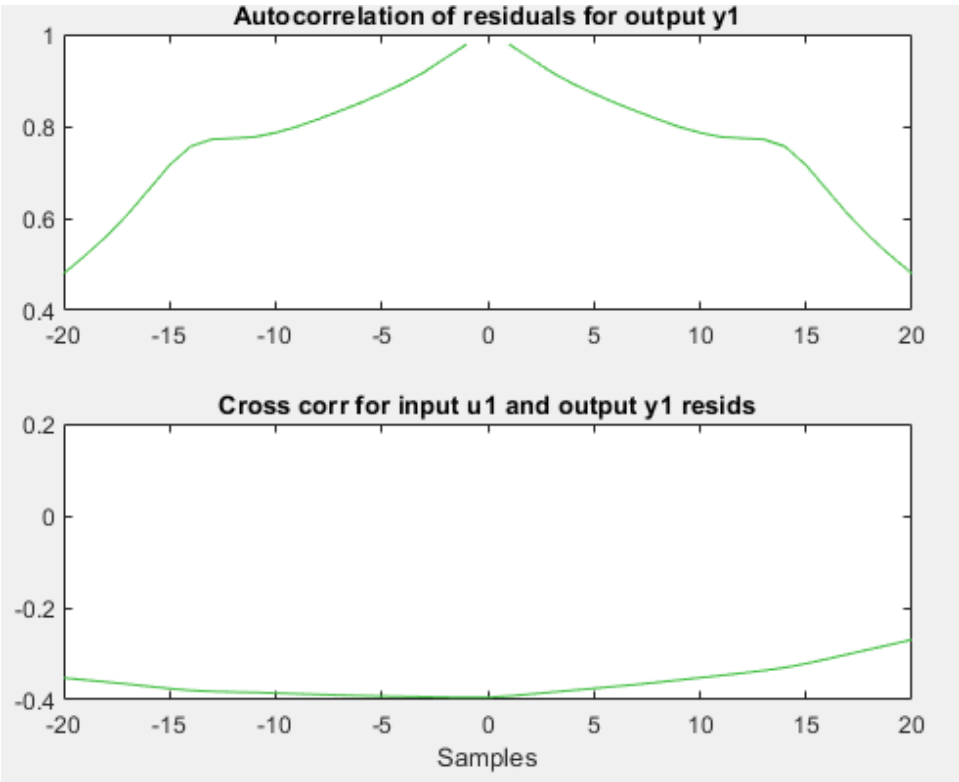
2) تجارب التعرف التنبؤ والنمذجة والمحاكاة وفق الطريقة المباشرة واستخدمت فيها إشارة تحفيز من نوع PRBS طبقت فيه إشارة التحفيز على مدخل حلقة التحكم.

3.9 تجربة التعرف على نموذج التحكم Process Model:

في أول تجربة تعرف حسب الطريقة المباشرة تم تحفيز النظام عند مدخل حلقة التحكم. تم تطبيق إشارة تحفيز عبارة عن قطار من النبضات تمثل قفزات متتالية بدور $t = 1s$ وديمومة 50% وبمطال [1200–2800] وتحصيل الاستجابة فكانت كما في الشكل (29):



شكل 29-بيانات دخل وخرج النظام المحصلة من أجل إشارة تحفيز نبضية



شكل 30-مخطط البواقي

النموذج الناتج عن التعرف له هيكل إجرائية Process Model:

$$G(s) = \frac{K_p}{(1+T_p s)}\ e^{-T_d s}$$

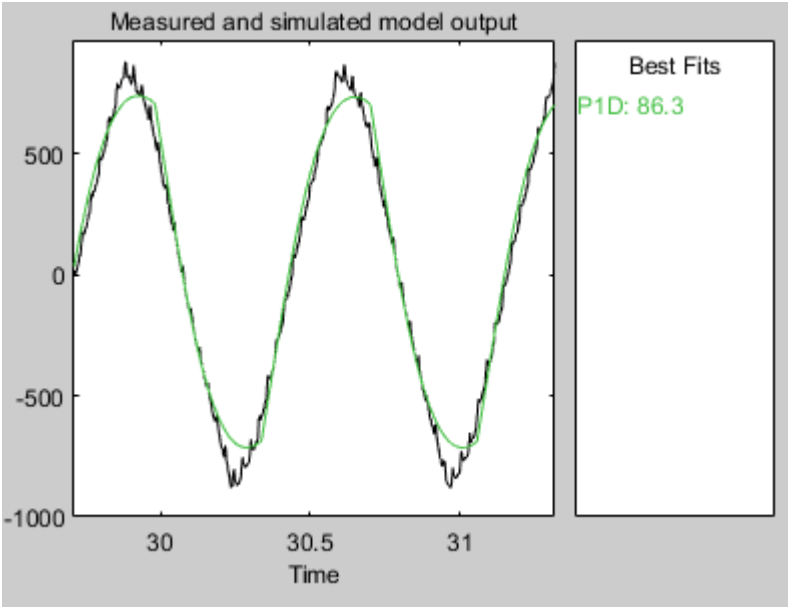
$$K_p = 1$$

$$T_p = 0.313\ sec$$

$$T_d = 0.167\ sec$$

$$G(s) = \frac{1}{(1+0.313s)}\ e^{-0.167s}$$

$$Estimation\ fitting = 81\%$$



شكل 31-نسبة الباس نموذج Process Model المقدر لبيانات التحقق

3.10 تجارب التعرف على نماذج التنبؤ والنمذجة والمحاكاة:

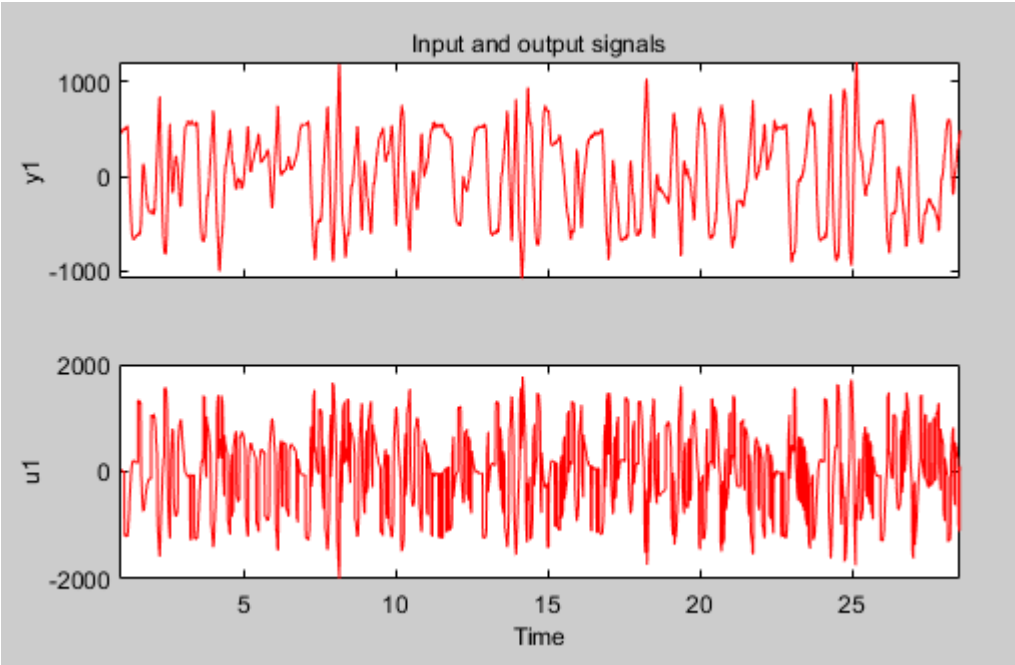
الهدف من هذه التجارب تحصيل نماذج خطية ولاخطية يمكن استخدامها في التنبؤ والنمذجة والمحاكاة ولكن قد أظهرت النتائج عدم قدرة النماذج الخطية على تفسير إشارة الدخل والخرج و بالتالي لم تقدم نماذج خطية تعبر عن سلوك النظام المدروس وذلك بسبب وجود العناصر اللاخطية (التأخير الزمني الكبير– المنطقة الميتة– السلوك غير المتناظر لحركة الطاولة) التي طغت على سلوك النظام مما أدى إلى استحالة تحصيل نموذج خطي.

لذا تم اللجوء إلى البحث عن نماذج لاخطية فكانت النتائج جيدة نوعاً ما ولكن مازالت غير قادرة على تفسير كامل سلوك النظام ويعود السبب كذلك إلى اللاخطية الكبيرة التي يعاني منها النظام ويبدو أن النماذج المتاحة غير قادرة عن تفسير هذا السلوك.

سيتم استعراض بيانات التجارب (الشكل(32)) التي تم إجراءها مع أفضل النماذج المحصلة منها.

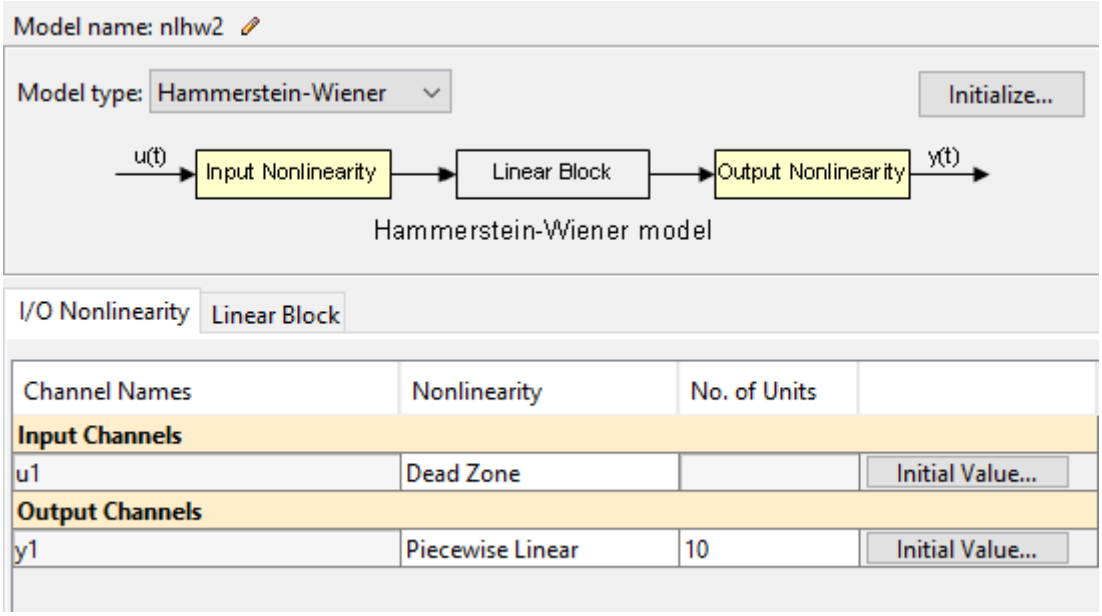
في هذه التجارب تم اقحام إشارة التعرف PRBS على مدخل حلقة التحكم كما ذكر سابقاً حيث تم إضافتها إلى إشارة ال Setpoint (وهي تساوي 50% من طول الشوط أي مايقابل 2000 كإشارة مقروءة من المتحكم) بمطال وبدور ساعة متغير حسب التجربة.

1- إشارة PRBS بمطال يتناوب بين $\pm 10\%$ من طول الشوط الكلي للمكبس وما يكافئه $[-400,400]$ كإشارة مقروءة من المتحكم DUE، بتردد تقطيع $2\ ms$ وبدور ساعة $28\ ms$ وبما أن طول الإشارة $1023\ samples$ هذا ما يجعل زمن التجربة $\sim 29\ s$.



