

توليف آلي لمتحكم PID باستخدام المنطق الضبابي

رداح عبد الحميد *

(تاريخ الإيداع 17 / 9 / 2020. قُبِلَ للنشر في 9 / 6 / 2021)

□ ملخص □

يعالج هذا البحث إمكانية استخدام المنطق الضبابي في توليف بارامترات المتحكم (PID) بشكل آلي بالمقارنة مع الطرق التقليدية للحصول على خرج (إشارة تحكم) أكثر جودة واستقراراً (أقل اضطراباً) وذو زمن صعود أقل. من المعروف أن الطرق التقليدية في توليف بارامترات المتحكم PID تعتمد على إيجاد قيم مناسبة لبارامترات المتحكم عند التصميم اعتماداً على قيم معينة لمتحولات النظام، والتي قد تتغير عند التطبيق العملي، مما يؤدي إلى تغير في منحني الاستجابة، لذلك هناك حاجة حقيقية لعملية توليف مستمرة (online tuning). يدرس هذا البحث استخدام نظام خبير يعتمد آلية المنطق الضبابي في عملية الاستدلال (Expert System using Fuzzy Logic Inference) لتوليف آلي (مستمر) للمتحكم PID اعتماداً على مجموعة قواعد انتاج محصلة من خبرة متأتية من دراسة متأنية للمتحكم ومجمل العوامل والمتحولات المؤثرة على أدائه.

وقد توصل البحث إلى أن:

استخدام التحكم الضبابي في تحديد بارامترات المتحكم يحقق مزايا مختلفة، فهو يؤمن توليفاً متكيفاً مستقراً للمتحكم ذو زمن استجابة واستقرار للخرج يضاهي تلك للمتحكم الذي جرى ضبط بارامتراته بطريقة تسيجلر - نيكولس التقليدية (Ziegler-Nichols traditional Method).

الكلمات المفتاحية: متحكم PID، المنطق الضبابي، النظام الخبير

* قائمة بالأعمال، قسم هندسة الميكاترونك، كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية، جامعة تشرين، اللاذقية، سورية.

بريد الكتروني: radahabdahmed@gmail.com

PID Controller Automatic Tuning Based Fuzzy Logic

Radah Abdalhamed *

(Received 17 / 9 / 2020. Accepted 9 / 6 / 2021)

□ ABSTRACT □

This paper shows the advantage of using fuzzy logic based Expert System in online-tuning PID parameters compared to traditional methods in order to obtain an output (control signal) with less stability time and better quality.

It is known that the traditional methods of tuning the PID controller parameters are methods that depend on finding suitable values for the controller parameters during designing period, considering certain values of system parameters that can be changed during the operation. This can lead to a change in the response signal. Therefore, there is a real need for online tuning. This research studies the use of an Expert System used Fuzzy Logic Inference to automatically tuning (online) the PID controller based on a set of production rules obtained from experience derived from a careful study of the controller and the factors and variables affecting his performance.

The research reached the result:

The use of fuzzy control in determining the PID-controller parameters is effective and achieves various advantages, as it is a stable adaptive tuning of the controller with less response time and better output stability, comparable to those of the controller, whose parameters have been calculated using the traditional Ziegler-Nichols method.

Keywords: PID Controller, Fuzzy Logic, Expert System

* Academic Assistant, Mechatronics Department, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria, E-mail: radahabdalhamed@gmail.com

مقدمة:

تعد متحكمات PID من أكثر المتحكمات استخداماً في التطبيقات الصناعية (أكثر من 90% من تطبيقات التحكم) وذلك لبساطتها وأدائها الجيد تحت مختلف ظروف التشغيل [1].

يتكون هذا المتحكم من ثلاثة أجزاء [2]:

- جزء تناسبي (P) يتناسب مع خطأ التحكم في الخطوة الحالية.
 - جزء تكاملي (I) يتعلق بالقيم السابقة لخطأ التحكم، يعرض مجموع الخطأ أو قيمة المساحة تحت منحنى الخطأ.
 - جزء تفاضلي (D) يتوقع القيم المستقبلية، أي يقوم بالتصحيح وفق نسبة الانزياح عن القيمة المرجعية.
- يمثل هذا المتحكم بثلاثة أشكال مختلفة حسب طريقة توصيل الأجزاء أعما هو الدارة التفرعية المبينة في الشكل (1) [3]، ويعطى خرجها (إشارة دخل النظام) بالعلاقة:

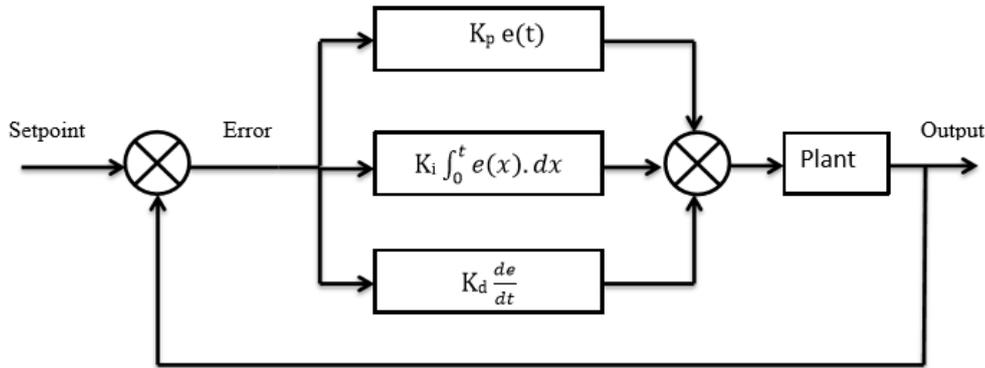
$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(x) dx + K_d \frac{de}{dt} \quad (1)$$

