

نمذجة المنظم PID باستخدام الفيچوال بيزك لتحسين أداء نظم التحكم

الدكتور بلال شيجا*

الدكتور علي سليمان**

عزيز يوسف***

(تاريخ الإيداع 21 / 8 / 2007. قُبل للنشر في 30/9/2007)

□ الملخص □

تم في هذا البحث دراسة استخدام الحاسب في تصميم نظم التحكم الموزعة (distributed control)، ولقد تم إنشاء برنامج محاكاة متعدد النوافذ يستطيع أن يحاكي عملية التحكم ومن ثم تصميم متحكم مناسب من النوع PID (Proportional Integral Derivative) استخدم في التطبيق العملي. تتضمن العمليات الحقيقية تأخيراً زمنياً يظهر في تأخير استجابة النظام لدخل التحكم، لذلك قمنا بإضافة تأثير التأخير الزمني إلى برنامج المحاكاة، كما تم تقديم طريقة سميت التي تعالج مشكلة التأخير الزمني، وتم التوصل بالنهاية إلى برنامج يسمح بتمثيل نظم التحكم من الدرجة الأولى والثانية ورسم استجابتها وتحسين تلك الاستجابة باستخدام المنظم PID، كما تم من خلال البرنامج محاكاة نظم التحكم ذات التأخير الزمني ودراسة تأثير التأخير الزمني على استجابة النظام، ومن ثم تعويض التأخير باستخدام طريقة سميت.

الكلمات المفتاحية: المنظم التناسبي التكامل التفاضلي، نظم التحكم، استجابة النظام، تابع النقل، التأخير الزمني.

* مدرس في قسم الحاسبات والتحكم - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

** أستاذ مساعد في قسم الحاسبات والتحكم - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

*** طالب دراسات عليا في قسم الحاسبات والتحكم - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

Simulation of PID Controller Using Visual Basic to Improve Performance of Control Systems

Dr. Bilal Chiha*
Dr. Ali Solaiman**
Aziz Yousef***

(Received 21 / 8 / 2007. Accepted 30/9/2007)

□ ABSTRACT □

This research aims to use computer in designing distributed control systems. A program was established which could simulate the control process and then design a suitable controller of PID type to be put in practical use or actual process. This actual process contains delay time that appears in the delaying the system response to the control input. We also added a delay time to the simulation program and used smith method in dealing with the delay time. Finally, we obtained simulation program by which we could represent 1st and 2nd degree and plot its improvement responses (with PID). Then we could simulate the control systems of delay time and study the effect on system response.

Keywords: PID controller, Control system, System response transfer function, Time delay.

*Assistant Professor, Department of Computer and Automatic Control Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, Tishreen University, Latakia, Syria.

**Associate Professor, Department of Computer and Automatic Control Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, Tishreen University, Latakia, Syria.

***Master Student, Department of Computer and Automatic Control Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, Tishreen University, Latakia, Syria.

1- مقدمة:

عند دراسة نظم التحكم الموزع باستخدام الحاسب تبين لنا أنه من المجدي تصميم برنامج يحاكي عمليات التحكم المطلوبة ويبين تأثير إضافة منظم إلى تلك العمليات وذلك قبل تطبيقها على العملية الحقيقية لذلك تم تركيز البحث حول تحسين استجابة الأنظمة الخطية، ويستخدم تحويل لابلاس لاستقصاء وتحري الاستجابة الزمنية للأنظمة من الدرجتين الأولى والثانية، حيث إنه وفي أغلب الحالات يمكن التعبير عن نظم التحكم بنظم من الدرجة الأولى $G(s) = \frac{b}{s+a}$ أو الثانية $G(s) = \frac{b}{s(s+a)}$ ، حيث إن استجابة الأنظمة ذات الدرجات الأعلى هي عبارة عن مجموع استجابات من الدرجة الأولى والثانية.

إن تطبيق جهد ثابت على دارة معينة يكافئ تطبيق تابع الخطوة الواحدة، و زيادة هذا الجهد يمثل تطبيق تابع الخطوة الواحدة بمطال مختلف، لذلك سوف نعتبر في دراستنا هذه أن الدخل هو تابع الخطوة الواحدة (Unit Step Function) حيث إن هذا التابع يكفي لدراسة الحالة العابرة.

إن تغير بارامترات النظام قد تؤثر على الاستجابة العابرة أو الدائمة بشكل غير مرغوب أو قد تؤدي به إلى عدم الاستقرار مما يتطلب عندئذ استخدام منظم يحسن من الاستجابة العابرة والدائمة. لذلك تم الاهتمام بدراسة المنظم الشهير PID، حيث إن هذا المنظم هو الأكثر استخداماً في حلقات التغذية العكسية لعمليات التحكم وذلك منذ أكثر من 60 عام [1]، ولقد اختلفت طرق تصميم هذا المنظم وذلك مع بقاء جوهر الخوارزمية ثابتاً، وكان هناك اتجاهات مختلفة للباحثين في تصميم هذا المنظم باستخدام الحاسب، فعلى سبيل المثال تم تصميم برنامج محاكاة من قبل الباحثين (Cech Martin, Schlegel Milos) باستخدام (java applet) وتقديمه كأداة على الانترنت تمكن مستخدميه من رسم الاستجابة الزمنية بعد إضافة المنظم [2]، بينما نرى البعض الآخر يعتمد على المحاكاة باستخدام برنامج (MATLAB) في تصميم منظم PID رقمي لاستخدامه في تطبيقات الزمن الحقيقي [3]، أما موضوع البحث فهو برنامج محاكاة يحاكي نظم التحكم المختلفة من الدرجة الأولى والثانية، مع أو بدون PID، كما أن هذا البرنامج يرسم استجابة تلك النظم عند تغير بارامترات النظام أو بارامترات المنظم، بالإضافة إلى أن هذا البرنامج يسمح بإظهار أثر التأخير الزمني على الاستجابة وإمكانية تعويض هذا التأخير باستخدام طريقة سميث. إن لعملية النمذجة أهمية بالغة في تمثيل نظم التحكم ورسم استجابتها وتقدير قيم البارامترات اللازمة للنظام نفسه أو للمنظم للحصول على الاستجابة الأفضل وذلك قبل تطبيقها على النظام الحقيقي مما يعطي سرعة في التصميم وحماية للنظام.

2- أهمية البحث وأهدافه:

يهدف البحث إلى:

- نمذجة نظم تحكم من الدرجة الأولى والثانية باستخدام الحاسب وذلك لرسم الاستجابة الزمنية لتلك النظم برمجياً.
- دراسة تأثير بارامترات النظام على شكل الاستجابة.
- إظهار أهمية استخدام المنظم PID لتحسين الاستجابة الزمنية العابرة والدائمة لتلك النظم.
- إظهار تأثير التأخير الزمني على أداء نظم التحكم، ومعالجة مشكلة التأخير الزمني باستخدام طريقة سميث (Smith).

- تنفيذ برنامج مناسب يمكننا من القيام بما سبق ذكره.

3- طريقة البحث ومواده:

بعد دراسة طرق رسم الاستجابة واستنتاج معادلة المنظم PID قمنا وبعد الكثير من العمليات الرياضية باستخراج توابع النقل النهائية للأنظمة المدروسة (درجة أولى، درجة ثانية، مع وبدون المنظم PID، مع وبدون التأخير الزمني، مع طريقة سميث وبدونها)، ثم قمنا ببرمجة العلاقات النهائية ضمن بيئة برمجة مرئية (Visual Basic).

احتجنا في بحثنا إلى برنامج الفيجوال بيزك الذي قمنا بالبرمجة باستخدامه، كما احتجنا إلى كميوترات بمواصفات حديثة وذلك للحصول على الدقة المطلوبة عند رسم الاستجابة، وقد قمنا باستخدام شبكة الكميوترات الموجودة بمخبر الآلات الهيدروليكية في الجامعة وذلك لإجراء اختبارات نظم التحكم الموزعة.

3-1 رسم الاستجابة الزمنية:

لرسم الاستجابة الزمنية لنظام معطى تابع النقل له في مستوي لابلاس $G(s)$ يجب أولاً معرفة $U(s)$ تابع الدخل المطبق ثم استنتاج علاقة الاستجابة في مستوي لابلاس $C(s) = U(s) * G(s)$ ثم إجراء تحويل لابلاس العكسي للعلاقة الناتجة للحصول على المعادلة الزمنية للاستجابة [4,5].