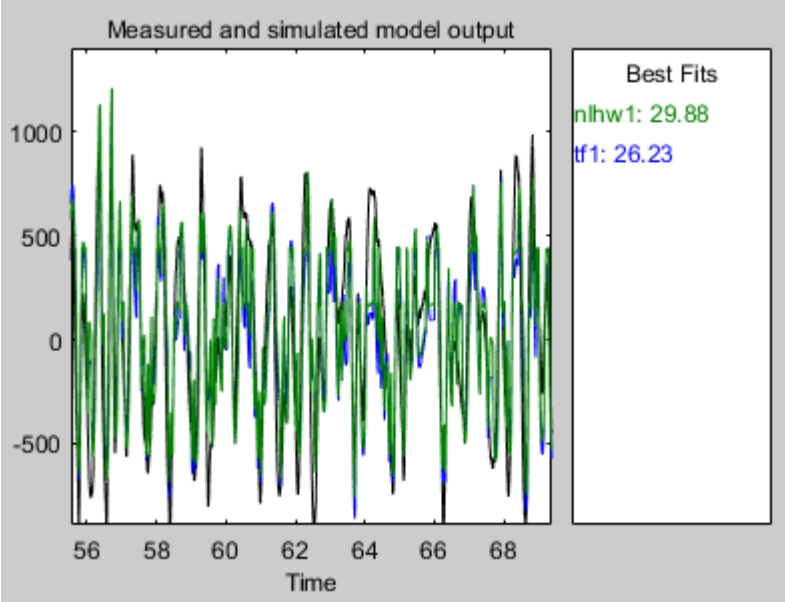
شكل 32-بيانات دخل وخرج النظام المحصلة من أجل إشارة تحفيز PRBS

تم تجربة عدة نماذج من أجل تحصيل نموذج من البيانات السابقة ولكن جميع النماذج قدمت نتائج غير مرضية وأفضلها كان نموذج خطي من نوع Transfer Function ونموذج لاخطي يدعى Hammerstein-Wiener يصف هذا النموذج كما هو موضح في الشكل (33)، ديناميك نظام باستخدام واحد أو أثنين من البلوكات اللاخطية الساكنة على التسلسل مع بلوك خطي.



شكل 33-بنية نموذج Hammerstein–Wiener اللاخطي

يتيح النموذج عدة خيارات للاخطية المراد تعويضها، تم تعويض المنطقة الميتة بتابع الدخل وخيار piecewise Linear والذي يستخدم للتعبير عن أن الخرج غير خطي ولكن بشكل أقل تعقيداً من المنطقة الميتة ومع ذلك كانت نسبة التطابق منخفضة جداً.



شكل 34-نسبة الالباس لنماذج Hammerstein–Wiener و Transfer Function , $T_{clck} = 28ms$

نلاحظ نسبة التلبيس المنخفضة رغم تعويض المنطقة الميتة في النموذج لذا تم إجراء عدة تجارب وذلك بتغيير دور الساعة T_{clck} ومن أجل نفس مطال إشارة التحفيز السابق $\pm 10\%$ ونفس

طول الإشارة $1023\ samples$ وذلك من أجل الحصول على نسبة تطابق أعلى وكانت النتائج كما يظهر الجدول(2) التالي:

	Hammerstein-Wiener		Transfer Function	
T_{clck}	**Estimation Fit**	**Validation Fit**	**Estimation Fit**	**Validation Fit**
50ms	44.69%	44.85%	17.72%	26.56%
40ms	46.82%	47.23%	44.56%	47.45%
30ms	58.41%	50.76%	34.1%	33.57%
22ms	46.74%	43.41%	33.86%	33.14%
14ms	59.54%	52.76%	40.68%	38.81%
12ms	54.75%	56.1%	43.67%	44.09%
10ms	57.53%	57.34%	47.68%	49.66%

جدول 2-نسب التطابق لنماذج Hammerstein-Wiener و Transfer Function من أجل N=10 و T_{clck} متغيرة

نلاحظ من البيانات السابقة أنه بتخفيض $\boldsymbol{T_{clck}}$ نحصل على نسبة تلبيس أفضل وذلك يعني أن أطول عرض نبضة سيكون في حالة $\boldsymbol{T_{clck} = 10ms}$ هو $\boldsymbol{N * T_{clck} = 10 * 10 = 100m}$ وهذا الزمن فعلياً غير كافي لوصول النظام للحالة المستقرة والتي يظهر فيها تأثير المنطقة الميتة بشكل واضح كخطأ حالة دائمة متغير، وبالتالي كل ابتعدت استجابة النظام عن الحالة المستقرة زادت نسبة التلبيس وقل أثر المنطقة الميتة ولكن هذا الأمر سينتج عنه نموذج قادر على تفسير ديناميك النظام في الحالة العابرة فقط دون الحالة المستقرة المهيمنة عليها المنطقة الميتة.

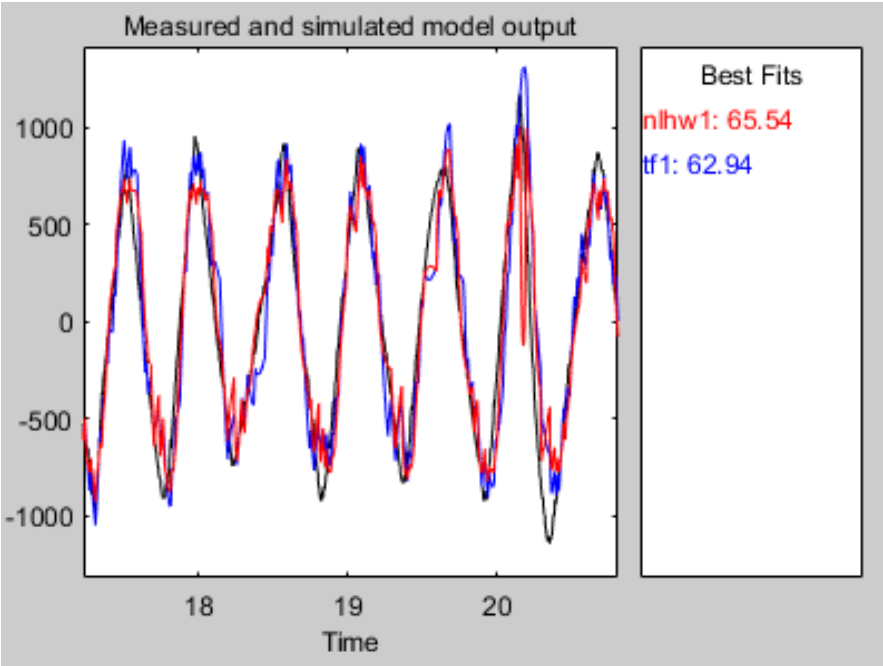
لذا تم تعديل مطال وطول إشارة التحفيز من أجل تخفيض أثر المنطقة الميتة ما أمكن وزيادة زمن التجربة من أجل الحصول على قدر أكبر من المعلومات التي تفيد في تفسير سلوك النظام.

سيتم استعراض نتائج التجارب من أجل طول إشارة $N = 12bits = 4095\ samples$ ومطال $\pm 13\%$ وفق الجدول التالي :

	Hammerstein-Wiener		Transfer Function	
T_{clck}	**Estimation Fit**	**Validation Fit**	**Estimation Fit**	**Validation Fit**
10ms	%54.64	55.93%	53.18%	47.93%
8ms	63.97%	63.67%	56%	55.25%
6ms	65.96%	61.01%	40.43%	62.94%

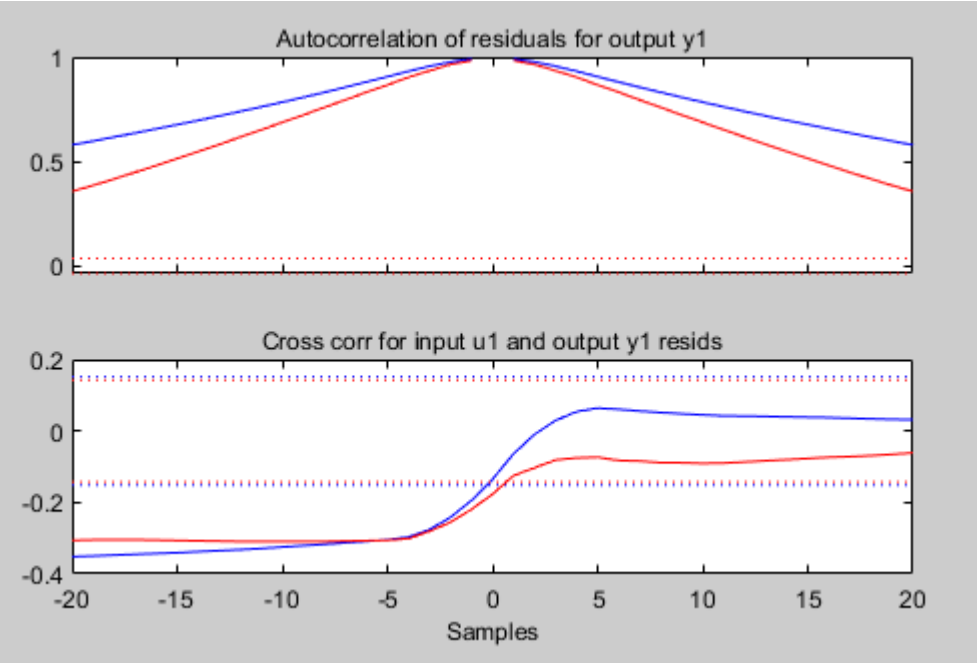
جدول 3- نسب التطابق لنماذج Hammerstein–Wiener و Transfer Function من أجل N=12 و T_{clck} متغيرة

نلاحظ تحسن في نسبة التلبيس بعد زيادة مطال الإشارة وطولها.



شكل 35- نسبة الالباس لنماذج Hammerstein–Wiener و Transfer Function , $T_{clck} = 28ms$

عند إجراء معاينة بصرية للنتائج، يُلاحظ أن نسبة التطابق المنخفضة سببها هو أن النموذج حساس للضجيج بشكل كبير، ولكن نلاحظ ان النموذج قادر على تفسير ديناميك النظام بشكل جيد لذا يعتبر النموذج مقبول.



شكل 36-تحليل البواقي لنماذج Hammerstein–Wiener و Transfer Function

وللتحقق من مدى تفسير النموذج لبيانات الدخل–الخرج تم تفحص البواقي في الشكل(36) يحمل مخططين، العلوي هو تابع الارتباط الذاتي للمتبقي ويظهر أن البواقي ليست عشوائية بالكامل لأنه يوجد ارتباط بين عينات البواقي ذاتها. أما المخطط السفلي فهو الارتباط المتبادل بين المتبقي وإشارة الدخل. ومن الواضح أن هناك ارتباط سلبي بين المتبقيات وإشارة الدخل ما يفسر نسبة التلبيس المنخفضة لأنه لاتزال هناك بعض البيانات النـي لم يستطع النموذج تفسيرها.

يحتوي الجزء الخطي من نموذج Hammerstein-Wiener على صفرين وثلاث أقطاب وتأخير زمني:

I/O Nonlinearity | Linear Block

Model Order

Input	B Order (Zeros)	F Order(Poles)	Input Delay (nk)
u1	2	3	1

شكل 37- مكونات الجزء الخطي من نموذج Hammerstein–Wiener

Estimation Data: *'6ms13%de' with* 5221 *samples.*

Model Configuration:

Input nonlinearity: *Deadzone.*

$\boldsymbol{Output\ nonlinearity}$: $Piecewise\ linear\ with\ 10\ units\ and\ unspecified\ break - points.$

لايوجد شكل صريح للنموذج وإنما هو عبارة عن Block يتكون من الجزء الخطي واللاخطي يمكن تصديره إلى Workspace الخاصة بماتلاب ومن ثم استيراه في Simulink من أجل التعامل معه.

شكل 38-نمذجة نموذج Hammerstein–Wiener في Simulink

أما بالنسبة لنموذج Transfer Function فهو يملك الشكل التالي:

$$G(s) = \frac{16.99\ s + 49.92}{s^2 + 21.26\ s + 172.2}$$

يجب ذكر أنه تم إجراء تجارب تم فيها إضافة قيمة ثابت مساوية لقيمة المنطقة الميتة إلى إشارة دخل النظام بهدف تقليل أثر المنطقة الميتة ما أمكن ولكن بقيت نسبة الالباس منخفضة مما يعني عدم فعالية الحل المقترح. لذا يجب البحث في التقنيات المستخدمة في التعرف على هذا النوع من الأنظمة الذي يعاني من اللاخطية الكبيرة وتجربة تطبيق أنواع أخرى من إشارات التحفيز.