حيث:

K_p : الريح التناسبي للمتحكم

K_i : الريح التكاملي للمتحكم

K_d : الريح التفاضلي للمتحكم



الشكل(1): مخطط عام لمتحكم PID (الشكل التفرعي)

لتنقى العملية الأهم وهي ضبط قيم ربح أجزاء المتحكم المبينة في العلاقة (1)، أي توليف هذا المتحكم. لهذا الغرض يوجد الكثير من الطرق المستخدمة منها ما هو رياضي تحليلي تقليدي ومنها ما هو حديث يعتمد على خوارزميات الذكاء الاصطناعي، حيث دفع تعقد العمليات الصناعية المعاصرة المصممين للبحث في استراتيجيات تحكم فعالة لتحقيق أداء أفضل للأنظمة الديناميكية الحديثة [4].

أهمية البحث وأهدافه:

يقدم هذا البحث نظاماً خبيراً يعتمد المنطق الضبابي لتوليف (ضبط) قيم المتحكم PID وبشكل آلي متجاوب مع ديناميكية النظام. ذلك أن آليات التوليف التقليدية التي تعتبر عند التوليف أن النظام خطي باتت غير قادرة تماماً على التجاوب مع تعقيد وديناميكية الأنظمة الحديثة. يعتبر المنطق الضبابي إحدى آليات الذكاء الاصطناعي كما الشبكات

العصبونية وغيرها من خوارزميات الأمثلة، لكنه يختلف عنها في بساطته وشفافيته وعدم حاجته للتدريب أو لضبط أولي دقيق لمتحولات متنوعة.

يهدف هذا البحث الى تبيان إمكانية استخدام نظام خبير يعتمد المنطق الضبابي في التوليف الآلي للمتحكم PID.

طرائق البحث ومواده:

1- آليات توليف المتحكم PID

تصنف عادة طرق التوليف هذه في مجموعتين أساسيتين: المجموعة الأولى هي مجموعة الطرق الكلاسيكية/التحليلية، والثانية مجموعة الطرق الحديثة وهي التي تعتمد خوارزميات الذكاء الاصطناعي والأمثلة.

يوجد مجموعة من الطرق الكلاسيكية المستخدمة في التوليف كطريقة توضع الأقطاب (Pole-Placement) والطريقة التجريبية التي تعتمد على المحاولة والخطأ (Trail and error)، أيضاً طريقة كوهين-كون (Cohen-

Coon) والتي تستخدم تقنية الحلقة المفتوحة. إلا أن أقدم هذه الطرق وأكثرها استخداماً هي طريقة تسيجلر-نيكولس (Ziegler-Nichols (Z-N))، إذ تعود نسختها الأصلية الى عام 1942، وتستخدم نسختها الأولى تقنية الحلقة

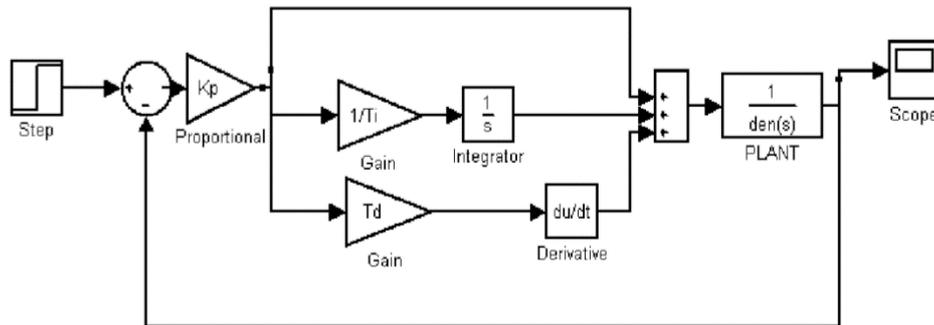
المفتوحة لكنها طورت لتستخدم تقنية الحلقة المغلقة، مع الإشارة الى وجود دراسات مختلفة تتصدى لتطوير هذه الطريقة [5,6].

في طريقة تسيجلر-نيكولس تجعل قيم الربح التكاملي والتفاضلي صفرية وتغيير قيمة الربح التناسبي حتى الوصول لقيمة ربح أعظمية تسمى الربح التناسبي الأمثل، عند قيمة هذا الربح تكون إشارة الخرج مستقرة وتهتز بمطال ثابت. إن

زيادة قيمة الربح التناسبي عن قيمة الربح الأمثل يؤدي إلى اهتزازات لها انحراف لا صفري (اهتزازات متغيرة بالقيمة)، بعد ذلك يتم ضبط قيم الثوابت الزمنية للجزء التكاملي والتفاضلي بحيث تلاحق الإشارة المرغوبة.

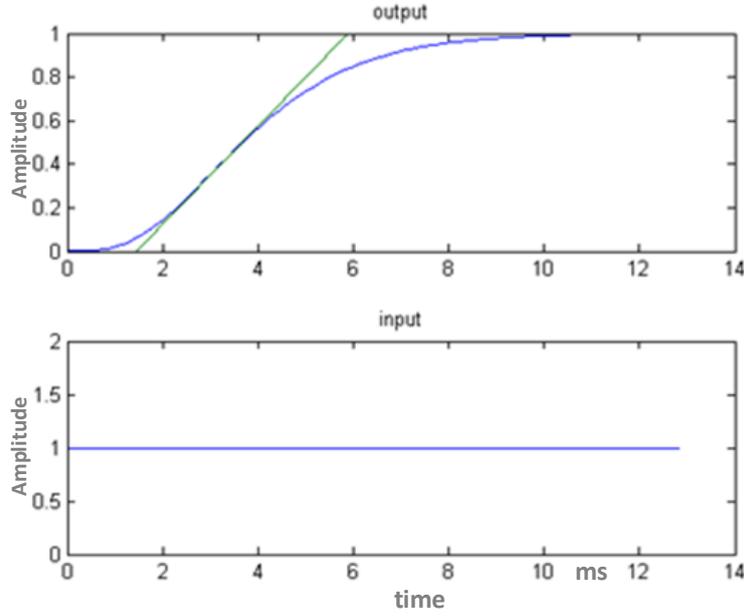
لكن المشكلة الأساسية في هذه الطريقة أن إنقاص زمن الاستجابة يؤدي إلى زيادة مطال الاهتزاز ومن أجل التخلص من الاهتزاز فإننا نحتاج لزمن طويل لاستقرار الإشارة.