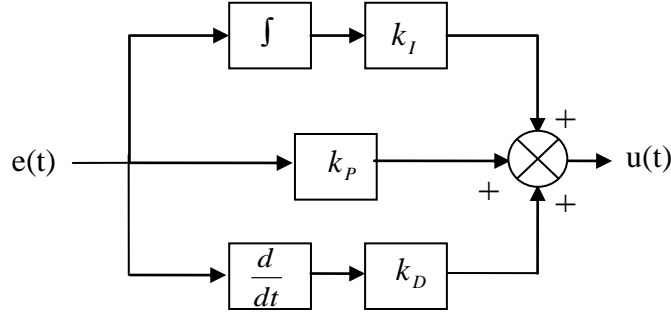
نسمي قيم s التي تعد بسط تابع النقل في مستوي لابلاس بأصفار التابع، وهذه الأصفار تؤثر على القيمة النهائية أي تؤثر أكثر على الحالة الدائمة من الاستجابة، بينما قيم s التي تعد المقام تدعى أقطاب التابع وهي تؤثر أكثر على شكل الاستجابة أي على المرحلة العابرة من الاستجابة، وهنا يأتي دور المنظم PID الذي يعيد تشكيل المعادلة المميزة للنظام (بسط ومقام تابع النقل) مما يغير في شكل الاستجابة [4].

3-2 استنتاج معادلة المنظم PID:

أنت تسمية هذا المنظم من الكلمات الإنكليزية التالية (Proportional Integral Derivative) أي (تناسبي، تفاضلي، تكاملي) ويعتبر من أكثر المعوضات استخداماً في أنظمة التحكم ذات التغذية العكسية [8,7,6,5] وتعطى معادلته بالعلاقة (1).

$$G(s) = \frac{k_D s^2 + k_P s + k_I}{s} \quad (1)$$

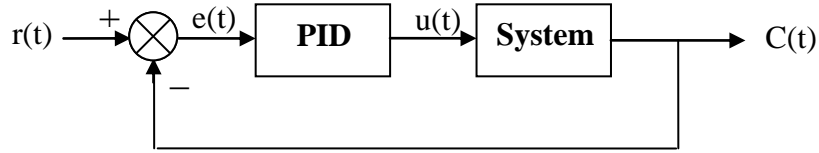
من المعادلة (1) نلاحظ أن المنظم PID يضيف صفرين وقطباً واحداً، مما يجعله يؤثر على الحالة الدائمة والحالة العابرة من الاستجابة تأثيراً متعلقاً بقيم k_P, k_D, k_I ، ومن الجدير ذكره أنه يمكن الاستغناء عن أحد مكونات هذا المنظم أي يمكن الاكتفاء مثلاً بالمنظمتين P و I [8,6]، ويبين الشكل (1) المخطط الصندوقي لهذا المنظم.



الشكل (1) المخطط الصندوقي للمنظم PID

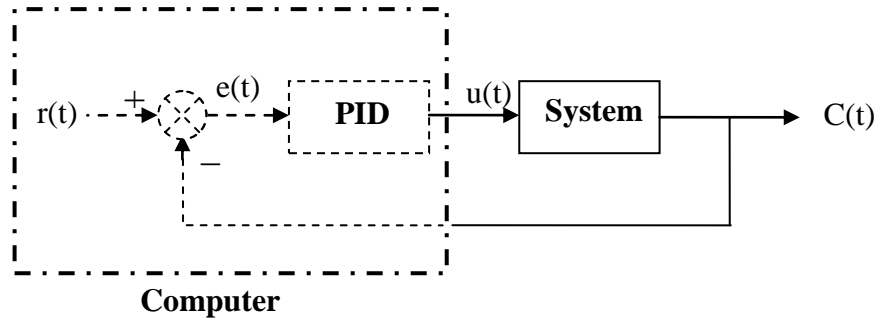
3-3 تصميم المنظم PID:

يمكن تصميم هذا المنظم باستخدام الدارات الالكترونية (مقاومات ومكثفات)، أو باستخدام مضخم العمليات ويتم إضافة المنظم على التسلسل مع النظام المراد التحكم به عن طريق حلقة تغذية عكسية [5,6,7,8] كما يبين الشكل (2).



الشكل (2) المخطط الصندوقي لنظام تحكم بتغذية خلفية بعد إضافة المنظم PID على التسلسل مع النظام.

- كما يمكن تصميم المنظم باستخدام المحاكاة على الحاسب لتحسين استجابة النظام ويبين الشكل (3) دور الحاسب في حلقة التحكم حيث إنه يقوم بدور مقارن ومتحكم، ويتطلب ذلك عدة أمور أهمها:
- منفذ للإخراج، وذلك لنتمكن من إخراج الإشارة $u(t)$ من الحاسب إلى النظام.
 - منفذ للإدخال (طبعاً يمكن أن يكون نفس المنفذ السابق)، وذلك لنتمكن من إدخال الإشارة $c(t)$ المقاسة من خرج النظام إلى الحاسب.
 - واجهات ربط، لملائمة الإشارة بين الحاسب والنظام سواء في الإدخال أو الإخراج.
 - برنامج مناسب سنأتي على ذكر خوارزميته لاحقاً.



الشكل (3) استخدام الحاسب كمنظم PID

4-3 نمذجة النظم باستخدام الحاسب:

للحصول على نموذج لنظام ما باستخدام الحاسب يجب علينا أولاً أن نجد تابع النقل النهائي للنظام في مستوى لابلاس $G(s)$ ، ثم نوجد علاقة الاستجابة $C(s)$ بعد معرفة تابع الدخل $U(s)$ فنحصل على:

$$C(s) = G(s) * U(s) \quad (2)$$

بعد ذلك نجري تحويل لابلاس العكسي للمعادلة (2) فنحصل على علاقة الاستجابة بالزمن $c(t)$ ، ثم نكتب التعليمات اللازمة لرسم هذه المعادلة باستخدام الحاسب.

أما بالنسبة للنظام الممثل بالمخطط الصندوقي المبين بالشكل (2) فيمكن إيجاد استجابته الكلية كما يلي:

$$G^*(s) = G_{PID}(s) * G_{System}(s) \quad (3)$$

$G^*(s)$ تابع نقل الحلقة المفتوحة.

$G_{PID}(s)$ تابع النقل للمنظم.

$G_{System}(s)$ تابع نقل النظام المطلوب التحكم به.

$$G(s) = \frac{G^*(s)}{1 + G^*(s)} \quad (4)$$

$G(s)$ تابع النقل الكلي للنظام.

$$C(s) = R(s) * G(s) \quad (5)$$

$$c(t) = L^{-1}[C(s)] \quad (6)$$

الاستجابة الأخيرة ستكون تابعة لبارامترات النظام ولبارامترات المنظم [8,7,5].

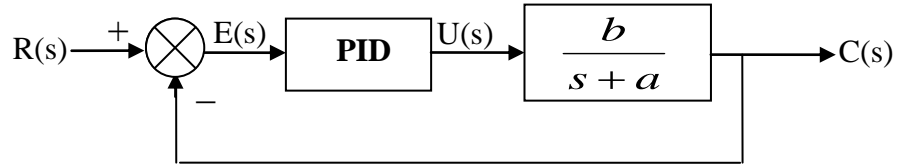
3-5 الدراسة النظرية لتأثير استخدام PID على نظم التحكم:

3-5-1 نظم الدرجة الأولى:

يمكن تمثيل تابع النقل لنظام من الدرجة الأولى بالشكل $G(s) = \frac{b}{s+a}$ أو بالشكل $G(s) = \frac{k}{\tau s + 1}$ وكلا

الشكلين متكافئان على اعتبار $a = \frac{1}{\tau}$, $b = \frac{k}{\tau}$.

اعتمدنا في بحثنا حول نظم الدرجة الأولى على الشكل الأول لتابع النقل، حيث يصبح بعد إضافة PID كما هو مبين في الشكل (4).