الفصل الرابع: التحكم بالمخدم

4.1 مقدمة:

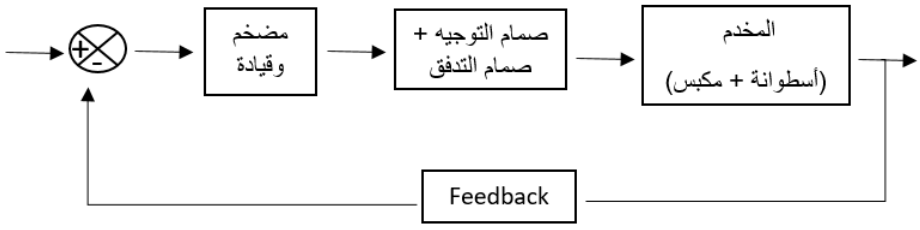
تعتبر أنظمة التحكم هي أنظمة صنع القرار، حيث تستند القرارات إلى تنبؤات السلوك المستقبلي المستمدة من نماذج الأنظمة المراد التحكم فيها، وعلى الملاحظات التي تم الحصول عليها من أجهزة الاستشعار للسلوك الفعلي. تؤثر التطورات في تكنولوجيا المستشعرات والمشغلات على منهجية التحكم، والتي تتأثر أيضاً بتوافر موارد حسابية منخفضة التكلفة وعادةً ما تكون الأنظمة التي يجب التحكم فيها أكثر تعقيداً، بينما قد تتوفر معلومات أقل حول سلوكها الديناميكي.

إن تطوير منهجيات التحكم لمواجهة هذه التحديات تتطلب أفكاراً جديدة ومتعددة التخصصات، بالإضافة إلى تطوير وتحسين الأساليب الحالية.

الهدف من هذا البحث هو قيادة المنظومة والتحكّم بالموضع بدايةً بحلقة تحكم واحدة ومن ثم التحكم بالتسارع والموضع باستخدام حلقتي تحكم وهو ما يسمى بالتحكم التتابعي (Cascade Control) بحيث يكون المتحكّم قادراً على تحقيق دفتر شروط معيّن.

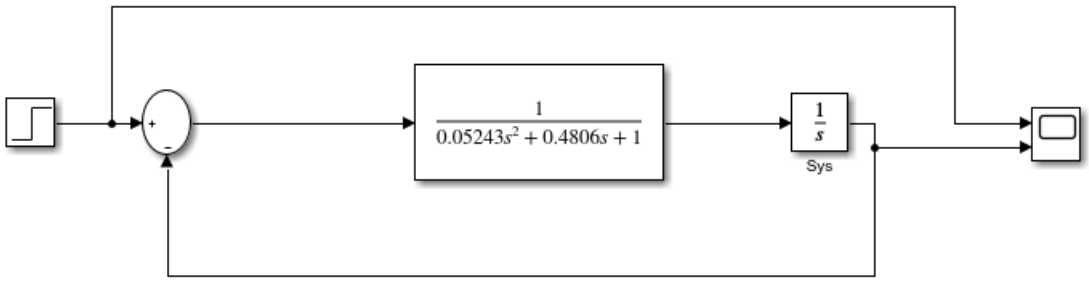
4.2 نمذجة النظام المدروس باستخدام برنامج المحاكاة MATLAB\Simulink:

قبل الدخول في تجارب الأداء يجب معرفة السلوك الديناميكي للجملة بشكل أولي باستخدام برنامج المحاكاة. ولنمذجة الدارة يجب التعرف على حلقة التحكم بالمخدم الهيدروليكي، والتي تتألف من الأقسام الموضحة في الشكل التالي:



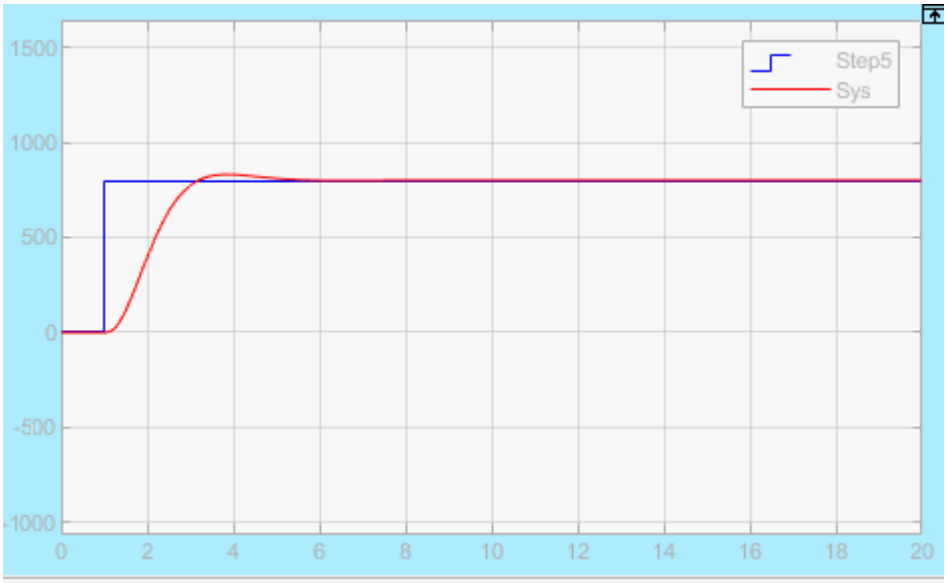
شكل 39-حلقة التحكم بنظام المخدم الكهروهيدروليكي

إن تابع النقل الذي تم تحصيله من عملية التعرف في الفصل السابق يعبر عن تابع النقل لكامل الحلقة المفتوحة في المسار الأمامي. بعد إجراء تقريب على التأخير الزمني واستبداله بقطب (حسب تقريب باديه) وإضافة مكامل من أجل تحصيل إشارة الموضع يصبح شكل التابع التحويلي للنظام كاملاً وفق الشكل (40):



شكل 40-نمذجة النظام باستخدام برامج MATLAB\Simulink

يوضح الشكل (41) استجابة النظام من أجل دخل قفزة $step = 800\ count = 15mm$ ، ويجب ذكر أنه تم تحديد شوط العمل من [20~50]mm حيث وجد من خلال التجارب أنه أفضل مجال يكون فيه تأثير الاحتكاك وعدم التناظر بين شوط الذهاب وشوط العودة أقل مايمكن.



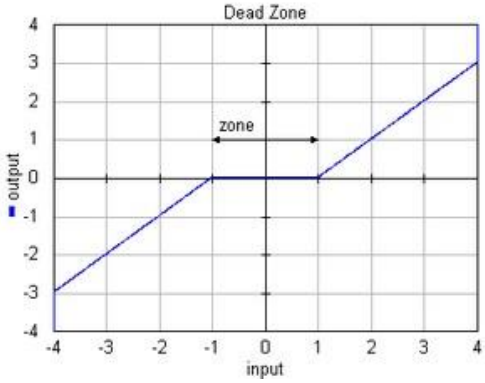
شكل 41- محاكاة استجابة النظام من أجل دخل قفزة

4.3 العناصر اللاخطية Non-Linear Items:

من الشائع وجود عناصر لاخطية في أغلب الأنظمة العملية ولا سيّما في الهيدروليكية منها، والتي تتمتّع بعنصرين لا خطيين مهمين وهما المنطقة الميتة (Dead zone) والتأخير الزمني (Time delay)، بالإضافة إلى عنصر الإشباع (Saturation).

4.3.1 المنطقة الميتة (Dead zone):

بشكل عام، يمكن تعريف المنطقة الميتة بأنها المجال الذي لا يستجيب عنده النظام بالرغم من وجود جهد دخل مطبق عليه، أي بشكل آخر هي المجال الذي لا يوجد فيها جهد على خرج النظام بالرغم من تطبيق جهد دخل عليه، وسوف يتمّ تحديد مجال جهد المنطقة الميتة من خلال التجارب العمليّة، ويُعبَّر عن المنطقة الميتة بالعلاقة التالية:



$$y = \begin{cases} X - D & ; X > D \\ 0 & ; -D < X < D \\ X + D & ; X < -D \end{cases}$$

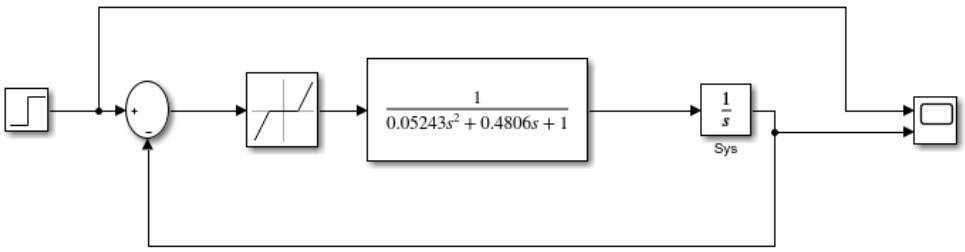
شكل 42-تعريف المنطقة الميتة

من خلال القيام بتجارب عديدة في نمط الدارة المفتوحة

أمكن تحديد مجال المنطقة الميتة وذلك من خلال إرسال أوامر جهد صغيرة جداً ومراقبة حركة المخدم وعند بدء المخدم بالحركة تم قراءة قيمة التيار وتوصيف المجال ووجد أنه أصغر قيمة تيار يبدء عنده المخدم بالحركة هو $I_{DZ} = 335\ mA$ وهو ما يقابل كجهد دخل $V_{DZ} = 1.4\ volt$ من أصل $12\ volt$ وهي تمثل تغذية صمام تخفيض الضغط التناسبي. تم اعتماد قيمة المنطقة الميتة كقيمة رقمية مقروءة من المتحكم $DeadZone = 470$.

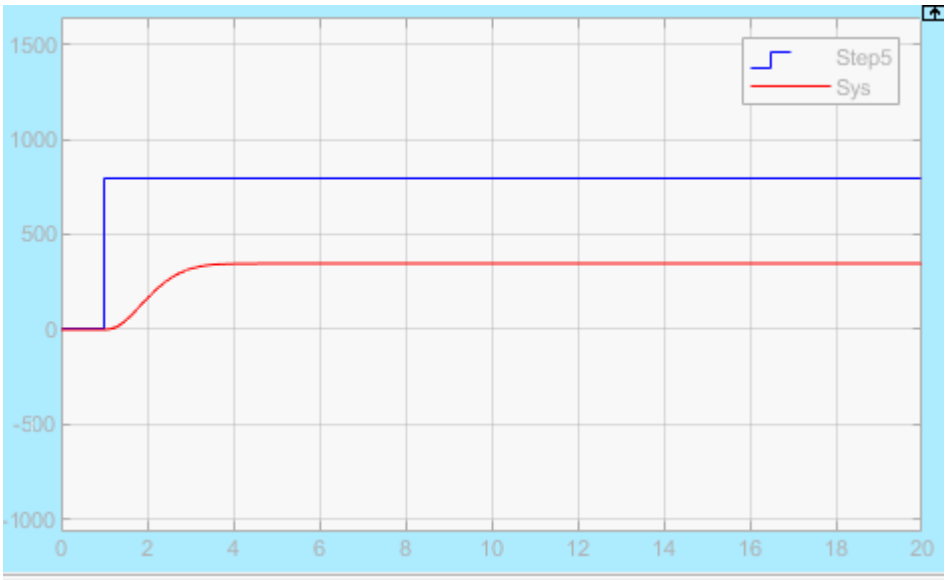
4.3.1.1 أثر المنطقة الميتة على سلوك النظام:

تم نمذجة المنطقة الميتة لمراقبة أثرها على سلوك النظام وفق الشكل(43):