يبين الشكل (2) نموذج المتحكم المستخدم عند التوليف بطريقة (Z-N) في برنامج MATLAB/SIMULINK وهو يحاكي الشكل التمثيلي اللا تفاعلي للمتحكم [3].



الشكل(2): نموذج متحكم PID في MATLAB/SIMULINK اعتماداً على شكل التمثيل اللا تفاعلي

عادةً تأخذ استجابة النظام شكل الحرف S (S shaped). كما هو مبين في الشكل (3) لأجل تابع دخل مستمر وهي الإشارة المرغوبة التي يجري تعقبها في خوارزمية (Z-N).



الشكل(3): استجابة شكل حرف S للمتحكم PID

أما الطرق الحديثة في حساب هذه الثوابت فتعود لنهايات القرن الماضي/بدايات القرن الحالي. من أكثر هذه الطرق استخداماً الشبكات العصبونية الاصطناعية، إذ يعرض البحث [7] استخدام شبكة عصبونية لتوليف متحكم PID مستخدم في جملة التحكم الخاصة باستخلاص البنزين في مصفاة نפט، حيث استخدم الباحثون شبكة انتشار أمامي متعددة الطبقات (multilayer feed-forward ANN) تدرب بطريقة الانتشار العكسي (Back propagation)، ذات دخل واحد لقيمة حالة النظام في اللحظة i ، وثلاثة مخارج يعطي كل منها معامل كل متحكم جزئي من المتحكم PID (K_p, K_i, K_d). أيضاً في [8] يستخدم الباحثون شبكة انتشار أمامي بسيطة تحتوي على طبقة مخفية واحدة للتحكم بنظام ضخ هواء في فرن يعمل على الغاز والفحم الحجري، للشبكة دخلان قيمة خرج النظام وكذلك قيمة الخطأ وثلاثة مخارج لمعاملات المتحكم K_p, K_i, K_d . في [9] تستخدم شبكة عصبونية اصطناعية عودية (recurrent ANN) للتوليف الآلي لمتحكم PID، حيث تجرب الشبكة على أنظمة متعددة. أيضاً تتطرق بحوث أخرى لخوارزميات أمثلة حديثة، فيعرض البحث [10] آلية توليف ناعم لمتحكم PID تعتمد منطق مستعمرة النمل والمرجع [11] آلية توليف تعتمد الخوارزمية الجينية. أما البحث [12] فيعرض نظام مختلط (hybrid System) مؤلف من شبكة عصبونية اصطناعية وكذلك من خوارزمية جينية لضبط متحكم PID في نظام تكييف، إذ استخدمت الخوارزمية الجينية لأتمتة عملية تدريب الشبكة العصبونية باستخدام تابع هدف يمثل مجموع مربع الأخطاء.

تظهر خوارزميات التوليف الحديثة السابقة الذكر تحسناً نوعياً لأداء متحكم PID عنه عند استخدام طرق التوليف التقليدية وذلك من حيث سرعة الاستجابة وجودة الخرج ونعومته أيضاً عند شروط عمل مختلفة، لكن استخدام هذه الخوارزميات مرتبط ببعض الصعوبات، إذ تحتاج الشبكات العصبونية آلية معالجة غير شفافة وتحتاج لعملية تدريب باستخدام نماذج كثيرة، تكون أحياناً طويلة ومعقدة وقد يتطلب الأمر اجراء تعديلات في بنية الشبكة. كذلك الامر بالنسبة لخوارزميات الأمثلة الأخرى كالخوارزمية الجينية والتي تحتاج الى ضبط دقيق للقيم الابتدائية لمتحولاتها.

2- المنطق الضبابي (العائم) كآلية استدلال في نظام خبير [13,14]

يختلف المنطق الضبابي عن المنطق التقليدي في أمرين أساسيين: فهو يستخدم متحولات لغوية (linguistic Variables) في حين أن المنطق التقليدي يستخدم متحولات عددية، والأمر الثاني هو أنه يأخذ بعين الاعتبار أيضاً المنطقة ما بين القيمتين 0 و 1 خلاف المنطق التقليدي حيث تكون القضية المنطقية إما صحيحة أو خاطئة، أي إما 0 أو 1. يعرف المتحول اللغوي في هذا المنطق عن طريق مجموعات ضبابية، تعبر كل منها عن حالة من حالات المتحول وتحتوي على القيم العددية ذات الصلة مع معامل انتماء هو قيمة تابع انتماء (membership function) عند العنصر، يشكل تابع الانتماء التمثيل الرياضي لعلاقة العنصر بالمجموعة ويقع في المجال [0,1].