الشكل (4) المخطط الصندوقي لنظام من الدرجة الأولى مع PID

يمكن عندها إيجاد تابع النقل الكلي للمخطط المبين بالشكل (4) كما يلي:

$$G^*(s) = G_{pid}(s) * G_{sys}(s) = \left(\frac{k_D s^2 + k_P s + k_I}{s} \right) * \left(\frac{b}{s+a} \right) \quad (7)$$

$$G^*(s) = \frac{b k_D s^2 + b k_P s + b k_I}{s^2 + a s} \quad (8)$$

ويصبح تابع النقل الكلي $G(s) = \frac{C(s)}{R(s)}$ كما يلي:

$$G(s) = \frac{G^*(s)}{1+G^*(s)} = \frac{bk_D s^2 + bk_P s + bk_I}{(b.k_D + 1)s^2 + (bk_P + a)s + bk_I} \quad (9)$$

لاحظ في المعادلة (9) كيف أن بارامترات PID دخلت في بسط ومقام تابع النقل، أي أضافت وأعدت توزيع أصفاره وأقطابه، مما يمكنها من التأثير على الاستجابة العابرة والدائمة للنظام المدروس. بإعادة ترتيب المعادلة (9) نحصل على:

$$G(s) = \frac{a_1 s^2 + a_2 s + a_3}{s^2 + c_1 s + c_2} \quad (10)$$

$$a_1 = \frac{bk_D}{bk_D + 1}, a_2 = \frac{bk_P}{bk_D + 1}, a_3 = \frac{bk_I}{bk_D + 1} \quad \text{حيث}$$

$$c_1 = \frac{bk_P + a}{bk_D + 1}, c_2 = \frac{bk_I}{bk_D + 1}$$

باعتبار أن الدخل هو تابع الخطوة الواحدة $R(s) = \frac{1}{s}$ نجد أن:

$$C(s) = R(s) * G(s) = \frac{a_1 s^2 + a_2 s + a_3}{s(s^2 + c_1 s + c_2)} \quad (11)$$

$$C(s) = \frac{a_1 s^2}{s(s^2 + c_1 s + c_2)} + \frac{a_2 s}{s(s^2 + c_1 s + c_2)} + \frac{a_3}{s(s^2 + c_1 s + c_2)} \quad (12)$$

الآن يمكن إجراء تحويل لابلاس العكسي للعلاقة (12) بسهولة أكثر:

$$c(t) = L^{-1}[C(s)] = c_1(t) + c_2(t) + c_3(t) \quad (13)$$

$$C_3(s) = \frac{a_3}{s(s^2 + c_1 s + c_2)} \quad (14)$$

الحد الأخير $C_3(s)$ هو من الشكل $\frac{w_n^2}{s(s^2 + 2\zeta w_n s + w_n^2)}$

حيث $\zeta = \frac{c_1}{2 * w_n}$ ثابت التخماد، $w_n = \sqrt{c_2}$ التردد الطبيعي غير المتخامد.

يمكن إيجاد $c_3(t)$ وفق قيم ζ كما يلي [4]:

$$c_3(t) = \frac{a_3}{c_2} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1-\zeta^2}} e^{-\zeta w_n t} \cdot \sin(w_n \sqrt{1-\zeta^2} t + \tan^{-1} \frac{\sqrt{1-\zeta^2}}{\zeta}) \right) * 0 < \zeta < 1 \Rightarrow$$

$$* \zeta = 0 \Rightarrow c_3(t) = \frac{a_3}{c_2} (1 - \cos w_n t) \quad (15)$$

$$* \zeta = 1 \Rightarrow c_3(t) = 1 - e^{-w_n t} (1 + w_n t)$$

$$* \zeta > 1 \Rightarrow c_3(t) = 1 - e^{-(\zeta - \sqrt{\zeta^2 - 1}) w_n t}$$

وبالاستفادة من خواص تحويل لابلاس يمكن أن نكتب:

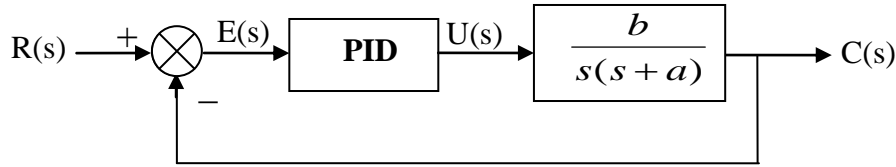
$$c_2(t) = \frac{a_2}{c_2} \frac{d}{dt} c_3(t), \quad c_1(t) = \frac{a_1}{c_2} \frac{d^2}{(dt)^2} c_3(t)$$

بعد إجراء الاشتقاق والتعويض في المعادلة (13) نحصل على الاستجابة الكلية للنظام المدروس وسنأتي على عرض النتائج لاحقاً.

2-5-3 نظم الدرجة الثانية:

كلما زادت درجة النظام كلما كانت العمليات الرياضية لإيجاد الاستجابة أصعب، والأفضل في هذه الحالة رد الاستجابة إلى مجموع استجابات من درجات أدنى.

ليكن لدينا تابع نقل لنظام من الدرجة الثانية من الشكل $G(s) = \frac{b}{s(s+a)}$. تتم عملية التحكم بهذا النظام بواسطة PID كما في الشكل (5)



الشكل (5) المخطط الصندوقي لنظام من الدرجة الثانية مع PID

تابع نقل الحلقة المفتوحة هو:

$$G^*(s) = G_{pid}(s) * G_{sys}(s) = \left(\frac{k_D s^2 + k_P s + k_I}{s} \right) * \left(\frac{b}{s(s+a)} \right) \quad (16)$$

$$G^*(s) = \frac{bk_D s^2 + bk_P s + bk_I}{s^3 + as^2} \quad (17)$$

فيكون $G(s) = \frac{C(s)}{R(s)}$ كمايلي:

$$G(s) = \frac{G^*(s)}{1 + G^*(s)} = \frac{bk_D s^2 + bk_P s + bk_I}{s^3 + (a + bk_D)s^2 + bk_P s + bk_I} \quad (18)$$

يمكن التعبير عن المعادلة (18) بالشكل التالي:

$$G(s) = \frac{n_1 s^2 + n_2 s + n_3}{s^3 + a_1 s^2 + a_2 s + a_3} \quad (19)$$

حيث

$$n_1 = bk_D, \quad n_2 = bk_P, \quad n_3 = bk_I$$

$$a_1 = a + n_1, \quad a_2 = n_2, \quad a_3 = n_3$$

نلاحظ أن المقام من الدرجة الثالثة وجذوره الثلاثة غير معلومة. من المعلوم أن للمعادلة من الدرجة الثالثة ثلاثة جذور (ثلاثة جذور حقيقية مختلفة أو اثنان منها متساويان أو جذر حقيقي وجذران عقديان مترافقان) ويمكن إيجاد تلك الجذور بعدة طرق رياضية ولكن جميع هذه الطرق طويلة وصعبة إلى حد ما، ولذلك اكتفينا بإيجاد جذر حقيقي واحد r_1 (للمعادلة من الدرجة الثالثة جذر حقيقي واحد على الأقل) وذلك بالتجريب من خلال مقطع برمجي يقوم بهذا

العمل، ثم قمنا بتقسيم المعادلة على المقدار $(s-r_1)$ فيكون ناتج القسمة عبارة عن معادلة من الدرجة الثانية، وبذلك نكون قد حولنا المعادلة من الدرجة الثالثة إلى جداء معادلتين من الدرجة الأولى والثانية، حيث أوجدنا تحويل لابلاس العكسي لكل منهما في الفقرات السابقة.

المعادلات الآتية توضح ما سبق ذكره:

بعد إيجاد r_1 وتقسيم مقام المعادلة (19) على $(s-r_1)$

$$s^3 + a_1s^2 + a_2s + a_3 = (s - r_1)(s^2 + c_1s + c_2) \quad (20)$$

ويتم الحصول على c_1, c_2 من عملية التقسيم فنجد أن:

$$c_1 = a_1 + r_1, \quad c_2 = a_2 + r_1(a_1 + r_1)$$

وتكون الاستجابة لتابع الخطوة الواحدة هي:

$$C(s) = R(s) * G(s) = \frac{n_1s^2 + n_2s + n_3}{s(s - r_1)(s^2 + c_1s + c_2)} \quad (21)$$

$$\Rightarrow C(s) = \frac{x_1}{s} + \frac{x_2}{s - r_1} + \frac{x_3s + x_4}{s^2 + c_1s + c_2} \quad (22)$$

نوجد الثوابت x_1, x_2, x_3, x_4 بأخذ النهاية أو بالمطابقة بعد توحيد المقامات.

يمكن كتابة الحد الأخير من المعادلة (22) بالشكل:

$$\frac{x_3s + x_4}{s^2 + c_1s + c_2} = \frac{x_3s}{s^2 + c_1s + c_2} + \frac{x_4}{s^2 + c_1s + c_2} \quad (23)$$

أصبح من الأسهل إيجاد تحويل لابلاس العكسي للاستجابة، حيث نلاحظ من المعادلة (22) أنها مجموع أربع حدود، الحدين الأول والثاني من الدرجة الأولى و الحدين الثاني والثالث من الدرجة الثانية.

بشكل مشابه أوجدنا الاستجابة لنظم أخرى من أشكال مختلفة مثل $G(s) = \frac{b}{(s + a_1)(s + a_2)}$ و

$$. G(s) = \frac{b}{s^2 + a}$$

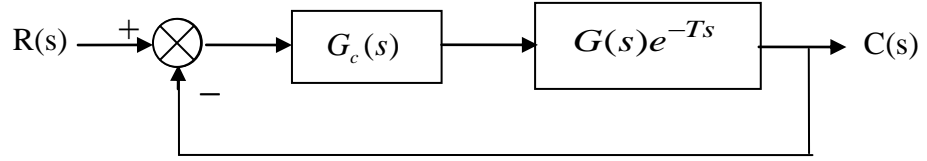
3-6 تأثير التأخير الزمني على شكل الاستجابة:

إن أغلب أنظمة التحكم تحتاج إلى فترة زمنية لتستجيب لإشارة التحكم، أي أن التأخير الزمني T هو الفترة الزمنية اللازمة لعبور إشارة التحكم من المتحكم إلى خرج العملية المتحكم بها ويعبر عنه بمستوي لابلاس بالعلاقة e^{-Ts} ، ولما كان هذا التأخير يسبب عدم استقرار في الاستجابة كان لا بد من دراسته وتقديم طريقة لتعويض هذا التأخير.