شكل 43-نمذجة المنطقة الميتة

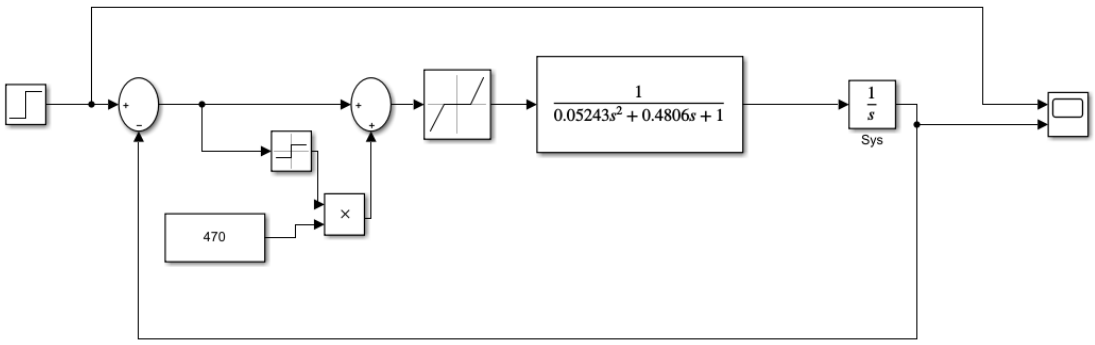
وكانت الاستجابة وفق الشكل (44) :



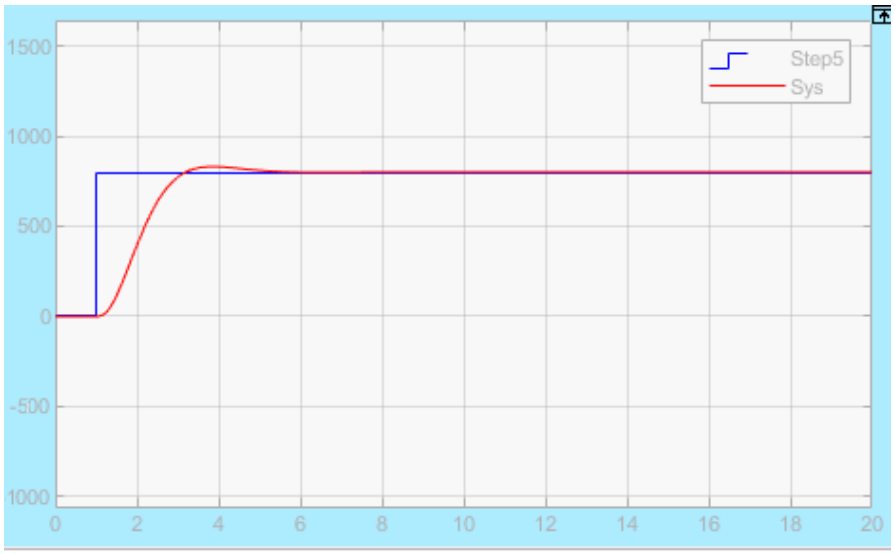
شكل 44-محاكاة استجابة النظام بوجود المنطقة الميتة

يُلاحظ من الشكل السابق وجود خطأ حالة دائمة (steady state error) ويتغيّر هذا الخطأ مع تغيّر قيمة الجهد المطبّقة، وذلك بسبب وجود العنصر اللاخطي (المنطقة الميّتة) وبالتالي نحتاج لإيجاد حل للاخطية المنطقة الميّتة، لذلك تمَّ تطبيق المنهجية المعتمدة في الأدبيات لحل لاخطية المنطقة الميّتة وهي جمع أو طرح قيمة ثابتة (موافقة لمجال المنطقة الميتة) [1].

للتأكد من فعالية الحل المطبّق، تم إضافة وطرح (حسب جهة الحركة) قيمة المنطقة الميّتة إلى إشارة دخل النظام في بيئة المحاكاة فكانت النتيجة وفق الشكل (45):



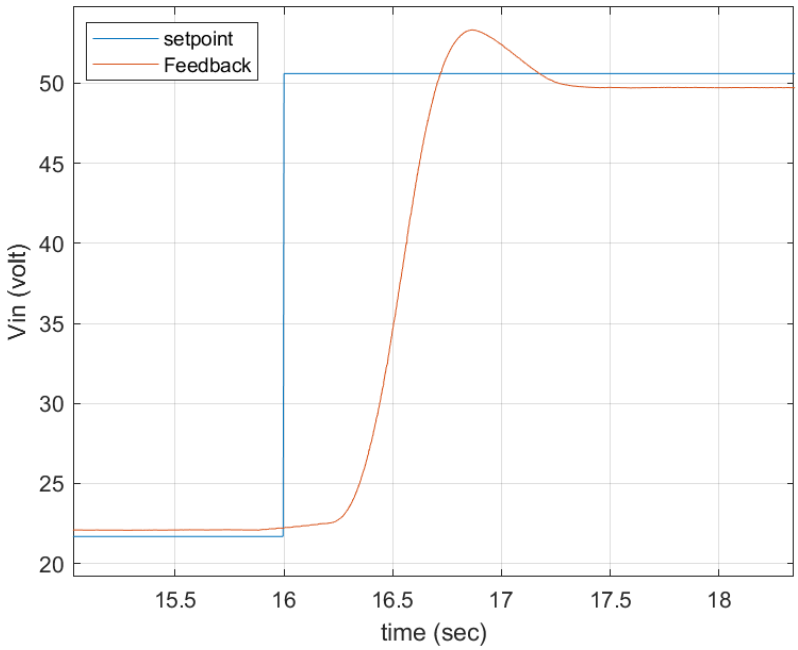
شكل 45- نمذجة حل لاخطية المنطقة الميتة



شكل 46- استجابة النظام بعد إدخال حل لاخطية المنطقة الميتة

نلاحظ أن شكل الاستجابة مع إدخال الحل المقترح يوافق شكل الاستجابة بدون وجود منطقة ميتة كما في الشكل (41).

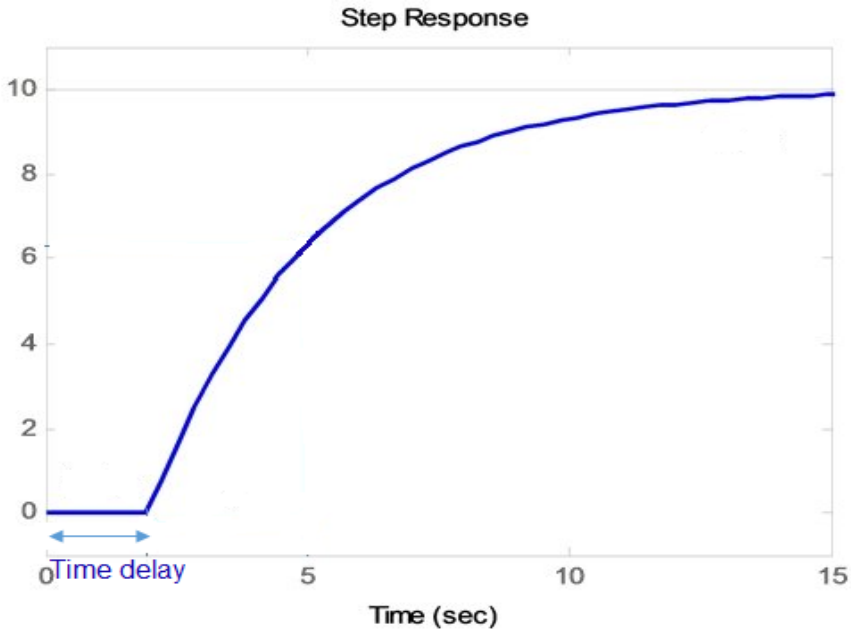
الخطوة التالية هي زرع حل لاخطية المنطقة الميّتة في المتحكم ومشاهدة الاستجابة الحقيقية، بعد زرع حل لاخطية المنطقة الميّتة في برنامج المتحكم تمّ إجراء تجربة حقيقية ومشاهدة سلوك الاستجابة وكانت قريبة من سلوك النظام في المحاكاة. يوضح الشكل (47) استجابة النظام الحقيقية بعد الترشيح:



شكل 47-استجابة النظام الحقيقية بعد زرع حل لاخطية المنطقة الميتة

4.3.2 التأخير الزمني (Time delay):

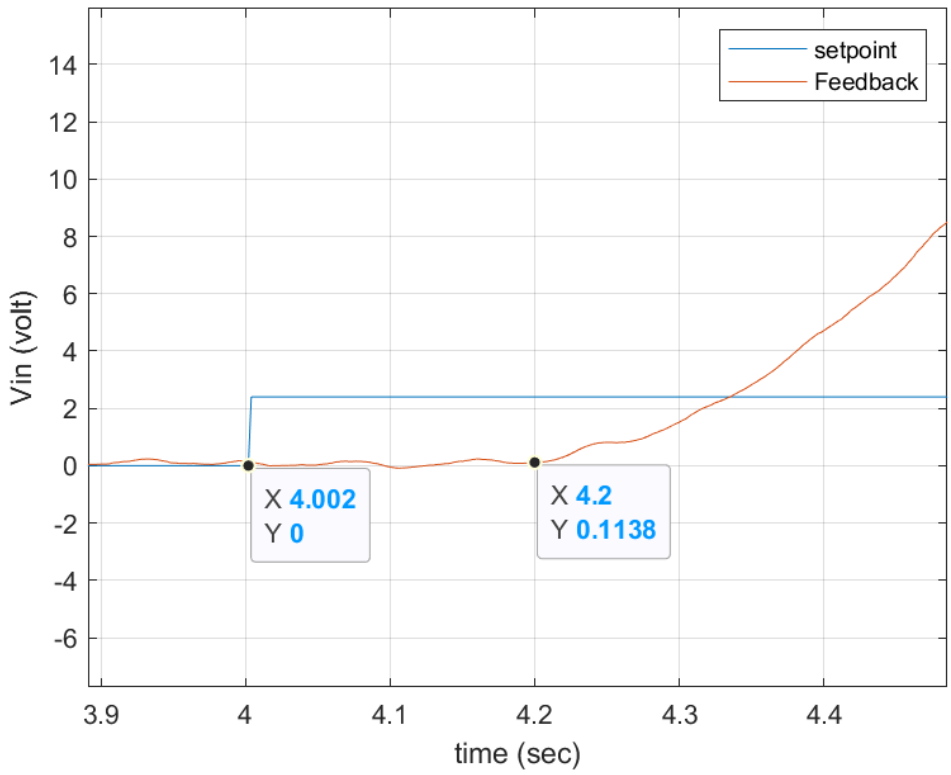
في النظام الهيدروليكي التأخير الزمني هو الفترة الزمنية الذي يحتاجه المكبس ليبدأ بالحركة بعد إرسال أمر الحركة، ويعتمد التأخير الزمني على الزمن اللازم لتدفق الزيت الهيدروليكي عبر المضخة إلى المخدم بالإضافة إلى ضغط التشغيل وزمن استجابة صمام التوجيه بشكل أساسي ويعتمد أيضاً على مساحة سطح المكبس ومعامل الخشونة بين سطح المكبس والأسطوانة (الاحتكاك) ولزوجة الزيت وأقطار أنابيب التوصيل [9].



شكل 48-تعريف التأخير الزمني Time delay

وتمَّ حساب التأخير الزمني بإجراء تجارب عديدة في نمط الدارة المفتوحة وحساب الفترة الزمنية ما بين إرسال أمر step وحركة المكبس، لوحظ من خلال التجارب أن زمن التأخير يتعلق بقيمة الجهد المطبق على صمام تخفيض الضغط التناسبي وهذه النتيجة منطقية لانه كلما كان الجهد المطبق أكبر كلما كان الضغط على مخرج الصمام أكبر وبالتالي تدفق أكبر وهذا يعني سرعة استجابة أكبر وزمن تأخير أقل.

سيتم استعراض نتائج التجارب لملاحظة تأثير جهد الدخل على زمن التأخير:



شكل 49- التأخيرالزمني من أجل دخل $step = 2.4volt$

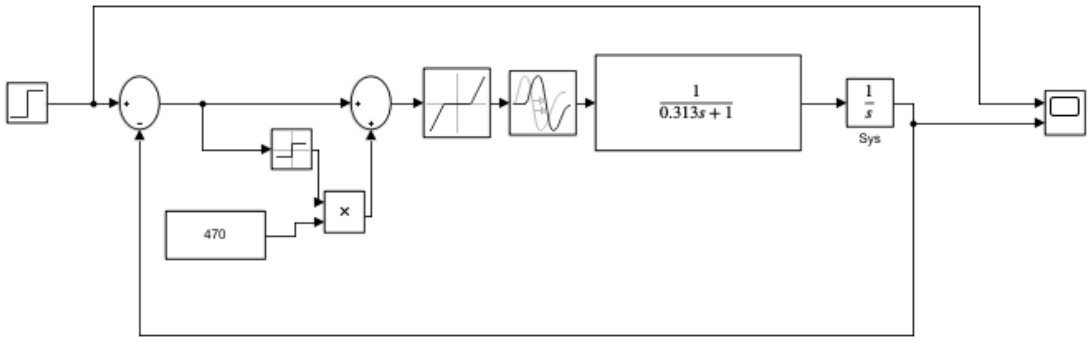
يوضح الشكل السابق من أجل جهد دخل $2.4\ volt$ أن زمن التأخير يساوي $time\ Delay = 198ms$.