يبين الشكل (3) المخطط العام لنظام خبير يعتمد المنطق الضبابي كآلية استدلال ويتألف من الوحدات التالية:

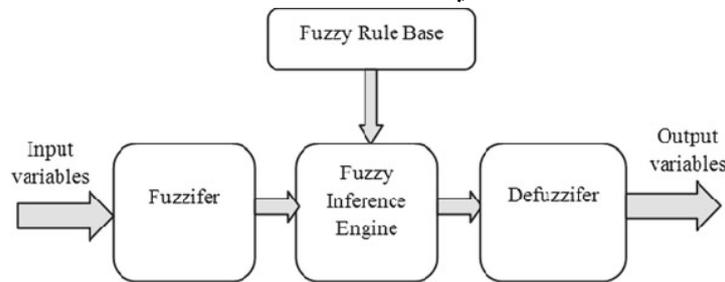
1. قواعد الإنتاج (Fuzzy Rule Base): وهي مجموعة من القواعد الشرطية (IF→THEN)، يحتوي كل من طرفيها على جمل منطقية وترتبط بين متحولاتها العمليات المنطقية المعروفة (NOT, AND, OR)، فمثلاً بفرض لدينا المجموعات الضبابية التالية لمتحولات مسألة ما (A1, A2, B1, B2, C1, C2)، يمكن صياغة قواعد النظام بالشكل:

IF x is A1 (belongs to A1) and y is B1 THEN z is C1

IF x is A2 and y is B2 THEN z is C2

حيث: x, y متحولات الدخل و z متحول الخرج.

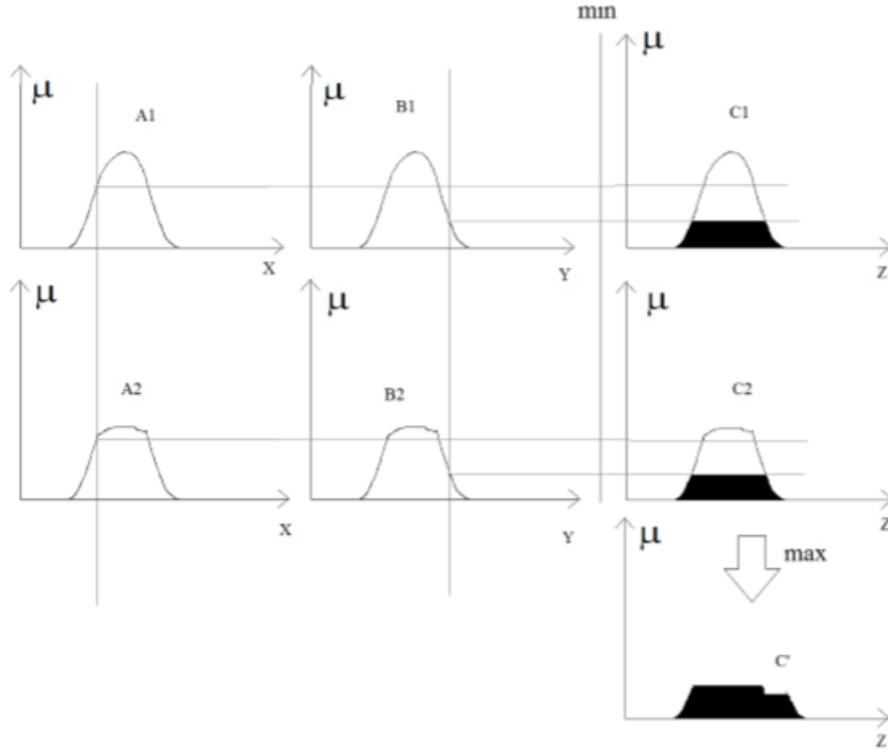
2. مضرب (Fuzzifier): وظيفته نقل القيمة الحقيقية (crisp value) إلى المجموعة/المجموعات الضبابية الموافقة، أي تحديد معامل انتمائها لمجموعات المتحول اللغوي.



الشكل(3): البنية العامة للنظام الخبير الضبابي

3. آلية استدلال تعتمد المنطق الضبابي (Fuzzy Inference Engine): تعمل هذه الآلية على معالجة القيم الضبابية للتوصل الى خرج النظام الضبابي. تبدأ العملية بحساب معاملات الانتماء للجزء IF من القواعد، حيث يوجد مجموعة من التوابع الرياضية المعبرة عن العمليات المنطقية والتي يقوم المصمم بتحديد ما يتناسب مع مسألته، تنتمي جميع التوابع المعبرة عن العملية المنطقية AND الى مجموعة التوابع الرياضية t-Norm، أما تلك المعبرة عن علاقة OR فتتنتمي الى مجموعة التوابع t-Conorm، أكثر هذه التوابع شيوعاً هو Standards Operation وصيغته Min-Max حيث تعبر Min عن علاقة AND و Max عن علاقة OR، وهي التوابع المستخدمة في هذا البحث، يوضح الشكل (4) هذه الطريقة بشكل بياني.

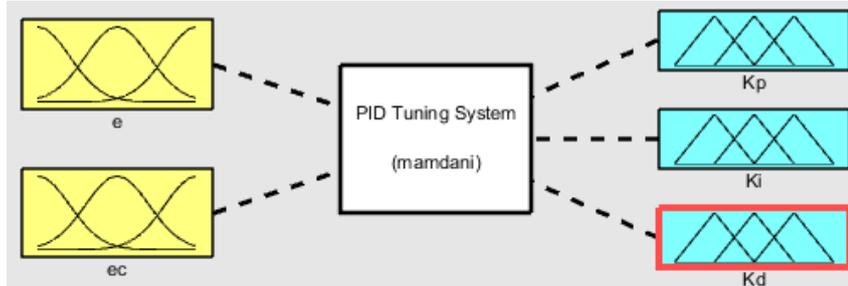
أما آليات الاستدلال فأشهرها آليتي Mamndani و Sugeno، حيث استخدمت آلية Mamndani في هذا البحث. 4. مزيل التضييب (Defuzzifier): ويقوم بتحويل القيم الضبابية الناتجة عن الاستدلال الى قيم عددية مفهومة للمستخدم، هنا توجد أيضاً طرق رياضية مختلفة لإنجاز هذه العملية، أشهرها طريقة مركز الثقل (Centroid Defuzzification Method) المستخدمة في هذا البحث.