ويمكن التعبير عن التأخير الزمني بالمعادلة التالية:

$$. e^{-Ts} = \frac{2 - Ts}{2 + Ts} \quad (24)$$

المخطط الصندوقي للنظام بعد إضافة التأخير موضح في الشكل(6).

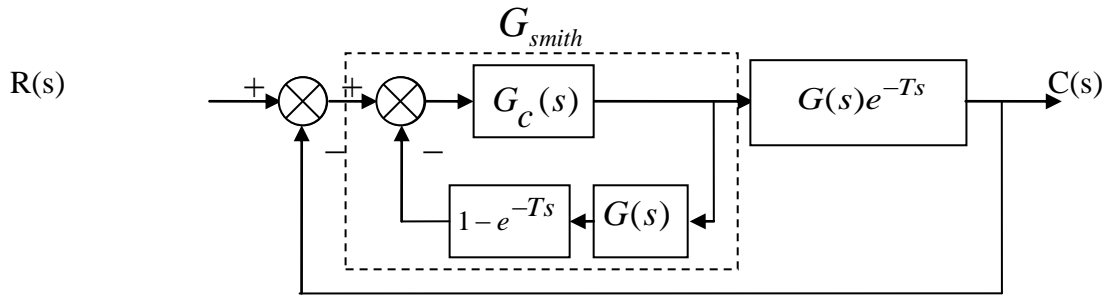


الشكل (6) المخطط الصندوقي لنظام تحكم مع تأخير زمني

حيث $G_c(s)$ هي تابع نقل المتحكم [4].

3-7 طريقة سميث لحل مشكلة التأخير الزمني:

يعتمد سميث في طريقته على إيجاد متحكم G_{smith} جديد مكون من المتحكم الأصلي $G_c(s)$ وتابع النقل $G(s)$ وعلاقة التأخير e^{-Ts} في حلقة تغذية عكسية كما يبين الشكل (7).



الشكل (7) المخطط الصندوقي لنظام تحكم مع تأخير زمني بعد تعويضه بطريقة سميث

حيث يمكننا فهم آلية عمل طريقة سميث بعد إيجاد علاقة تابع النقل الكلي للدائرة G_{total} كما يلي:

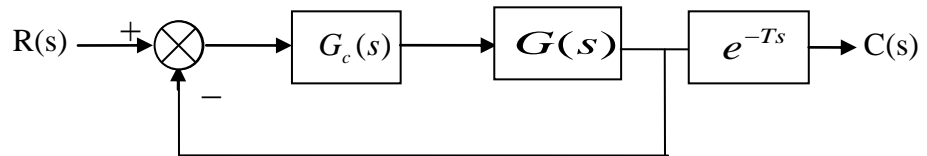
$$G_{smith} = \frac{G_c(s)}{1 + (1 - e^{-Ts})G_c(s)G(s)} \quad (25)$$

ومنه نحسب تابع النقل الكلي كما يلي:

$$G_{total} = \frac{G_c(s)G(s)e^{-Ts}}{1 + (1 - e^{-Ts})G_c(s)G(s) + G_c(s)G(s)e^{-Ts}} \quad (26)$$

$$G_{total} = \frac{Gc(s)G(s)}{1 + G_c(s)G(s)} e^{-Ts} \quad (27)$$

أي أن التأخير الزمني أصبح خارج حلقة التغذية العكسية كما في الشكل (8)، وبالتالي ستكون الاستجابة مشابهة للاستجابة بدون تأخير زمني لكن متأخرة عنها بمقدار T [7].



الشكل (8) المخطط الصندوقي لنظام تحكم مع تأخير زمني بعد تعويضه بطريقة سميث

لرسم استجابة النظام بعد إضافة التأخير الزمني وتعويض سميث قمنا باستخراج تابع النقل الكلي للدارة ثم حساب علاقة الاستجابة وإجراء تحويل لابلاس العكسي لها، وسنكتفي بالنتائج لأنه سبق أن ذكرنا ذلك لنظم الدرجة الأولى والثانية، حيث اعتبرنا عند دراسة التأخير الزمني أن المتحكم الذي لدينا هو PI وأن النظام من الدرجة الأولى.

3-8 خوارزمية برنامج المحاكاة:

بعد الوصول إلى علاقة الاستجابة بالزمن، قمنا برسم هذه المعادلة باستخدام لغة برمجة مرئية عالية المستوى حيث استخدمنا الفيجول بيزك (Visual Basic)، ومكنا البرنامج من رسم الاستجابة بتغيير بارامترات النظام وذلك لتمثيل أي نظام معطى لدينا، ويمكن أيضا تغيير ثوابت PID للحصول على القيم الأفضل لهذه الثوابت والتي تعطي الاستجابة المرغوبة، وقمنا برسم شبكة إحدائيات في منطقة الرسم تمكننا من قياس المحددات المطلوبة (زمن الاستقرار، التجاوز الأعظمي، القيمة النهائية، قيمة الاستجابة عند زمن معين.....) يدويا أو حتى برمجيا.

لن نذكر هنا تفاصيل الخوارزمية لأن هذا سيأخذ مساحة كبيرة خصوصا إذا قمنا برسمها وفق المعايير الأساسية للخوارزميات والتي ستكون متشعبة جدا، لذلك سنقدم شرحاً موجزاً عن الخوارزمية:

1- يتم في البداية اختبار قيم صناديق الاختيار (option value) وذلك لمعرفة الحالة المطلوب دراستها (مع أو بدون PID، مع تأخير زمني أو بدونه، استخدام طريقة سميث أو لا،.....) وإسقاط تلك الخيارات على شكل المخطط الصندوقي ليصبح معبرا عن الحالة المدروسة.

2- إدخال القيم المطلوبة (k_p, k_I, k_D, a, b, sp) حيث (sp) هي المطال أو القيمة النهائية المطلوب من النظام أن يصل إليها- من صناديق النص في واجهة البرنامج، وذلك بحسب الحالة المدروسة (ففي حالة الرسم بدون PID مثلا لا داعي لإدخال بارامتراته ويجب إخفاء الكائنات المتعلقة بها من واجهة البرنامج).

3- بعد معرفة الحالة المدروسة ومعرفة معادلاتها التي تم استخراجها سابقا، نقوم بحساب قيم ثوابت البسط والمقام لتابع النقل النهائي (مثلا a_1, a_2, a_3, c_1, c_2 للمعادلة 10) وذلك من الثوابت المدخلة في الخطوة 2.

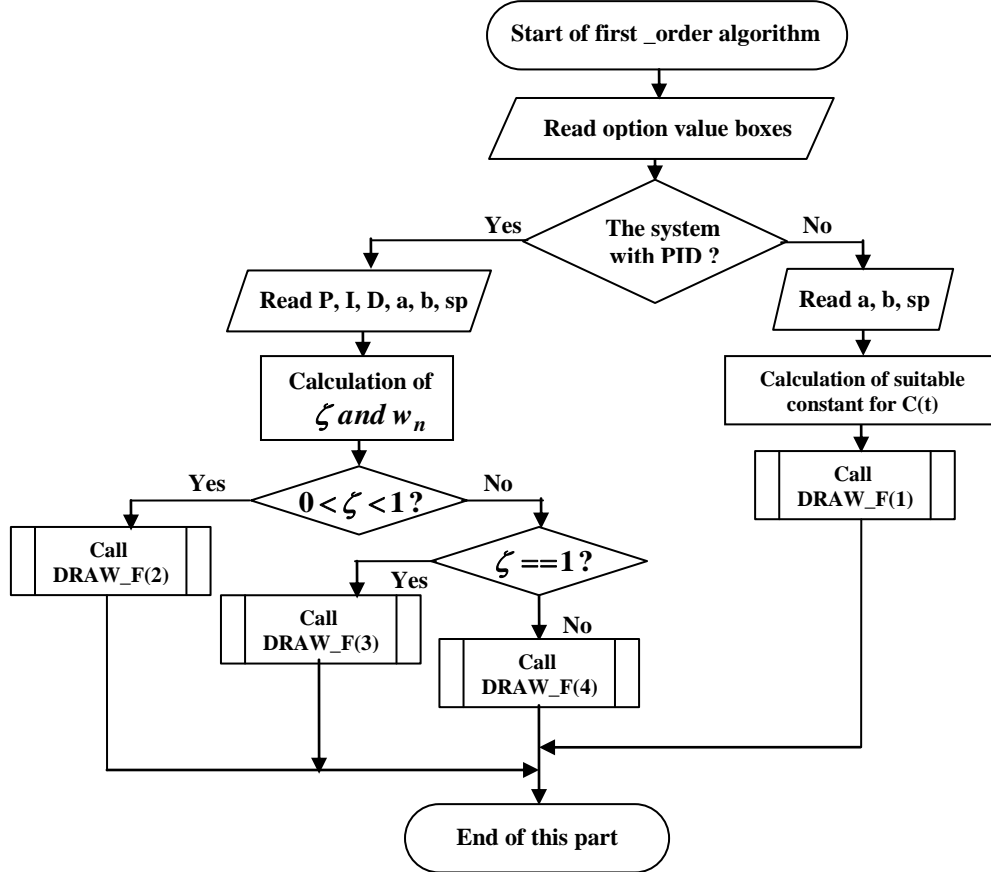
4- نقوم الآن باختبار درجة المقام فإذا كان من الدرجة الثالثة نحسب الجذر الحقيقي (تم شرح ذلك سابقا) ثم نقوم بحساب الثوابت اللازمة لتفريق المعادلة من الدرجة الثالثة إلى جداء معادلتين من الدرجة الأولى والثانية وذلك من ثوابت المعادلة من الدرجة الثالثة المحسوبة سابقا، ثم بالاعتماد على تفريق الكسور نقوم بحساب ثوابت تلك الكسور من الثوابت السابقة.