يلخص الجدول التالي النتائج التي تم الحصول عليها من التجارب:

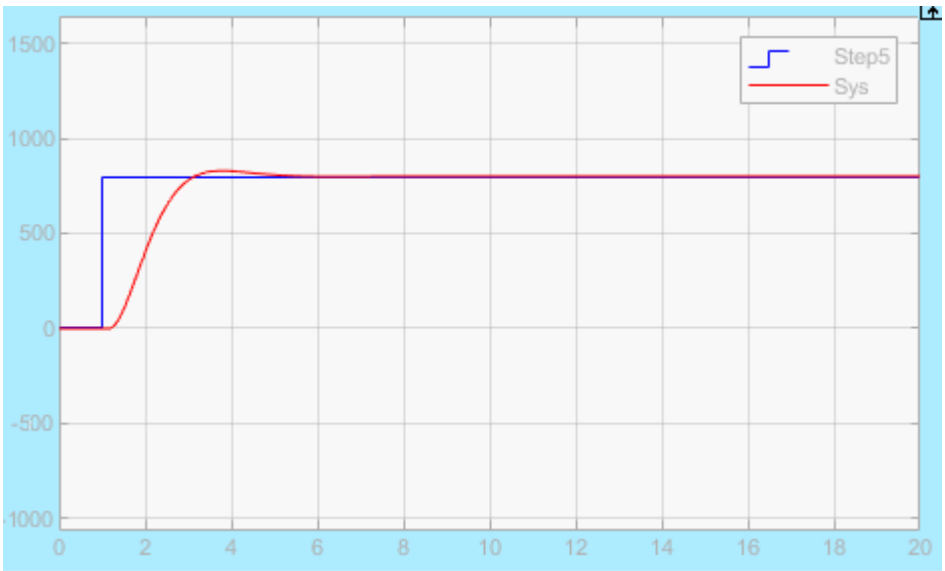
$V_{in}\ (volt)$	$Time\ Delay\ (ms)$
2.4	198
3.6	118
6	112
10.8	104

جدول 4-قيم التأخير الزمني من جهد دخل محدد

نلاحظ تناقص التأخير الزمني بزيادة جهد الدخل. تم اعتماد قيمة تقريبية للتأخير الزمني $Time\ Delay = 170ms$ وهي قريبة من القيمة التي تم الحصول عليها في أثناء عملية التعرف وسيتم نمذجة التأخير الزمني في المحاكاة بدل تقريب باديه للحصول على استجابة أقرب ماتكون من استجابة النظام الحقيقية. تم نمذجة التأخير الزمني في الشكل (50):



شكل 50-نمذجة التأخير الزمني



شكل 51-استجابة النظام بعد نمذجة التأخير الزمني

نلاحظ من الشكل السابق ان شكل الاستجابة قريب من استجابة النظام مع تقريب باديه في الشكل (41).

4.3.3 حد الإشباع (Saturation):

حد الإشباع في دارة القيادة هو أعلى قيمة جهد يمكن تطبيقها على صمام تخفيض الضغط التناسبي وبالتالي سيكون حد الاشباع هو $V_{sat} = 12\ volt$.

4.4 التحكم بالموضع:

يهدف التحكم بالموضع إلى تصميم متحكم يزيد من سرعة النظام في الحالة العابرة مع المحافظة على تجاوز أعظمي منخفض. لذا يعتبر المصحح المناسب لهكذا تصميم هو مقدم الطور Phase Lead الذي يستخدم بكثرة في مجال التحكم حيث يزيد من هامش الطور والذي بدوره يزيد من معامل التخامد النسبي ξ و يزيد من عرض حزمة النظام BW الذي يقابل تردد عبور الربح w_c. يوضح الجدول التالي المتطلبات التصميمية لنظام التحكم بالمخدم الكهروهيدروليكي:

المتطلب التصميمي	الرمز	القيمة
التجاوز الأعظمي	OS	$\mathrm{OS} \leq 4\%$
زمن الاستجابة	t_s	$t_s \leq 2sec$
خطأ الحالة الدائمة	ess	$\mathrm{ess} = 0$

شكل 52-المتطلبات التصميمية لنظام التحكم بالمخدم الكهروهيدروليكي

يعطى شكل تابع النقل لمصحح مقدم الطور[17] بالشكل :

$$G(s) = k_p \frac{Ts + 1}{aTs + 1}$$

وبالتالي فإنَّ هذا المصحح يُصمّم بتحديد موضع الصفر والقطب من خلال تحديد بارامترات تابع النقل للمصحح.

4.4.1 تحديد بارامترات المصحح:

يتم تحديد بارامترات مصحح مقدم الطور باستخدام العلاقات التالية [17]:

$$\emptyset_m = \arcsin \frac{a - 1}{a + 1}$$

حيث يتم اختيار قيمة $\emptyset_m$ وهي قيمة هامش الطور الذي سيقوم مقدم الطور بإضافته إلى النظام وبرسم مخطط بود للنظام نجد هامش الطور الحالي هو $PM = 60\, deg$ ، ومن المتطلبات التصميمية السابقة نلاحظ ان شرط التجاوز الأعظمي هو $\mathrm{OS} \leq 4$ وحسب العلاقة:

$$OS = e^{-\frac{\zeta\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}}$$

وهذا يقابل $\zeta \geq 0.7$ ومن العلاقة التقريبية يمكن إجاد هامش الطور المطلوب للنظام :

$$\boxed{\xi \approx \frac{PM(degree)}{100^{\circ}}}$$

و بالتالي نجد أنه يجب أن يكون $PM \geq 70\ deg$ ومن أجل تحقيق ذلك نفرض أن:

$$\emptyset_m = 37\ \ deg$$

$$\rightarrow a \cong 0.252$$

يتم تحويل قيمة a إلى ديسبل بالعلاقة التالية:

$$a_{dB} = -20 \times \log_{10}\frac{1}{\sqrt{a}}$$

$$\rightarrow a_{dB} = -5.686\ dB$$

يتم استنتاج قيمة w_n من مخطط بود للنظام في الحلقة المفتوحة الموافقة لـ a_{dB} ومنها يتم استنتاج قيمة T وفق العلاقة التالية:

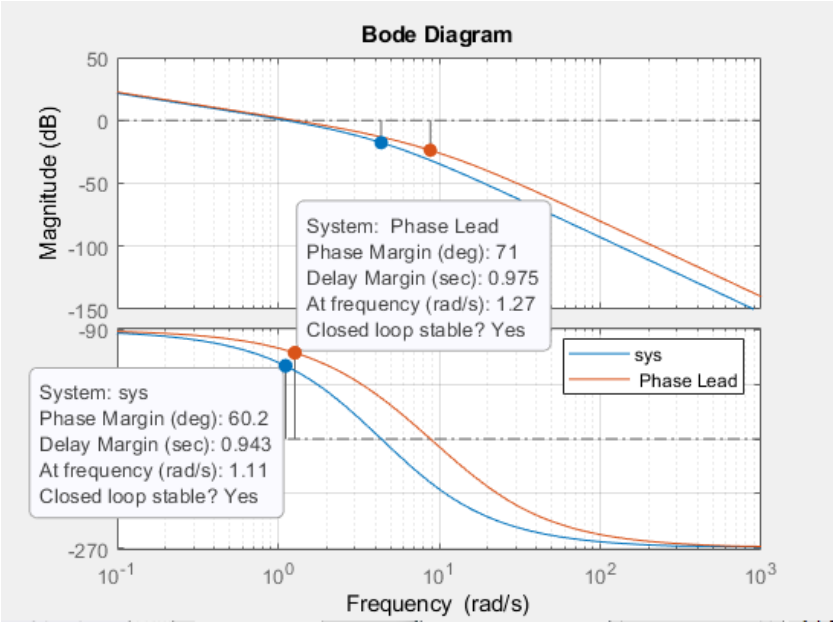
$$w_n = \frac{1}{T \times \sqrt{a}}$$

$$w_n = 6.997\ rad/sec \rightarrow T \cong 0.2847$$

سيتم اختيار قيمة $k_p = 1.1$ حيث يتم اختيارها بحيث تحقق خطأ حالة دائمة معدوم وبدون تجاوز أعظمي. بالتالي يصبح مصحح مقدم الطور على الشكل التالي:

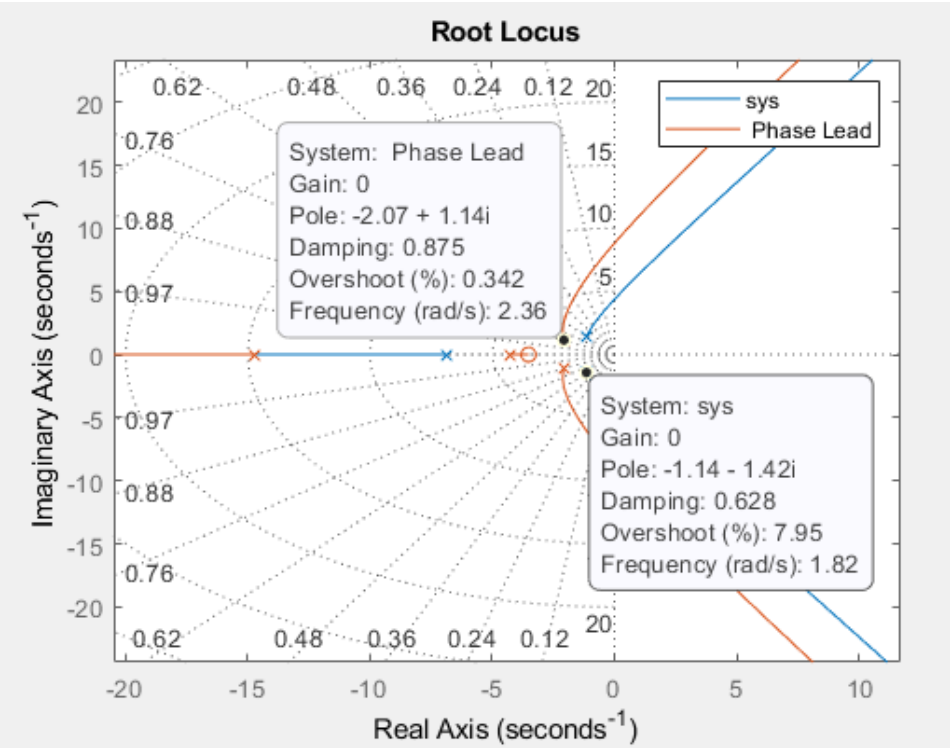
$$G(s) = 1.1\frac{0.2847s + 1}{0.07176s + 1}$$

يوضح الشكل (53) مخطط بود للنظام مع وبدون مصحح مقدم الطور ويوضح الشكل مقدار الزيادة في هامش الطور نتيجة إضافة المصحح:



شكل 53-مخطط بود للنظام قبل وبعد إضافة مصحح مقدم الطور

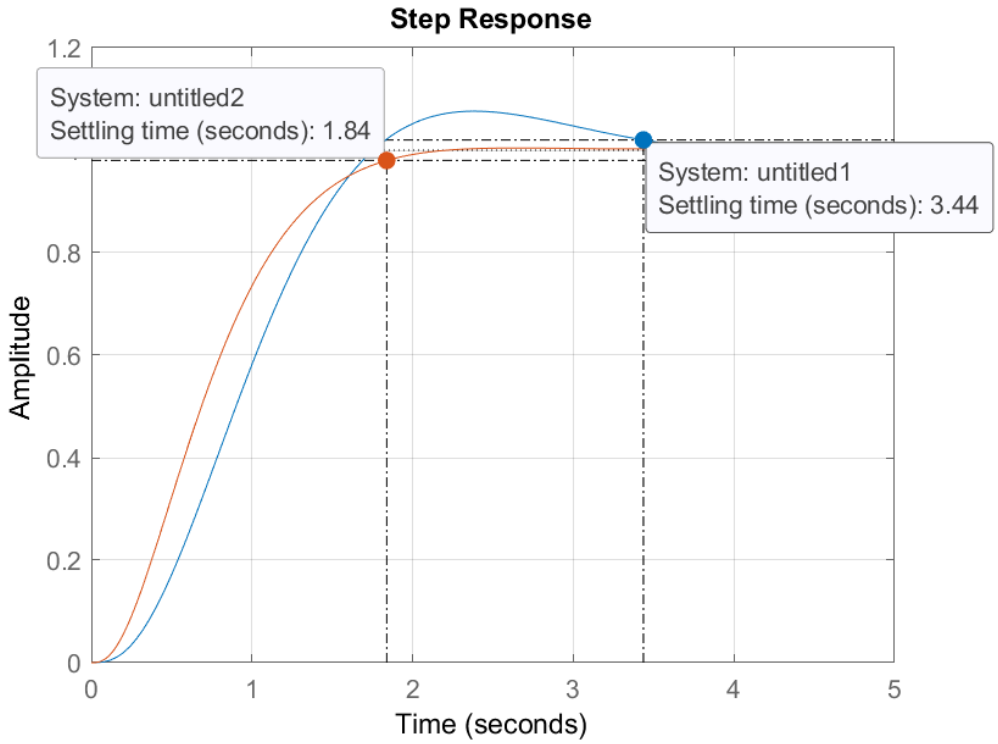
من الشكل نلاحظ أن هامش الطور الجديد للنظام هو $PM = 71\ deg$ وهو يقابل $\zeta \geq 0.7$ وهو محقق للمتطلبات التصميمية، سيتم استعراض مخطط الجذور لنرى تأثير إضافة المصحح على مسار الأقطاب حسب الشكل (54) :



شكل 54-مخطط مسار الجذور للنظام قبل وبعد إضافة مصحح مقدم الطور

من مخطط السابق نلاحظ كيف سببت إضافة المصحح إلى إضافة صفر وقطب نتج عنهم سحب مسار الجذور نحو يسار المستوي العقدي مما أدى إلى زيادة سرعة النظام، وكما نلاحظ أن نسبة التخميد أصبحت أكبر $\zeta = 0.875$ ، وبالتالي أصبح النظام أكثر استقراراً.

يجب عرض شكل الاستجابة الزمنية لمعرفة الخصائص الزمنية للنظام. يوضح الشكل (55) استجابة النظام من أجل دخل قفزة :



شكل 55-الاستجابة الزمنية للنظام قبل وبعد إضافة مصحح مقدم الطور

من شكل الاستجابة نلاحظ أن زمن الاستجابة $t_s = 1.84sec$ وخطأ الحالة الدائمة $ess = 0$ وهو محقق للمتطلبات التصميمة.

وبذلك نجد أن جميع المتطلبات التصميمية محققة باستخدام المصحح المصمم. لذا سيتم تقطيع المصحح وزرعه في المتحكم لمراقبة شكل الاستجابة الحقيقي.

4.4.2 المعادلة الفرقيّة لمصحح مقدّم الطور:

يتم استنتاج المعادلة الفرقية للمصحح للتمكّن من زرعه في برنامج الأردوينو وذلك باستخدام منهجية معيّنة وزمن تقطيع معين.

4.4.2.1 اختيار زمن التقطيع:

يتم اختيار زمن التقطيع بحيث يكون أكبر بكثير من عرض حزمة النظام. لذا تم اعتماد تردد تقطيع المصحح هو نفسه تردد حلقة التحكم في الاردوينو:

$$f_s = 500Hz$$

وبالتالي زمن التقطيع:

$$T_s = \frac{1}{f_s} = 2msec$$

بعد اختيار زمن التقطيع يمكن تقطيع التابع التحويلي وفق منهجية "Tustin" باستخدام التعليمة التالية:

$$c2d(G, T_s, 'Tustin')$$

ويصبح التابع التحويلي المتقطع للمصحح على الشكل التالي:

$$\frac{y[z]}{X[z]} = \frac{4.319\,Z - 4.289}{Z - 0.9725}$$

وبالتالي تصبح المعادلة الفرقيّة على الشكل:

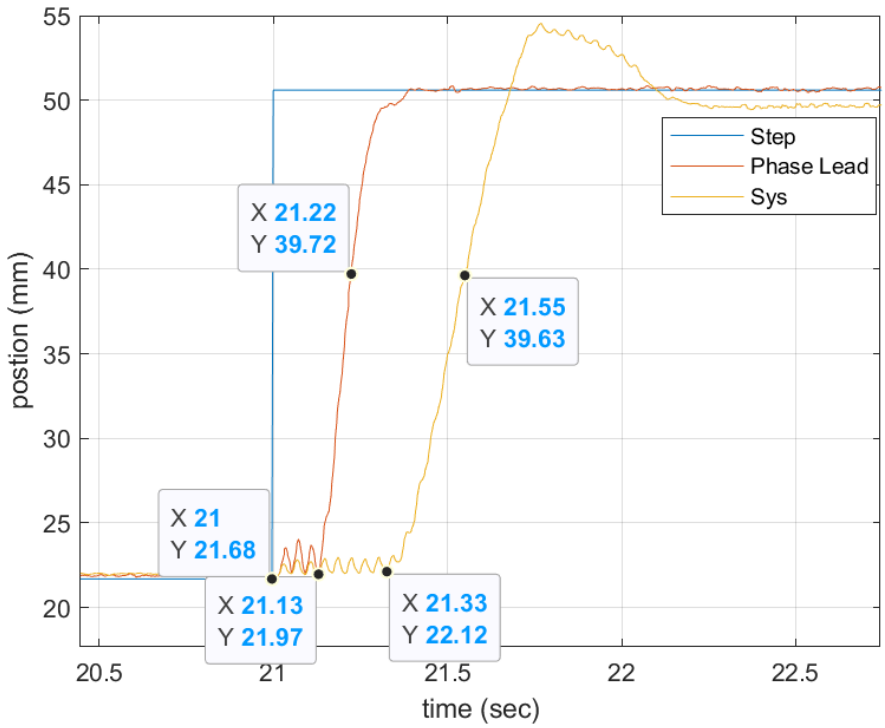
$$y[n] = 0.9725y[n-1] + 4.319\,[\,X[n] - 0.933X[n-1]\,]$$

4.4.3 تجارب الدارة المغلقة مع مصحح مقدم الطور بعد عملية tuning:

بعد زرع المعادلة الفرقية في المتحكم تم إجراء تجارب من أجل التحقق من أداء المصحح وتم إجراء عملية توليف tuning على ربح المصحح بحيث نحصل على أفضل استجابة ممكنة وأصبحت المعادلة الفرقية للمصحح بعد التوليف هي :

$$y[n] = 0.9725y[n-1] + 1.1(X[n] - 0.993\,X[n-1])$$

وكان شكل الاستجابة كما هو موضح بالشكل(56) من أجل دخل Step=30mm:



شكل 56-استجابة النظام الحقيقية قبل وبعد إضافة مصحح مقدم الطور

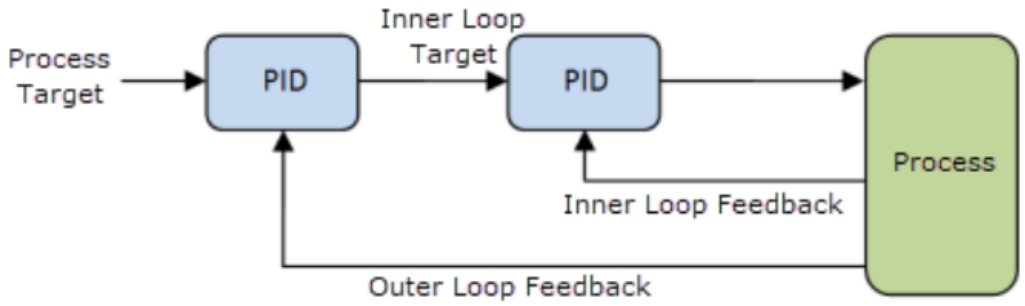
نلاحظ من شكل الاستجابة أنه لا يوجد تجاوز أعظمي $OS = 0$ وزمن الاستجابة $t_s = 230ms$ والثابت الزمني للنظام مع مصحح هو $\tau \cong 90ms$ وخطأ الحالة الدائمة $ess = 0$ وبذلك نجد أن جميع المتطلبات التصميمية محققة عملياً. يوضح الجدول(5) مقارنة بين خصائص النظام قبل وبعد إضافة مصحح مقدم الطور ويظهر نسبة التحسين:

خصائص النظام	بدون مصحح	مع مصحح PL	نسبة التحسين
التجاوز الأعظمي OS	8%	لايوجد تجاوز	100%
الثابت الزمني τ	$220ms$	$90ms$	59%
التأخير الزمني t_d	$330ms$	$130ms$	60%
زمن الاستجابة t_s	$730ms$	$230ms$	68%
خطأ الحالة الدائمة ess	2%	$ess = 0$	100%

جدول 5-مقارنة بين خصائص النظام قبل وبعد إضافة مصحح مقدم الطور

4.5 التحكم التتابعي Cascade Control:

التحكم التتابعي هو نوع من أنظمة التحكم التي تعتمد على سلسلة محددة من الأوامر لتنفيذ المهام بناءً على ترتيب معين ويتم ذلك من خلال استخدام أكثر من حلقة تحكم متداخلة ببعضها البعض. يتم استخدامه بشكل واسع في التحكم بالآلات والأجهزة الصناعية، حيث يُبرمج النظام للانتقال من مرحلة إلى أخرى عند تحقق شروط محددة. هذا النوع من التحكم مهم لضمان دقة العمليات وتجنب الأخطاء التي قد تحدث في أنظمة التحكم اليدوية.



شكل 57-التحكم التتابعي Cascade control

يستخدم التحكم التتابعي في الأنظمة البطيئة نسبياً ويقوم بتحسين أداء النظام باستخدام حلقتي تحكم مقارنةً بالتحكم ذو الحلقة الواحدة، ويظهر ذلك بشكل جلي عندما يكون الخرج النهائي للنظام حساس للضجيج المرافق لحساس التغذية العكسية في حلقة التحكم المغلقة، وبالتالي سيؤثر ذلك على عملية التحكم أما في حالة وجود حلقتي تحكم فستقوم الحلقة الداخلية بتقليل أثر الضجيج وتصحيح أداء النظام بشكل مستمر.

من أجل استخدام هذا النوع من التحكم يجب أن تكون الحلقة الداخلية أسرع بكثير وعلى الأقل بثلاث أضعاف من الحلقة الخارجية. من أهم الصعوبات التي تواجه تطبيق هذا النوع من التحكم هو الحاجة إلى حساسات قياس أخرى (قائس سرعة، قائس تسارع..إلخ)، بالإضافة إلى تصميم مصحح لكل حلقة يراد إضافتها إلى نظام التحكم وهذا ما يزيد من صعوبة عملية توليف المصححات حيث يجب البدء أولا من الحلقة الداخلية والتي تكون الأسرع وصولاً إلى الحلقات الخارجية الأبطأ.

باعتماد هذا المبدأ تم إضافة حلقة التسارع من أجل تحسين سرعة استجابة النظام.

4.5.1 التحكم التتابعي باستخدام حلقة التسارع وحلقة الموضع:

سيتم إضافة حلقة التسارع كحلقة داخلية، وستكون حلقة الموضع هي الحلقة الخارجية وستكون أبطأ بعشرة أضعاف من الحلقة الداخلية حيث سيكون تردد الحلقة الداخلية (حلقة التسارع) هو $500Hz$ بينما تردد الحلقة الخارجية (حلقة الموضع) $50Hz$.