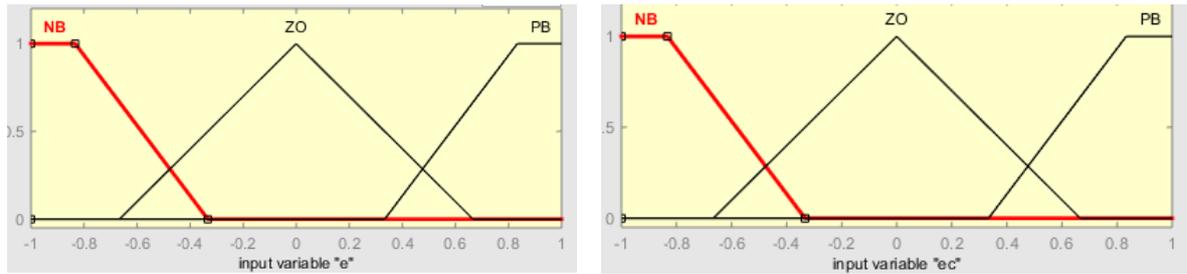
الشكل(4): نظام الاستدلال الضبابي باستخدام طريقة (min-max)

3- النظام الخبير المقترح

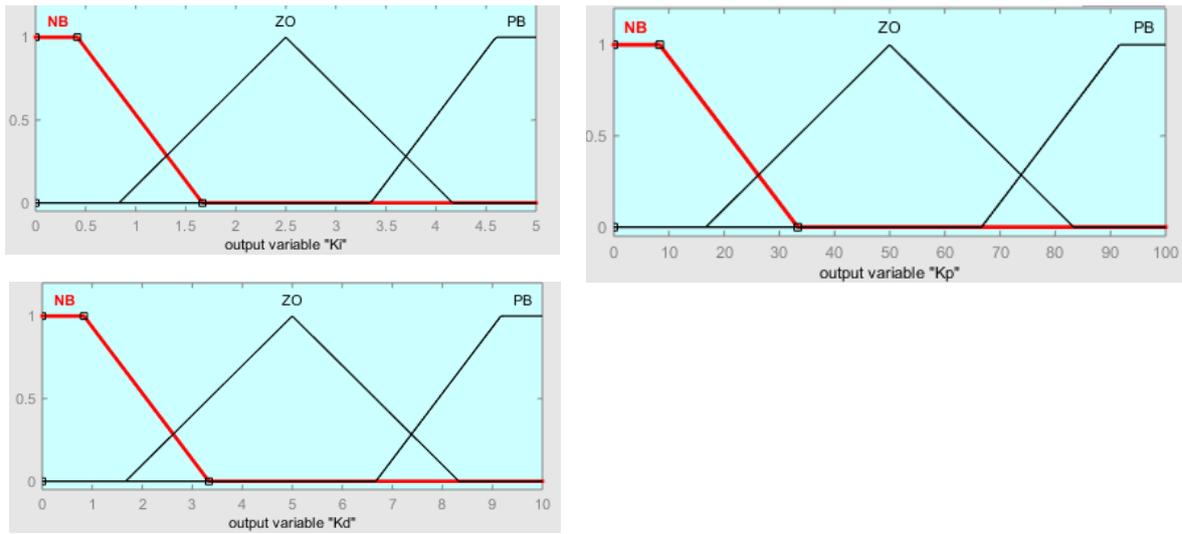
في تصميم المتحكم اعتمدت قيمتا الخطأ في الخطوة / error (e) ومقدار فرق الخطأ بين الخطوة / والخطوة السابقة (ec) كقيم دخل وتقع في المجال $[-1, +1]$ ، أما قيم الخرج فهي بارامترات المتحكمات الجزئية (K_p, K_i, K_d) حيث تقع K_p في المجال $[0, 100]$ و K_i في المجال $[0, 5]$ و K_d في المجال $[0, 10]$. يبين الشكل (5) البنية العامة لهذا المتحكم، تم اختيار ثلاثة متحولات (مجموعات ضبابية) لكل من قيم الدخل والخرج وهي: NB: negative big, ZO: approximately zero, PB: positive big، أما توابع الانتماء لكافة المجموعات الضبابية فهي مثلثية الشكل (الشكلان (6) و (7)).



الشكل(5): البنية العامة للمتحكم الضبابي المقترح



الشكل (6): توابع عضوية متحولات الدخل



الشكل (7): توابع عضوية متحولات الخرج

تعطى قواعد الإنتاج للنظام بالجداول (1)، (2) و (3).