5- نقوم بعد ذلك بحساب ثابت التخامد ζ والتردد w_n للحدود التي مقامها من الدرجة الثانية، وذلك لتحديد المعادلة النهائية اللازمة لحساب الاستجابة من مجموعة العلاقات (15) ومن جداول تحويل لابلاس حيث وضحنا ذلك سابقا ونقوم بمناقشة ذلك من خلال الحلقات الشرطية.

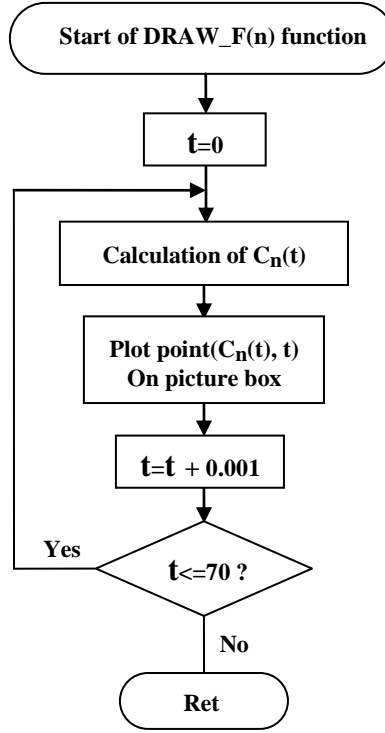
6- بعد ما سبق نجهز صندوق الرسم الموجود على واجهة البرنامج وذلك ليتم رسم الاستجابة الزمنية عليه (اختيار مقياس رسم مناسب لاحتواء الاستجابة ضمن المساحة المحددة، رسم شبكة إحدائيات ليتم قياس النقاط المطلوبة بدقة، تدريج المحورين الشاقولي والأفقي، اختيار لون جديد للرسم ليتم رسم كل استجابة بلون مختلف وذلك لتسهيل عملية المقارنة عند رسم أكثر من استجابة فوق بعضها البعض).

7- أخيرا وباستخدام الحلقات التكرارية نقوم بحساب قيمة تلك الاستجابة عند قيم مناسبة وكافية لتحول الزمن ($t = 0 \rightarrow 70$) وبخطوة مناسبة للدقة المطلوبة للرسم ($\Delta t = 0.001$).

سنعرض هنا جزءاً صغيراً ومبسوطاً من الخوارزمية، وهو الجزء المسؤول عن رسم استجابة نظم الدرجة الأولى (مع وبدون PID) إذ أنه أصغر جزء في الخوارزمية، ولا نستطيع ذكر نص البرنامج وذلك بحكم محدودية عدد الصفحات المقبولة للمقالة.



الشكل (9) خوارزمية الجزء البرمجي لنظام من الدرجة الأولى



الشكل (10) خوارزمية التابع DRAW_F(n)

ملاحظة 1:

يوجد مقاطع برمجية أخرى متعلقة بشكل واجهة البرنامج وتعريف المتحولات اللازمة في البرنامج، ومسح الاستجابة، وإظهار أو إخفاء الإحداثيات الشاقولية والأفقية، وهي لا تندرج تحت دراسة الاستجابة لذلك لم نذكرها في الخوارزمية.

ترمز $C_n(t)$ في الشكل (10) إلى معادلة الاستجابة النهائية للنظام والمناسبة للحالة المدروسة، حيث إن لدينا أربع حالات $(n=1, 2, 3, 4)$.

إن تطبيق خوارزمية الشكل (10) تعطي البرنامج المبين بالشكلين (13، 14).

ملاحظة 2:

في نظم الدرجة الثانية وبعد إضافة PID حصلنا على بعض الحالات التي كان فيها ثابت التخامد سالباً $\zeta < 0$ (الحد الأخير من المعادلة (22)) ولا يوجد مثل هذه الحالة في جداول التحويل، لذلك قمنا بحل هذه الحالة عن طريق حل المعادلة من الدرجة الثانية وإيجاد جذورها $(root_1, root_2)$ وتحويلها إلى شكل يمكن إيجاد تحويله العكسي كما يلي:

$$\frac{x_3s + x_4}{s^2 + c_1s + c_2} = \frac{x_3s + x_4}{(s + (-root_1))(s + (-root_2))}$$

$$= \frac{x_3s}{(s + (-root_1))(s + (-root_2))} + \frac{x_4}{(s + (-root_1))(s + (-root_2))}$$

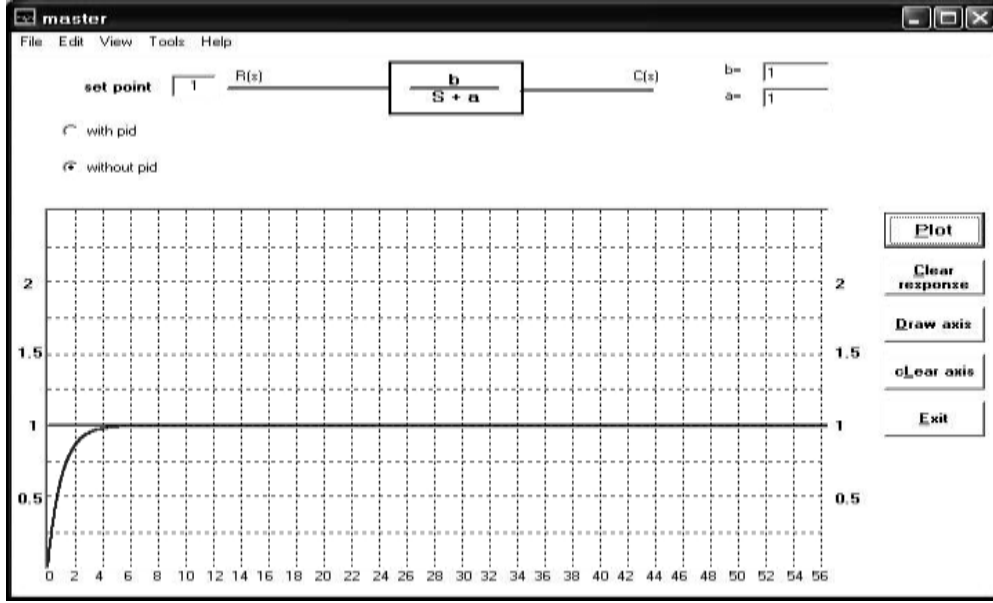
يمكن إيجاد تحويل لابلاس العكسي للتابعين الأخيرين من الجداول وهما من الأشكال التالية:

$$\frac{1}{(s+a)(s+b)}, \frac{s}{(s+a)(s+b)}$$

4- النتائج والمناقشة:

4-1 نظم الدرجة الأولى:

استجابة نظام من الدرجة الأولى بدون PID



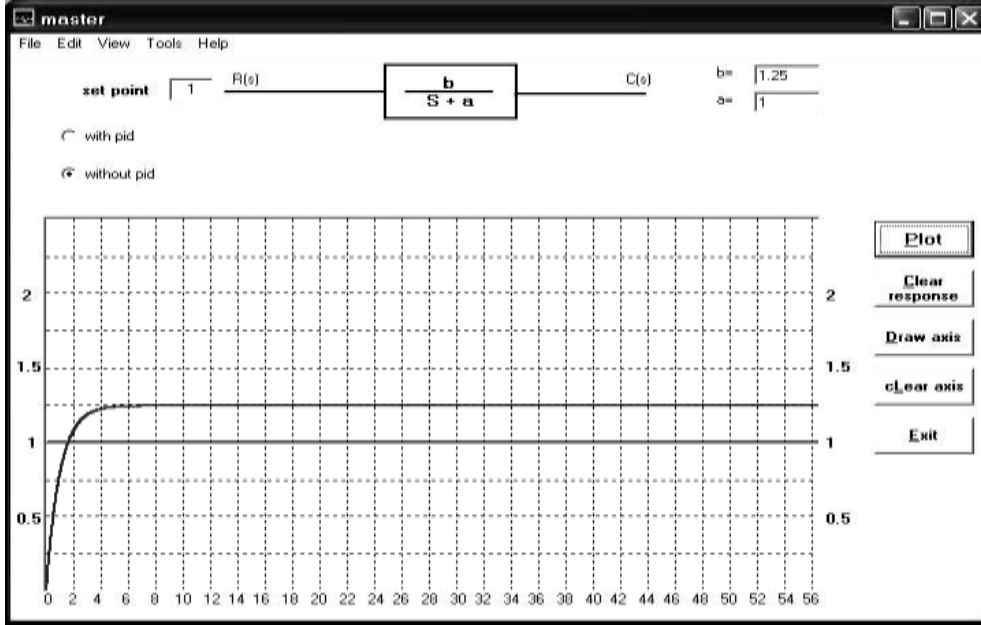
الشكل (11) استجابة نظام من الدرجة الأولى $b=1, a=1$

نلاحظ من الشكل (11) أن الاستجابة أسية ذات تخامد زائد ولا تتعرض لأي اهتزاز، ويعزى ذلك رياضياً إلى عدم وجود حد من الدرجة الثانية في مقام تابع النقل، حيث إن وجود حد من الدرجة الثانية في المقام قد يؤدي إلى اهتزاز في الاستجابة وذلك بحسب قيمة ثابت التخامد.

يعرف زمن الاستقرار بأنه الزمن اللازم لوصول الاستجابة إلى 2% من القيمة النهائية، وهو هنا 5 تقريباً.

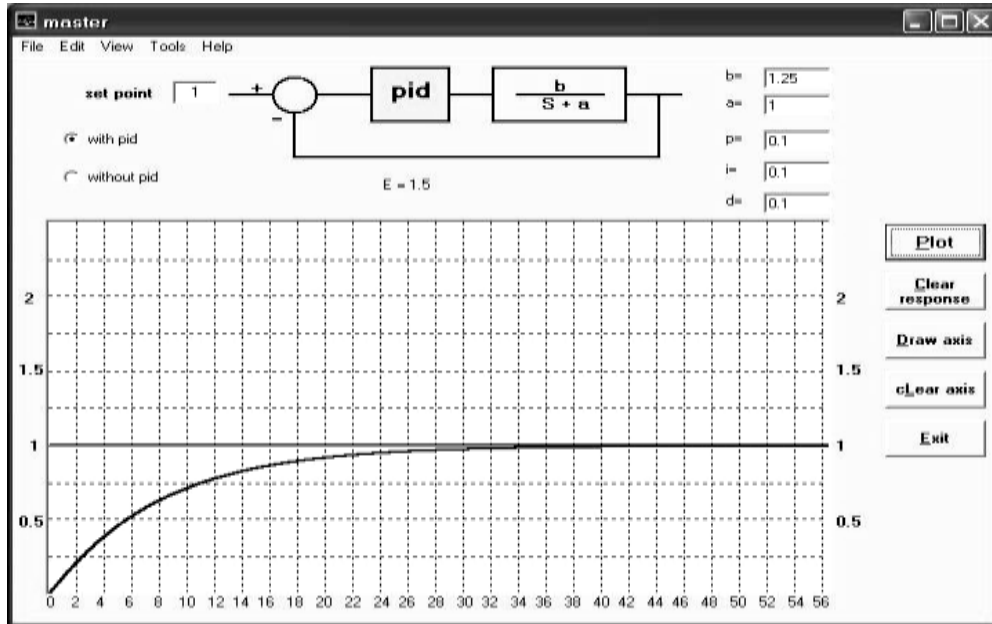
في نظام الشكل (11) كان لدينا ($a=1, b=1$) أي أن تابع نقله $G(s) = \frac{1}{s+1}$ والنظام مستقر بثابت زمني مقبول نسبياً يصل خلاله إلى القيمة النهائية ونستطيع أن نقول هنا إنه لا ضرورة لاستخدام المنظم PID، ولكن ماذا لو كانت قيم ثوابت النظام غير ذلك. في هذه الحالة قد تكون استجابة النظام غير مرغوبة.

ليكن لدينا النظام الذي تابع نقله $G(s) = \frac{1.25}{s+1}$ أي ($a=1.25, b=1$)، استجابته مبيّنة بالشكل (12).



الشكل (12) استجابة نظام من الدرجة الأولى $b=1.25, a=1$

نلاحظ في الاستجابة المبينة بالشكل (12) أنَّ هناك خطأ حالة دائمة قيمته (0.25) وهذا غير مرغوب، وهذا الخطأ يزداد في نظام الشكل (12) بازدياد النسبة $(\frac{b}{a})$ ، وهنا أصبح من الضروري تحسين تلك الاستجابة بطريقة ما، وهنا يأتي دور المنظم PID، ولنرى شكل الاستجابة بعد إضافة هذا المنظم.

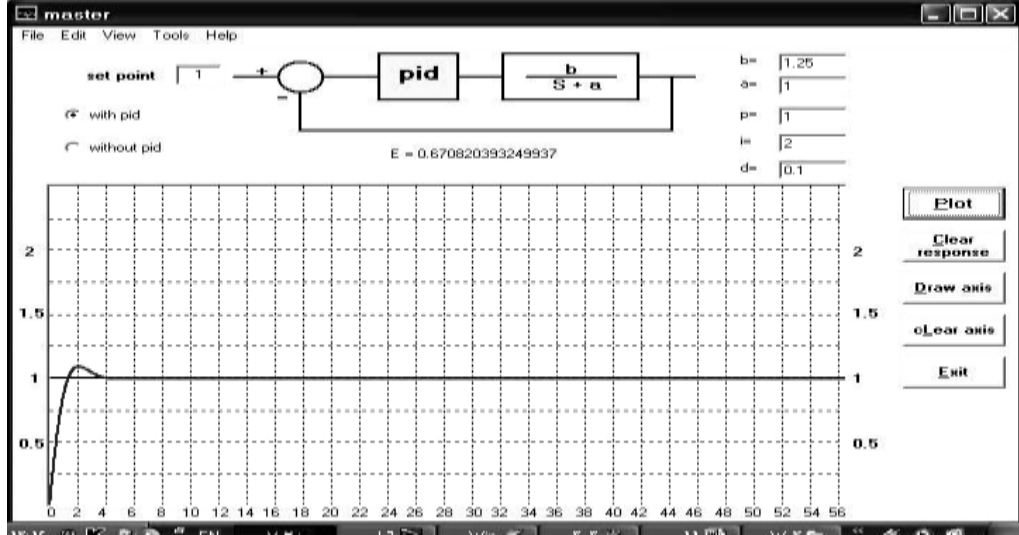


الشكل (13) استجابة نظام من الدرجة الأولى مع PID
 $b=1, a=1, p=0.1, i=0.1, d=0.1$

الرمز E يرمز إلى ثابت التخامد

نلاحظ في الشكل (13) أن خطأ الحالة الدائمة قد زال، ولكن الاستجابة بطيئة أي زمن الاستقرار كبير نسبياً، ويفضل أن يكون زمن الاستقرار أقل من ذلك، أي أن مجرد إضافة PID ليس كافياً بل يجب أن يتم اختيار بارامترات

بشكل مناسب حيث إنه من الممكن أن تكون نتائج إضافته سلبية إذا لم تكن قيم البارامترات مناسبة لذلك يتم اختيار بارامتراته وفق قواعد معروفة مثل قاعدة القيم الحدية وغيرها، ولنرى الآن كيف تصبح الاستجابة بعد تغيير قيم بارامتراته حتى نصل إلى استجابة مرغوبة.