سيتم تصميم مصحح للحلقة الداخلية والحلقة الخارجية باستخدام الأداة التصميمية $controlSystemDesigner(\,)$ في ماتلاب، وسيتم التصميم ابتداءً من الحلقة الداخلية.

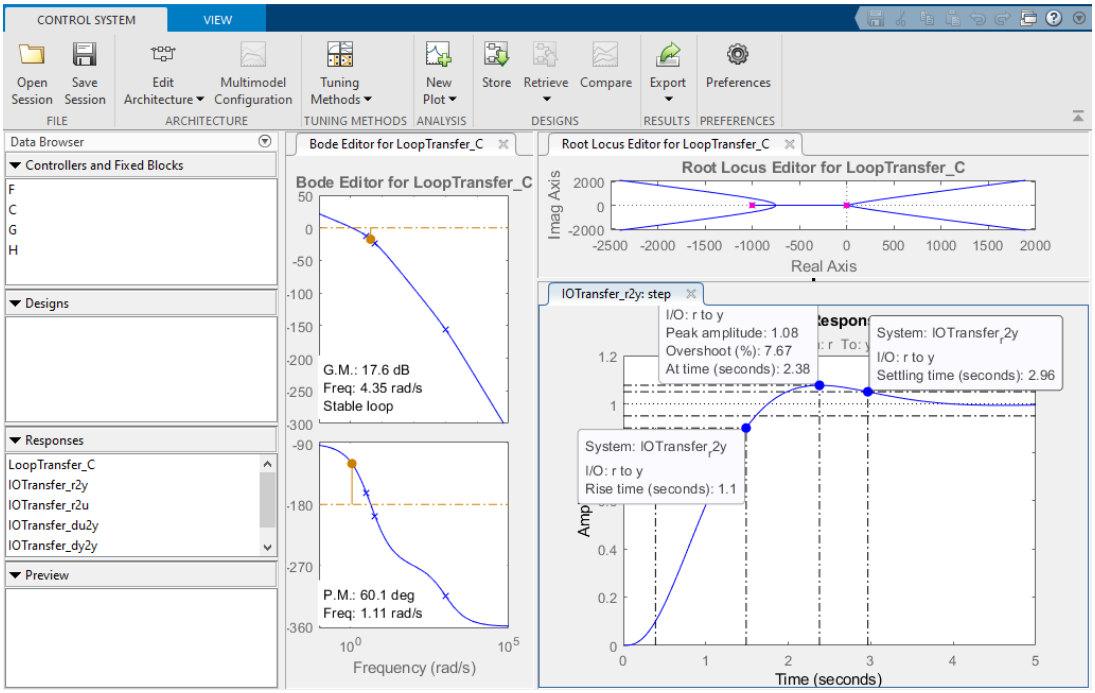
بعد الانتهاء من توليف الحلقة الداخلية يتم الانتقال إلى توليف الحلقة الخارجية بنفس الخطوات.

نقوم باستدعاء نموذج Process Model المقدر من عملية التعرف بعد إجراء تقريب باديه على التأخير الزمني باستخدام الأداة التصميمية $controlSystemDesigner(\,)$:

$$G(s) = \frac{1}{(1+0.313s)(1+0.167s)}$$

$$controlSystemDesigner(\,G)$$

ستظهر النافذة التالية التي توضح استجابة النظام من أجل دخل قفزة وكذلك الخصائص الزمني للنظام:



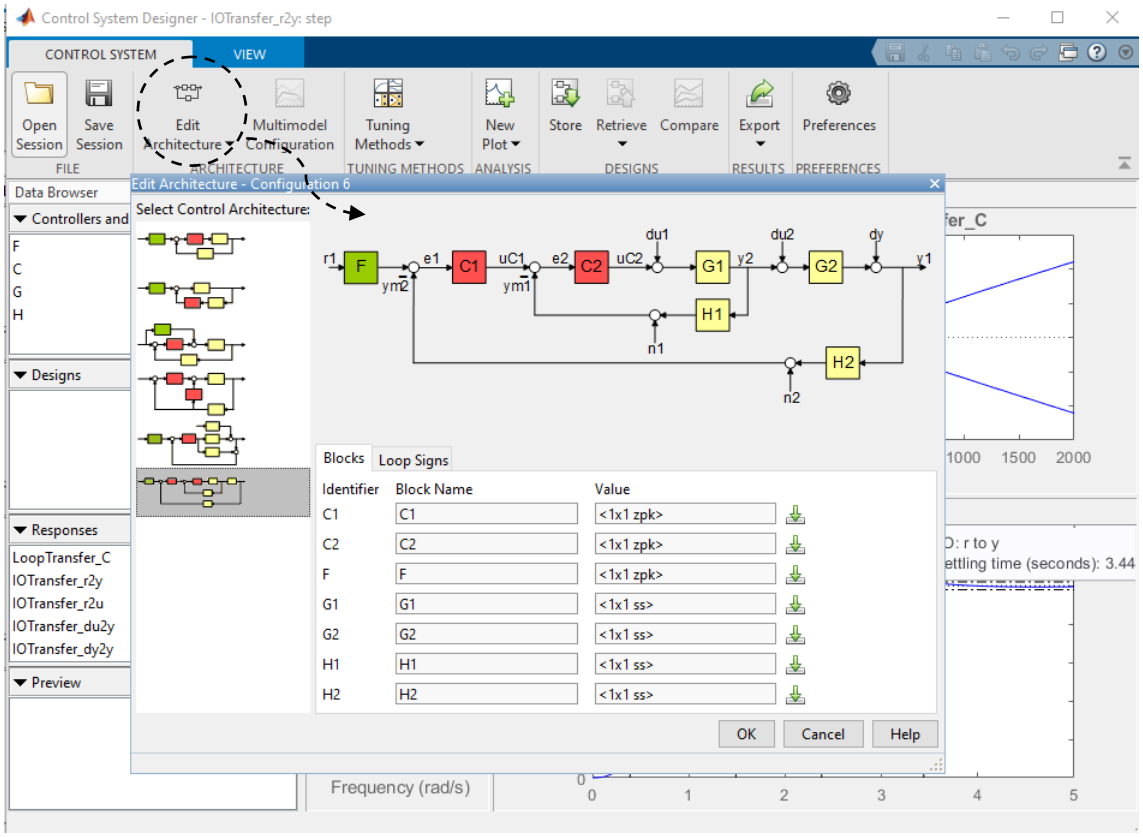
شكل 58-استجابة النظام في أداة $controlSystemDesigner$

الهدف هو تصميم مصحح للحلقة الداخلية(حلقة التسارع) والحلقة الخارجية(حلقة الموضع) من أجل تحسين خصائص استجابة النظام الزمنية، لذا تم افتراض المتطلبات التصميمية وفق الجدول التالي :

المتطلب التصميمي	الرمز	القيمة
التجاوز الأعظمي	OS	$OS \leq 10\%$
زمن الصعود	t_r	$t_r \leq 500ms$
زمن الاستجابة عند ess = 5%	t_s	$t_s \leq 2sec$

شكل 59-المتطلبات التصممية للنظام في حلقتي التحكم في التسارع والموضع

سيتم اختيار بنية نظام التحكم كحلقتي تحكم كما تتيح الأداة وفق الشكل التالي:



شكل 60-اختيار بنية حلقتي تحكم في أداة *controlSystemDesigner*

سيتم ترك جميع البلوكات السابقة بحتواها الافتراضي(1) وتعديل البلوكات اللازمة من خلال استيرادها من Workspace في ماتلاب بعد تعريفها. ستيم الاستيراد على الشكل التالي:

$$G1 = G(s)$$

$$G2 = \frac{1}{s}$$

$$H1 = \frac{s}{s+1}$$

يعتبر خرج النظام $G2$ هو خرج سرعة لذا تم إضافة التابع $H1$ وهو مفاضل مع مرشح تمرير منخفض من أجل تخفض الضجيج الناتج عن عملية الاشتقاق وتم إضافته في الحلقة الداخلية للتغذية العكسية للحلقة الداخلية من أجل تحصيل إشارة التسارع. وتم إضافة المكامل $G2$ من أجل تحصيل إشارة الموضع.

والان سيتم إضافة مصحح للحلقة الداخلية PID مع مرشح من المرتبة الأولى ومصحح للحلقة الخارجية PD مع مرشح من المرتبة الاولى. يقدم ماتلاب أداة لاختيار أرباح المصحح PID بشكل أمثلي مايجعل إجرائية المحاولة والخطأ غير ضرورية. يمكن الدخول إلى خوارزمية التوليف بشكل مباشر باستخدام الأداة التفاعلية $Control\ System\ Designer$.

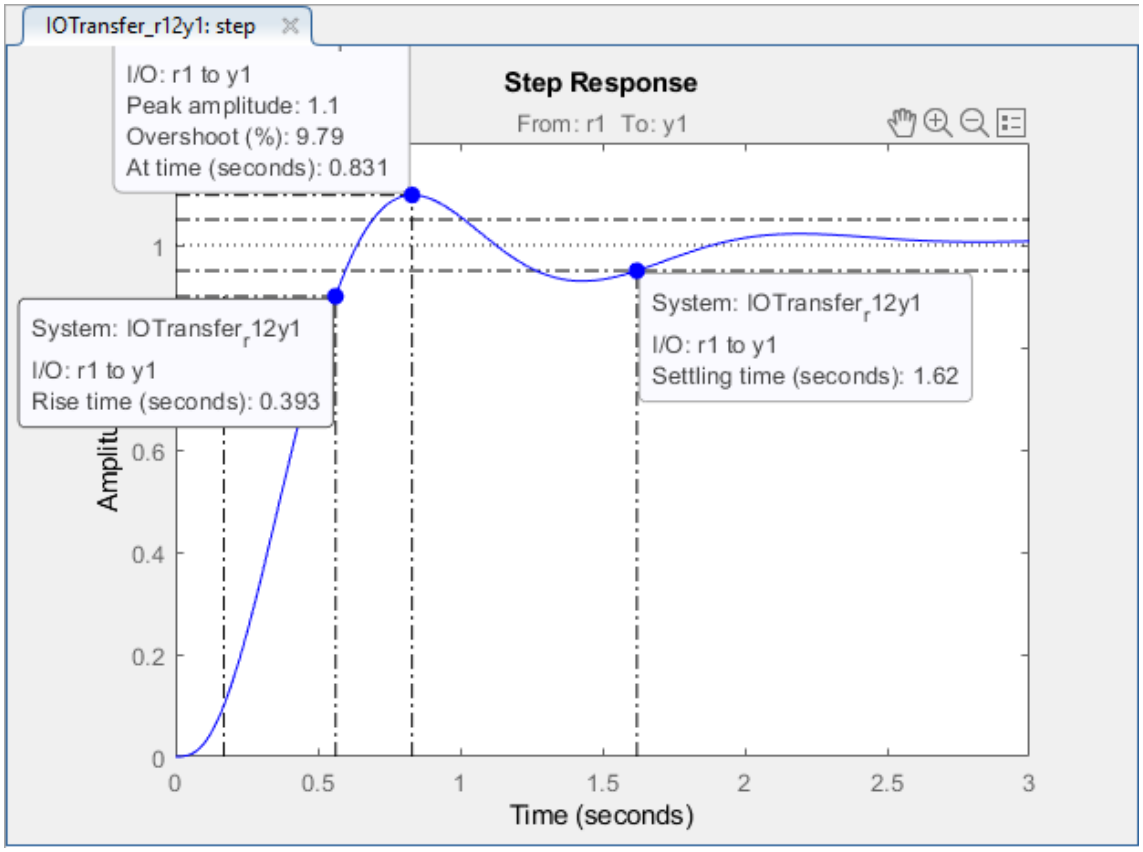
سنستعمل Control System Designer من أجل الضبط الأوتوماتيكي للمصححات من أجل استخدام هذه الطريقة، نذهب إلى اللائحة Tuning Methods لشريط Control System Designer في MATLAB. ونختار PID Tuning تحت لائحة Automated Tuning.