الجدول(1): القواعد الضبابية للربح التناسبي

e/ec	NB	ZO	PB
NB	PB	PB	ZO
ZO	PB	ZO	NB
PB	PB	NB	NB

الجدول(2): القواعد الضبابية للربح التكامل

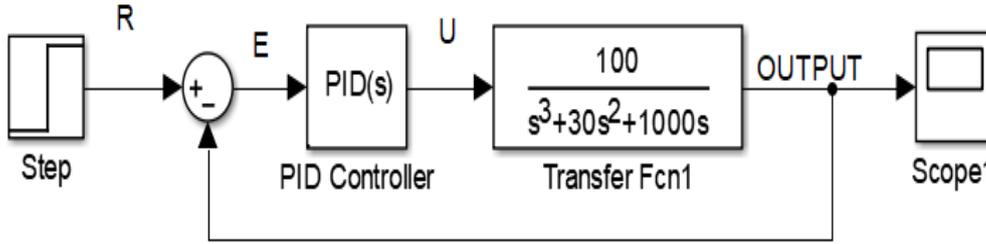
e/ec	NB	ZO	PB
NB	NB	NB	ZO
ZO	NB	ZO	PB
PB	ZO	PB	PB

الجدول(3): القواعد الضبابية للربح التفاضلي

e/ec	NB	ZO	PB
NB	PB	NB	PB
ZO	ZO	NB	ZO
PB	PB	PB	PB

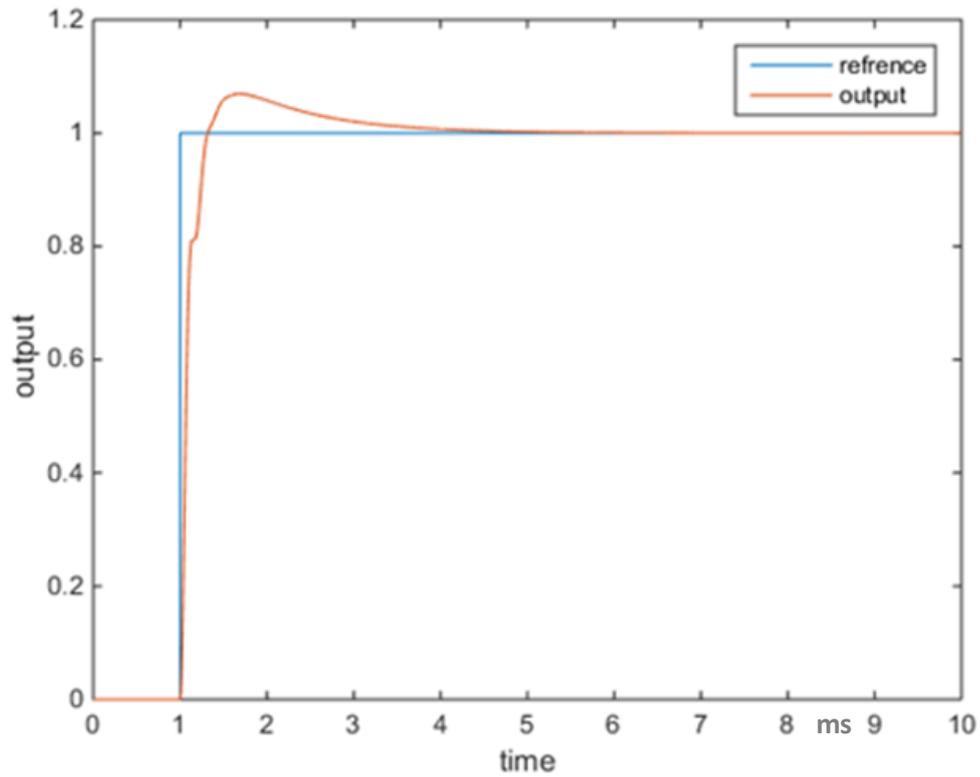
النتائج والمناقشة:

لإختبار النظام المقترح جرى اختيار تابع النقل التالي: $\frac{500}{s^3+30s^2+1000s}$ وهو يمثل من حيث الشكل العام تابع النقل لآلة تيار مستمر مزودة بمتحكم بالسرعة [4]. الخطوة الأولى كانت ضبط بارامترات المتحكم باستخدام خوارزمية Z-N وفق الدارة المبينة في الشكل (8)، حيث أعطى المتحكم بعد الضبط منحني الخرج المبين في الشكل (9). بعد ذلك جرى ضبط بارامترات المتحكم باستخدام النظام المقترح وفق الدارة المبينة في الشكل (10) وكان الخرج المبين بالشكل (11). يظهر الشكل (12) خرجي المتحكم بعد الضبط باستخدام خوارزمية Z-N (المنحني PID) وباستخدام النظام المقترح (المنحني FPID).