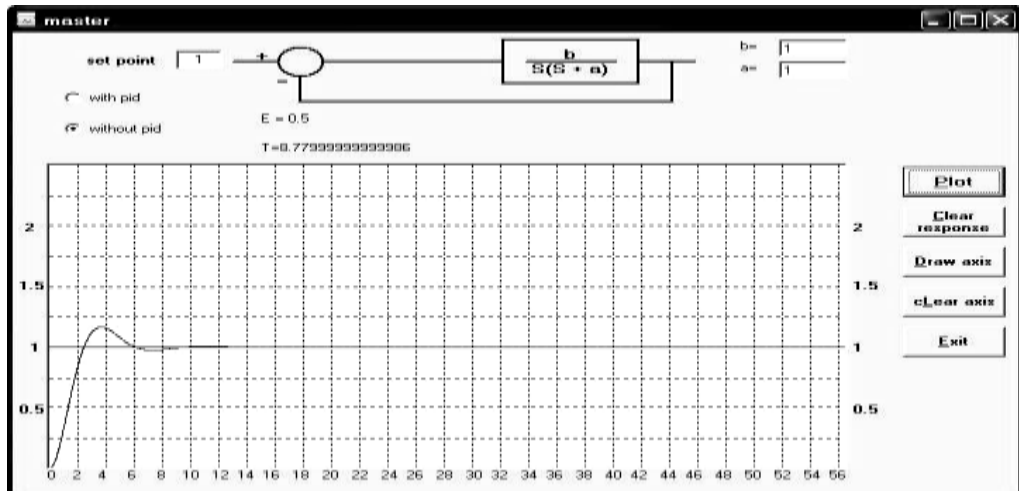
الشكل (14) استجابة نظام من الدرجة الأولى مع PID
b=1, a=1, p=1, i=2, d=0.1

نلاحظ في الشكل (14) أن الاستجابة أصبحت أفضل بكثير مما سبق من حيث زمن الاستقرار والقيمة النهائية والتجاوز الأعظمي.

2-4 نظم الدرجة الثانية:

ينتج عن إضافة PID لنظم الدرجة الثانية نفس النتائج مع نظم الدرجة الأولى من حيث تأثيره على الاستجابة الدائمة والعبارة وتأثر ذلك بقيم ثوابته، وتأثر استجابة النظام بتغيير بارامتراته، وسنكتفي هنا ببعض الحالات.

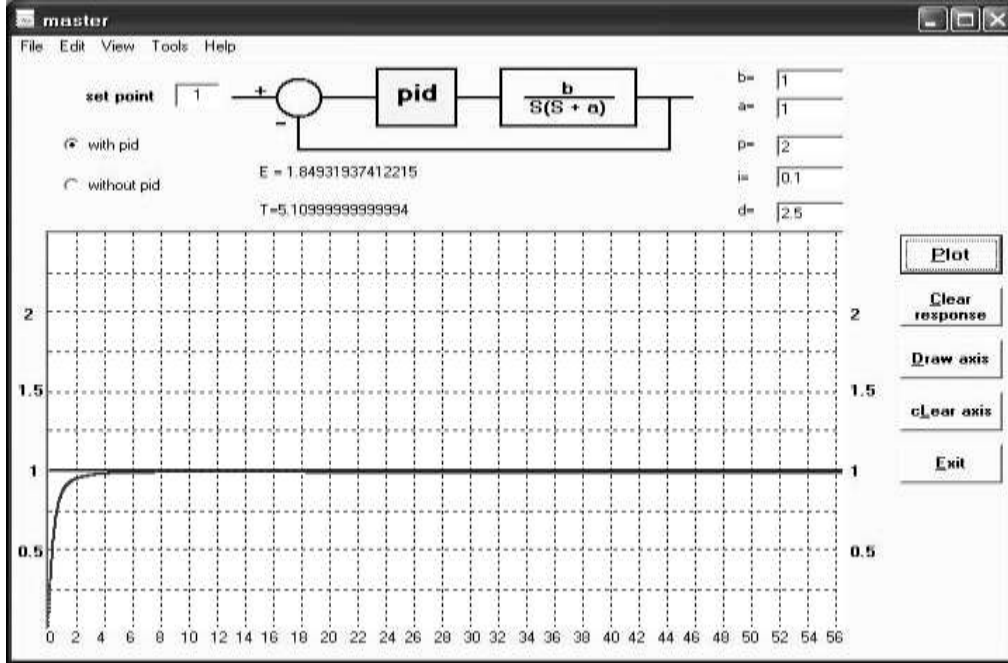
يبين الشكل (15) استجابة نظام من الدرجة الثانية بدون PID.



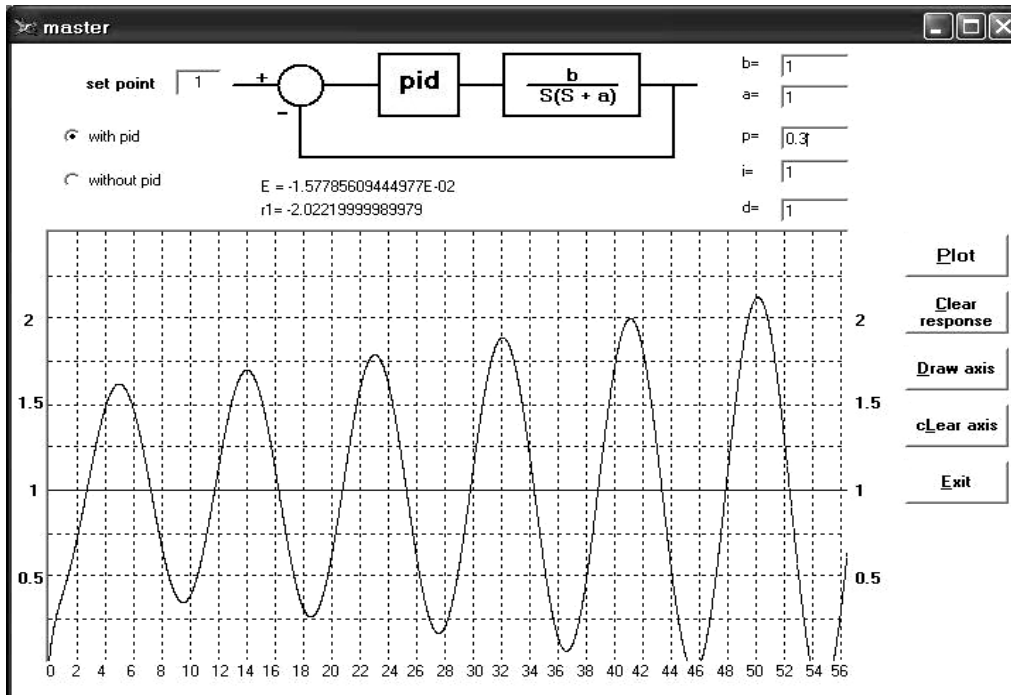
الشكل (15) استجابة نظام من الدرجة الثانية
b=1, a=1

الرمز T يرمز إلى ثابت التخماد τ

استجابة النظام بعد إضافة PID قد تصبح أفضل أو أقل جودة مما سبق، أو حتى قد تصبح غير مستقرة وذلك بحسب قيم ثوابت PID، والأشكال (16) و(17) توضح ذلك.



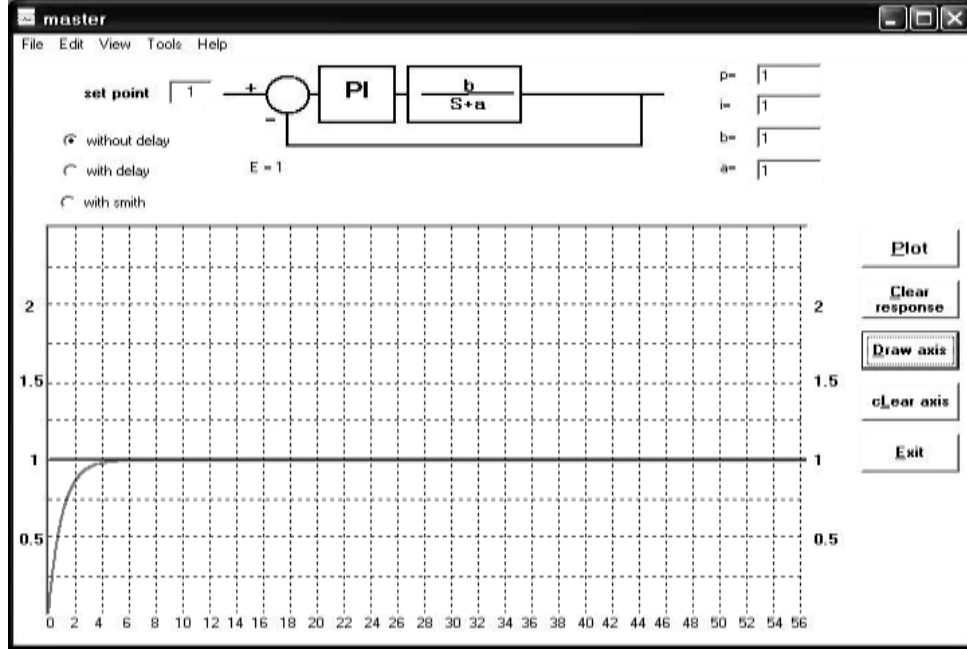
الشكل (16) استجابة نظام من الدرجة الثانية مع PID
 $b=1, a=1, p=2, i=0.1, d=2.5$