هناك خيارين يمكن اختيارها من لائحة المنسدلة Tuning method، هما Robust response time او Classical design formulas. إن خوارزمية Robust response time تولف بشكل أوتوماتيكي معاملات المصحح PID من أجل الموازنة بين سرعة الاستجابة والصلابة. يمكنها توليف كل المعاملات لأي نمط من المصحح PID ويمكن استخدامها لأجل نظام مستقر أو غير مستقر، أو تكاملي. بينما خوارزمية Classical design formula تتطلب نظام مستقر أو تكاملي ولا يمكنها توليف مرشح تفاضلي. إذا اخترنا Classical design formula، عندها في لائحة Formula يمكن مشاهدة عدد من الخيارات. هذه الخيارات تبدأ من تقنيات ارشادية مثل Ziegler-Nichols، إلى التقنيات العددية التي تبحث على كل أرباح التحكم الممكنة من أجل تقليل أدلة الأداة المحددة. من أجل الحالة المدروسة، نختار خوارزمية Robust response time.

عندها في لائحة Design mode، يمكن اختيار Time أو Frequency. بما أن متطلبات النظام قيد الاهتمام تم التعبير عنها في الوسط الزمني، نختار Design mode كـTime.

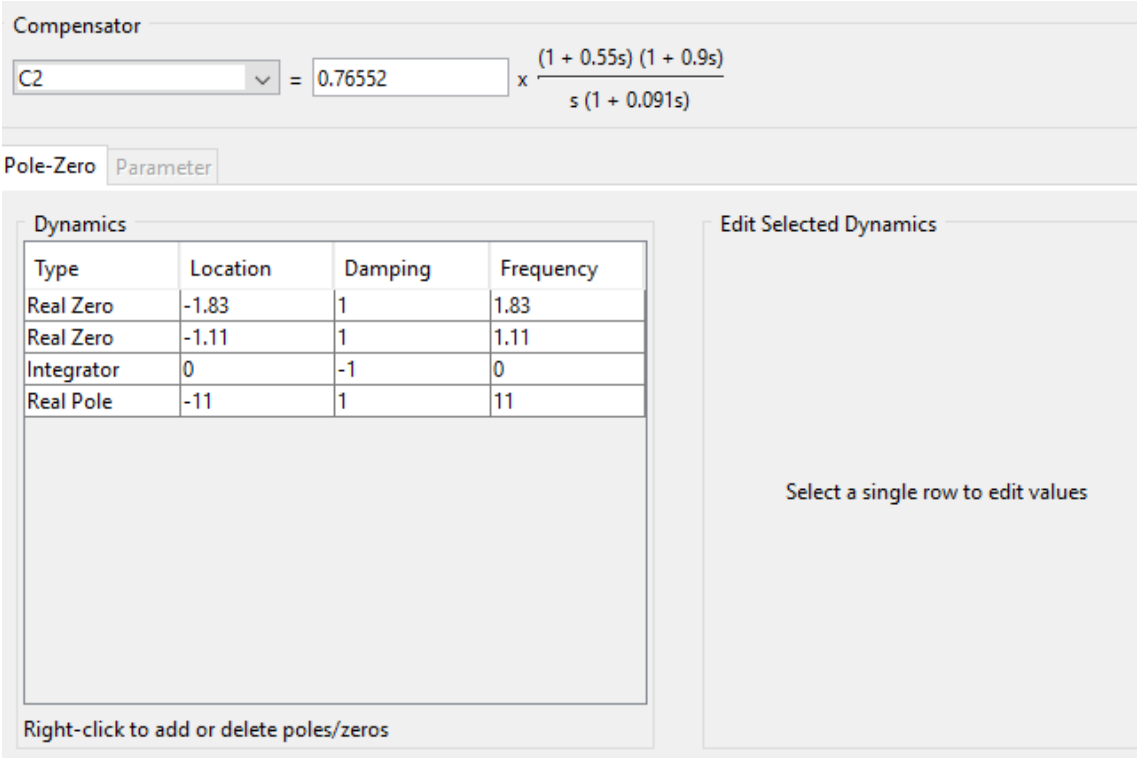
بعدما يتم ضبط كل إعدادات التوليف، يتم النقر على زر Update Compensator ثم تبدء عملية التوليف بشكل أنعم حتى الحصول على الاستجابة المطلوبة.

يظهر الشكل التالي استجابة النظام بعد تصميم مصحح الحلقة الداخلية والخارجية:



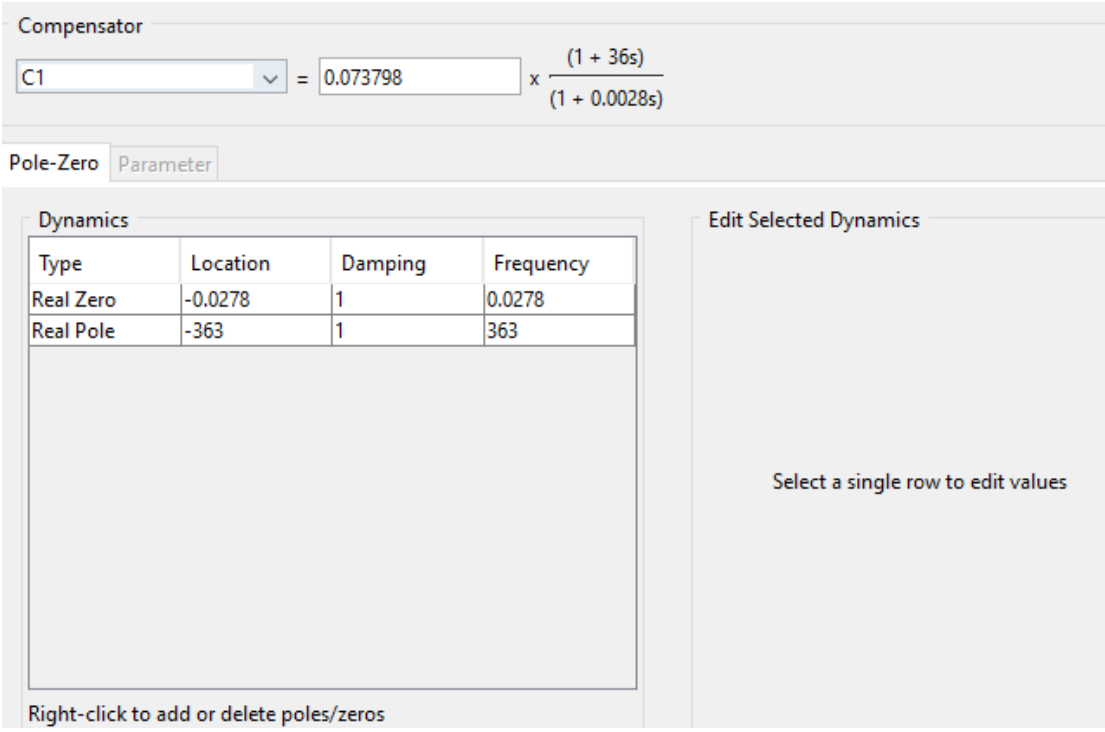
شكل 61-استجابة النظام بعد إضافة حلقتي تحكم

يوضح الشكل التالي معاملات مصحح الحلقة الداخلية PID مع مرشح :



شكل 62-معاملات مصحح حلقة التسارع

يوضح الشكل التالي معاملات مصحح الحلقة الخارجية PD مع مرشح:



شكل 63-معاملات مصحح حلقة الموضع

نلاحظ من شكل الاستجابة الموضح في الشكل (61) أن التصميم يحقق المتطلبات التصميمية المفترضة لذا يعتبر التصميم مقبول.

4.5.1.1 التنفيذ العملي لحلقة التسارع والوضع:

تم استخدام حساس تسارع من نوع Piezoelectric من أجل قياس التسارع، ولكن اتضح أن الحساس لا يقوم بقياس التسارع الستاتيكي والذي يعتبر القيمة المفيدة في التحكم بالتسارع وإنما يقيس التسارع الديناميكي، أي التغير في التسارع وبالتالي يعتبر غير مفيد في مسألة التحكم في التسارع، وبسبب عدم توفر حساس تسارع مناسب من نوع MEMS إلا في الأيام الأخيرة من عمل المشروع، لم يتيح الوقت فرصة لتنفيذ حلقتي التحكم بالتسارع والموضع التي يمكن تنفيذها في أعمال أخرى وفق المنجهية المشروحة سابقاً.

الخاتمة والتوصيات المستقبلية:

في هذا العمل تم بناء وتطوير دارة قيادة موثوقة تلبي متطلبات التشغيل والتحكم بالمنظومة الكهروهيدروليكية، من ثم تطبيق إجرائية التعرف على النظام وتحصيل نماذج معاملاتية خطية وغير خطية تستخدم في تطبيقات التحكم والتنبؤ، بالنهاية تم اعتماد نموذج العملية في تصميم مصحح للتحكم بالموضع مع تغذية أمامية، تم بعدها تصميم نظام تحكم تتابعي للتحكم بالتسارع والموضع. في الختمام تم تصميم واجهة تخاطبية في بيئة ماتلاب تسهل آلية القيادة والتحكم بالمخدم.

ولا بدَّ من تقديم الاقتراحات والتوصيات التي تغني العمل وتزيد من أهميّته وهي:

- استكمال البحث في موضوع التعرف على نظام المخدم من أجل تحصيل نماذج معاملاتية لاخطية تحاكي سلوك النظام الحقيقي في كامل مجال العمل.
- استكمال موضوع التحكم بالتسارع في إطار تحقيق بروفيل تسارع مطلوب باستخدام حساسات قياس مناسبة.
- استثمار إمكانية قياس التيار بإضافته كحلقة داخلية إلى نظام التحكم التتابعي.

المراجع العلمية

1. محمد الصالح و إيمان السروجي ،"تصميم وتنفيذ منصة قيادة واختبار لطاولة رجّاجة مقادة بمخدم هيدروليكي"،المعهد العالي للعلوم التطبيقية والتكنولوجيا، حلب، 2022.
2. Arduino DUE https://store.arduino.cc/usa/due
3. SAM3X Atmel-ATARM-SAM3XA-Datasheet_23-Mar-15.
4. Lennart Ljung, ‘System Identification : Theory for the user, Prentice Hall, Engelwood Cliffs, New Jerssy, 2nd edition 1989.
5. LIU Bo, ZHAO Jun, and QIAN Jixin “Design and Analysis of Test Signals for System Identification”, V.N. Alexandrov et al. (Eds.): ICCS 2006, Part III, LNCS 3993, pp. 593 – 600, 2006. © Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2006
6. MATLAB, (R2020a) and Simulink (Ver. 8.9), the MathWorks, Inc,
7. Abdul Ghani Al-Bakkar, “Real Time Temperature Control of a Test Rig” MSC dissertation, Control Engineering, University of Bradford, U. K., 1993
8. JOHN F. GORMLEY, *“TIME-DELAY OF VARIOUS TYPES OF HYDRAULIC REVERSING SYSTEMS”*, Oklahoma State University, 1958
9. د. عبد الغني البكار، "أساسيات في معالجة الإشارة"، المعهد العالي للعلوم التطبيقية التكنولوجيا، Ver. 1.1، حلب 2024.
10. د. عبد الغي البكار "التحكم الحديث – التحكم الرقمي"، المعهد العالي للعلوم التطبيقية والتكنولوجيا، Ver. 2.0، حلب 2024.
11. محمود حداد "تقدير النموذج التجريبي لمحرك تيار مستمر" مشروع السنة الرابعة في هندسة الطيران المعهد العالي للعلوم التطبيقية والتكنولوجيا، حلب 2022.
12. محمود حداد "التعرف التجريبي والتحكم بنظام مخدم كهروهوائي"، مشروع السنة الخامسة في هندسة الطيران المعهد العالي للعلوم التطبيقية والتكنولوجيا، حلب 2022.
13. David Vaseliou and Luis Cordova, “Using Motor Drivers to Drive Solenoid”, Application Note, Texas Instruments Incorporated.

14. TI Designs: TIDA-01506 –December 2017, “Reference Design for Automotive, Proportional-Solenoid Current Sensor”, Texas Instruments .Incorporated

15. BTS 7960, “High Current PN Half Bridge Data Sheet”, Rev. 1.1, December 2004’

16. Atos, the Italian electrohydraulic,” Reduced Proportional Valve type RZGO-TERS”, -AERS 3Way

17. Gene F. Franklin, “Digital Control of Dynamic systems”