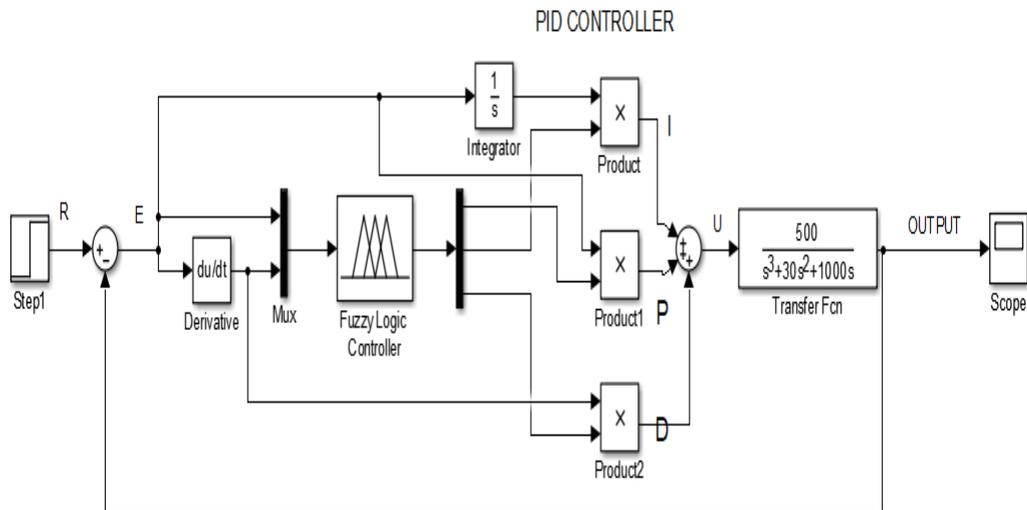


الشكل(8): دارة المتحكم PID في بيئة MATLAB/SIMULINK

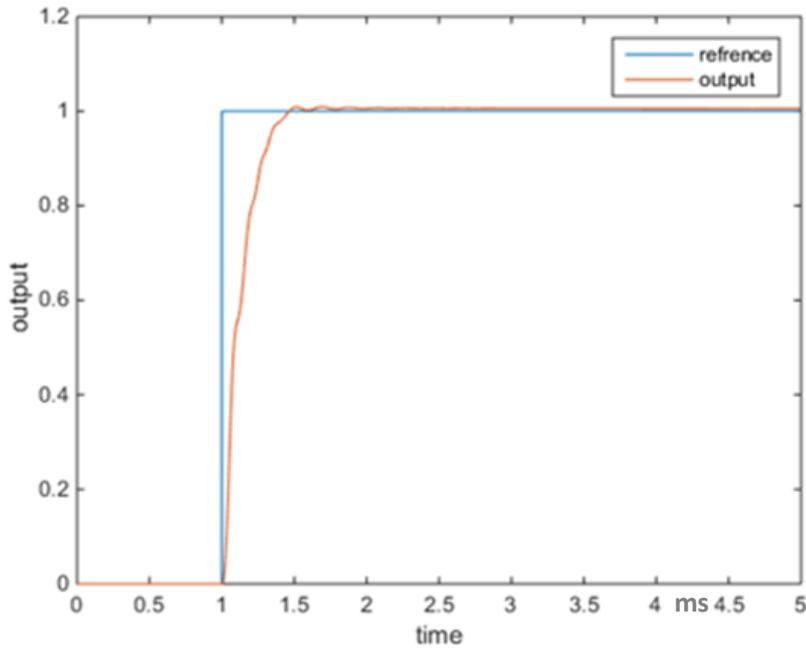
من الأشكال الثلاثة يظهر بوضوح أن متحكم PID الذي تم توليفه باستخدام النظام الضبابي ذو أداء أفضل من المتحكم الذي تم توليفه بطريقة Z-N فهو ذو زمن صعود واستقرار أقصر، فزمن استقراره لا يتجاوز 2 ms، في حين أن زمن استقرار المتحكم الذي تم توليفه بطريقة Z-N يتجاوز 4 ms. لدراسة تأثير تغير ما في النظام وشروط عمله نقوم بتغيير قيمة بارامتر من بارامترات تابع نقله (قيمة البسط) بحيث يصبح على الشكل التالي $\frac{100}{s^3+30s^2+1000s}$ ، يظهر الشكل (13) خرجي المتحكم بعد الضبط باستخدام خوارزمية Z-N (المنحني PID) وباستخدام النظام المقترح (المنحني FPID). أيضاً يبدو هنا واضحاً أن زمن استقرار المتحكم المؤلف بالنظام المقترح بقي بحدود 2 ms، أما زمن استقرار المتحكم المؤلف بطريقة Z-N فيزيد عن 8 ms.



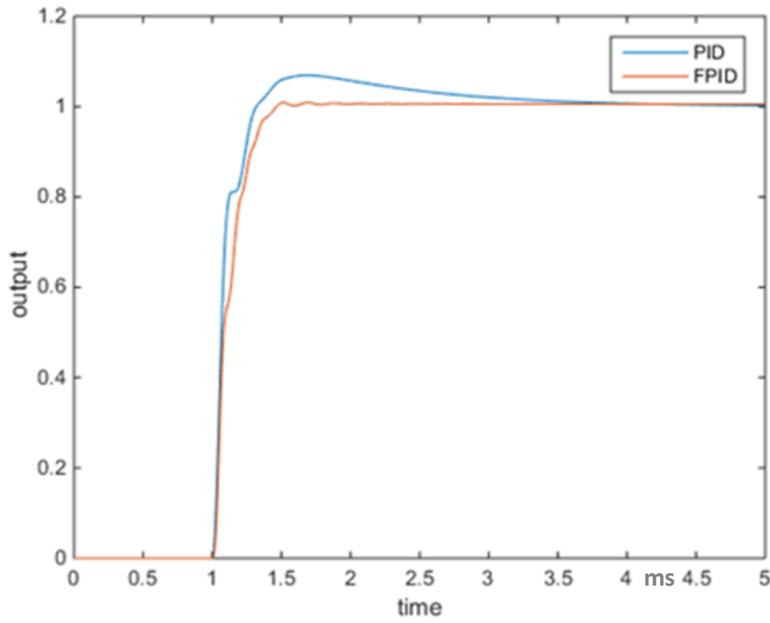
الشكل(9): استجابة المتحكم بعد ضبط بارامتراتة بطريقة Z-N