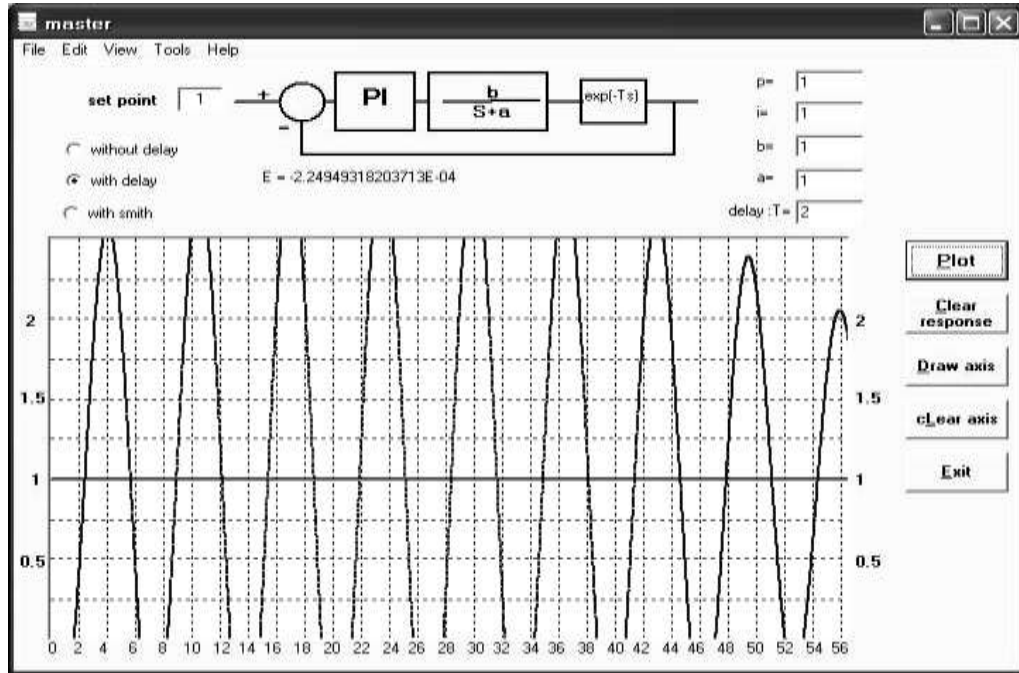
الشكل (17) استجابة نظام من الدرجة الثانية مع PID مع قيم غير مناسبة لبارامتراته
 $b=1, a=1, p=0.3, i=1, d=1$

3-4 النمذجة ذات التأخير الزمني:

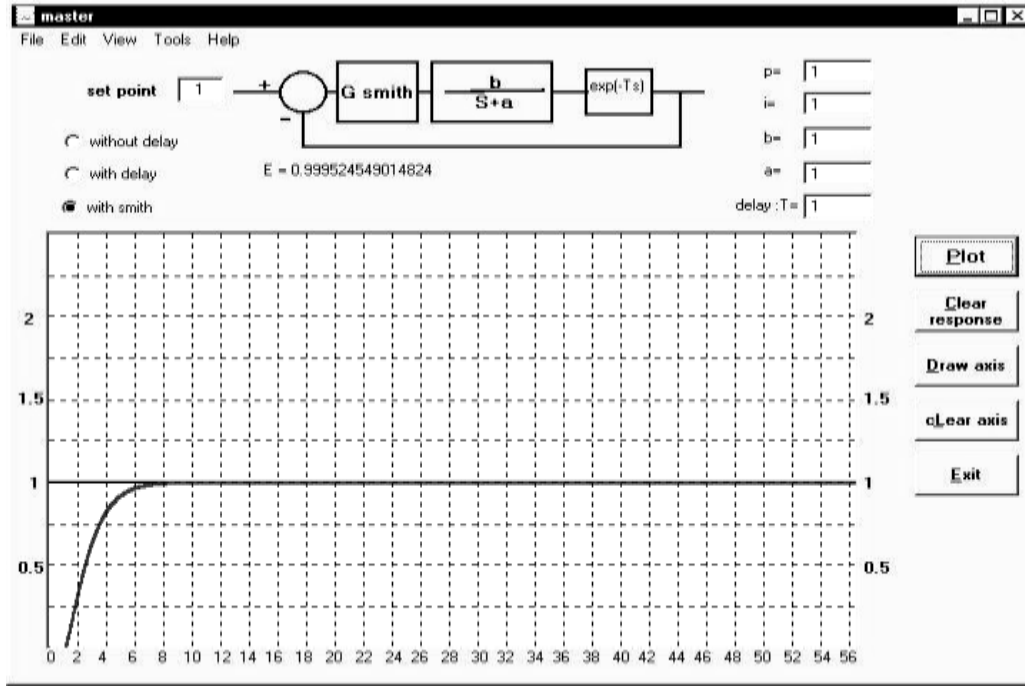
كانت النتائج السابقة بدون تأخير زمني، وسنوضح في الأشكال (18، 19، 20) كيف أن التأخير الزمني يمكن أن يسبب عدم استقرار في النظام وكيف يمكن حله بطريقة سميث.



الشكل (18) استجابة نظام من الدرجة الأولى مع PI وبدون تأخير زمني
b=1, a=1, p=1, i=1



الشكل (19) استجابة نظام من الدرجة الأولى مع PI ومع تأخير زمني
b=1, a=1, p=1, i=1, T=2



الشكل (20) استجابة نظام من الدرجة الأولى مع تأخير زمني بعد تعويضه باستخدام طريقة سميث
 $b=1, a=1, p=1, i=1, T=1$

نلاحظ من الشكل (20) أن الاستجابة مع تأخير زمني وبعد استخدام طريقة سميث مشابهة للاستجابة بدون تأخير زمني من حيث الشكل ولكن متأخرة عنها بمقدار T .

5- الاستنتاجات والتوصيات:

تمكن نتيجة هذا البحث من إنشاء برنامج متعدد النوافذ يحاكي نظم التحكم المختلفة من الدرجة الأولى والثانية وذلك بعد إيجاد تابع النقل لها، حيث يسمح هذا البرنامج من إيجاد الاستجابة الزمنية لهذه النظم عن طريق الحاسب، ويمكن من خلال هذا البرنامج أيضا دراسة تأثير بارمترات النظام على شكل الاستجابة، حيث إن هذه البارمترات ناتجة عن قيم حقيقية (مقاومات، مكثفات، ملفات...) أو (ثابت مرونة نابض، معامل احتكاك، عطالة...) أو غير ذلك بحسب طبيعة النظام.

يمكن من خلال هذا البرنامج دراسة تأثير إضافة PID إلى تلك النظم وتغيير استجابتها، وتبيان تأثير قيم البارمترات k_p, k_D, k_I على شكل الاستجابة، وإمكانية رسم الاستجابة بتغيير قيم هذه البارمترات، ثم التأكد أيضا من خلال هذا البرنامج من أهمية الاختيار المناسب لقيم بارمترات PID، حيث إن مجرد إضافته غير كافية بل من غير الضروري أحيانا استخدامه وهذا أفضل من الناحية الاقتصادية، كما يظهر البرنامج تأثير التأخير الزمني على استجابة نظم التحكم وحل مشكلة التأخير الزمني باستخدام طريقة سميث.

المراجع:

- 1- WILLIS, M.J. - *PID controller*, Dept. of chemical and Process Engineering University of Newcastle. 15-6-2007 <<http://lorien.ncl.ac.uk/ming/pid/PID.pdf>>.
- 2- CECH, M.; SCHLEGEL, M. - *PID controller design on Internet*, Department of Cybernetics, University of West Bohemia in Pilsen. 20-7-2007 <http://www.rexcontrols.com/downloads/clanky/PIDRegions_eng.pdf>
- 3- SAMET, L.; MASMOUDI, N.; KHARRAT, M.W. - *a digital pid controller for real time and multi loop control*, Electronuc and Computer Science Laboratory.10-6-2007 <http://www.csgroup.tunet.tn/publications_equipe_c&s/samet_1/CII'98_samet.pdf>.
- 4- KARL, J. - *PID Controllers: Theory, Design, and Tuning*, International Society for Measurement and Con, U.S.A, 1995, 343.
- 5- إسماعيل، وائل. - *التحكم الآلي، منشورات جامعة تشرين، 1997، 373.*
- 6- MICHAEL, A. - *PID Control*, Springer, India, 2005, 560.
- 7- GOPAL, M. - *control systems principles and design*, hill publishing company limited, sixth reprint 2001, 995.
- 8- داوود، محسن؛ محمود، علي. - *التحكم الكهريائي(2)*، منشورات جامعة تشرين، 2006، 621.