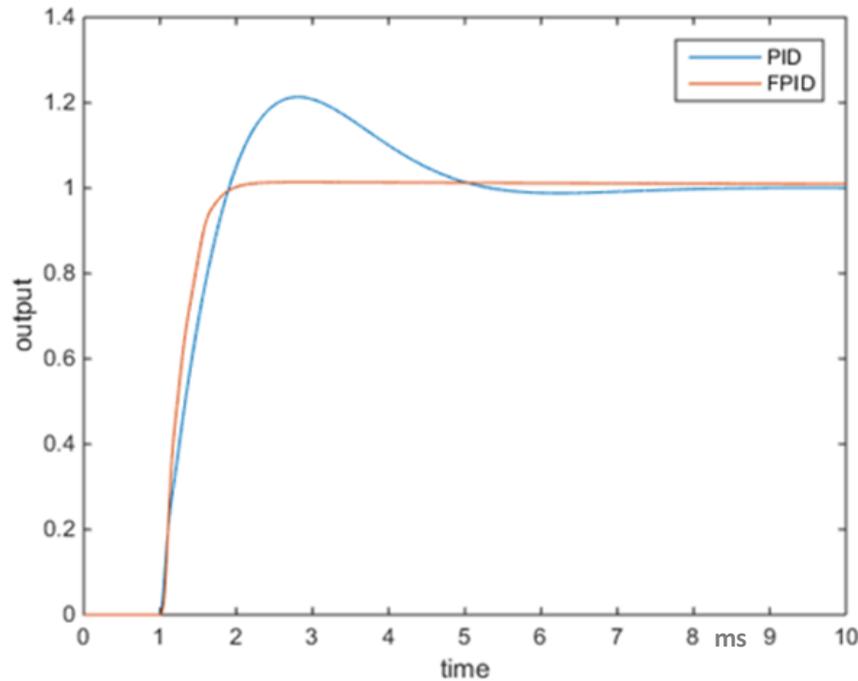
الشكل(10): دائرة توليف المتحكم PID باستخدام المنطق الضبابي



الشكل(11): استجابة المتحكم بعد ضبط بارامتراتة بالنظام الضبابي



الشكل(12): استجابتا المتحكم بعد التوليف بطريقة Z-N وبالنظام المقترح



الشكل(13): استجابتا المتحكم بعد تغير تابع النقل

الاستنتاجات والتوصيات:

- تم في هذا البحث تقديم نظام خبير يعتمد المنطق الضبابي كألية استدلال بغرض التوليف الآلي لمتحكم PID ومقارنة أدائه بمتحكم تم ضبطه بارامتراتة بالطريقة التقليدية الأشهر تسجيلر-نيكولس.
- يمتاز النظام المطور ببساطته وشفافيته فهو يتألف من دخلين وثلاثة مخارج، يبلغ عدد قواعده تسع قواعد فقط لكل متحكم جزئي منه، جميع توابع انتمائه مثلثية الشكل.
- بينت نتائج اختبار هذا النظام أنه حسن في أداء المتحكم بشكل واضح من حيث زمن الصعود والاستقرار، ولكن أيضاً من حيث ديناميكية هذا المتحكم في تقديم أداء جيد عند تغير ما في عمل النظام.
- يجب القيام باختبار هذا النظام من أجل متحكمات PID بأنظمة فيزيائية هندسية مختلفة والتحقق من جودة أدائه.

References:

- [1] Kiam Heong Ang, Gregory Chong and Yun Li: "PID Control System Analysis, Design and Technology", IEEE TRANSACTIONS ON CONTROL SYSTEMS TECHNOLOGY, VOL. 13, NO. 4, JULY 2005.
- [2] I. Tejado, B. M. Vinagre, J. E. Traver, J. Prieto-Arranz and C. Nuevo-Gallardo: "Back to Basics: Meaning of the Parameters of Fractional Order PID Controllers", MDPI Journals-Mathematics, 2019.
- [3] PID Controller Algorithms, <https://blog.opticontrols.com/archives/124>
- [4] Stan Žak: "An Introduction to Proportional Integral-Derivative (PID) Controllers", School of Electrical and Computer, Engineering, Purdue university, Indien, 2013. https://engineering.purdue.edu/~zak/ECE680/IntroPID_13.pdf

- [5] B. Mabu Sarif, D. V. Ashok Kumar and M. Venu Gopala Rao: "Comparison Study of PID Controller Tuning using Classical/Analytical Methods", International Journal of Applied Engineering Research, Volume 13, 2018.
- [6] Olalekan Olusoji Ige: "Automatic Tuning of PID Controllers", Master's Thesis, Faculty of Technology, Natural sciences and Maritime Sciences, university college of Southeast Norway, 2018.
- [7] H. Cheng, Y. Zhang, L. Kong and X. Meng: "The application of neural network PID controller to control the light gasoline etherification", 3rd International Conference on Advances in Energy, Environment and Chemical Engineering, 2017.
- [8] P A Chertovskikh, A V Seredkin, O A Gobysov, A S Styuf, M G Pashkevich and M P Tokarev: "An adaptive PID controller with an online auto-tuning by a pretrained neural network", Journal of Physics: Conference Series, 2019.
- [9] Elias Reichensdörfer, Johannes Günther, Klaus Diepold: "Recurrent Neural Networks for PID Auto-tuning", Institute for Data Processing Technische Universität München, Technical Report, 2017.
- [10] Tri Kuntoro Priyambodo, Andi Dharmawan, Oktaf Agni Dhewa, and Nur Achmad Sulisty Putro: "Optimizing control based on fine tune PID using ant colony logic for vertical moving control of UAV system", Advances of Science and Technology for Society, AIP Conference, 2016.
- [11] K. Mohamed Hussain, R. Allwyn Rajendran Zepherin, M. Shantha Kumar and S.M. Giriraj Kumar: "Comparison of PID Controller Tuning Methods with Genetic Algorithm for FOPTD System", Int. Journal of Engineering Research and Applications, Vol. 4, 2014.
- [12] Maryam Malekabadi, Majid Haghparast and Fatemeh Nasiri: "Air Conditions PID Controller Fine-Tuning Using Artificial Neural Networks and Genetic Algorithms", MDPI Journals-Computers, 2018.
- [13] Apostolos Syropoulos and Theophanes Grammenos: "A Modern Introduction to Fuzzy Mathematics", Wiley (publisher), 2020.
- [14] Itisha Gupta and Garima Nagpal: "Artificial intelligence And expert Systems", Mercury Learning and Information, 2020.