

## البناء الرقمي لخوارزميات أنظمة القيادة الكهربائية باستخدام المتحكمات الصغيرة

الدكتور أحمد عمار نعساني\*  
محمد ناصيف\*\*

(تاريخ الإيداع 22 / 10 / 2008. قَبْلَ للنشر في 2/12/2008)

### □ الملخص □

تزايد في السنوات الأخيرة استخدام الدارات الرقمية على حساب الدارات التشابيهية، حتى أصبحنا نرى أن معظم التطبيقات الصناعية تعتمد على شرائح رقمية مثل المتحكمات الصغيرة Microcontrollers ومعالجات الإشارة الرقمية Digital Signal Processor (DSP) في بناء خوارزمياتها. تعتمد هذه الشرائح على تقنية الفاصلة العائمة أو تقنية الفاصلة الثابتة. سنتناول في بحثنا عملية بناء خوارزمية تنظيم سرعة محرك تيار مستمر ذي تهييج مستقل بالاعتماد على منظم تناسبي - تكاملي Integral Proportional (PI) ضمن شريحة متحكم صغري Atmega16 ذي دقة 8 خانات. ولبيان كيفية بناء الخوارزمية المعتمدة ضمن شريحة المتحكم الصغري قدمنا شرحاً تفصيلياً عن خطوات التصميم الرقمي لخوارزمية محرك التيار المستمر مع منظم تناسبي - تكاملي لتنظيم سرعة المحرك. دعم هذا العمل بنتائج تمثيلية تم الحصول عليها باستخدام بيئة Matlab-Simulink وبننتائج عملية أجريت على اللوحة STK500 (بطاقة اختبار وبرمجة شرائح متحكمات صغيرة من عائلة AVR). وقد أظهرت النتائج العملية إمكانية بناء خوارزمية معقدة نسبياً ضمن شريحة متحكم صغري ذي دقة 8 خانات يعتمد تقنية الفاصلة الثابتة.

**الكلمات المفتاحية:** المتحكمات الصغيرة، المعالجات ذات الفاصلة الثابتة، خوارزميات أنظمة القيادة، المنظمات التناسبية-التكاملية، محرك التيار المستمر.

\*أستاذ مساعد - قسم هندسة القيادة الكهربائية- كلية الهندسة الكهربائية والإلكترونية- جامعة حلب-سورية.  
\*\* مهندس - قسم الهندسة الإلكترونية- كلية الهندسة الكهربائية والإلكترونية- جامعة حلب-سورية.

## Implantation Numérique d'Algorithmes des Commandes de Systèmes Electriques en Utilisant les Microcontrôleurs

Dr. Ahmad Ammar Naassani\*  
Muhammad Nassif\*\*

(Déposé le 22 / 10 / 2008. Accepté 2/12/2008)

### □ Résumé □

Ce travail s'intéresse à l'implantation numérique d'un algorithme de régulation de vitesse d'une machine à courant continu utilisant le contrôleur proportionnel – intégrale (PI) et ce dans une cible microcontrôleur à virgule fixe (Atmega16).

Afin de montrer la méthodologie utilisée pour l'implantation numérique en format signé de l'algorithme adopté, une analyse détaillée dévoile les étapes suivies lors de la conception numérique de l'algorithme de commande de vitesse de la machine à courant continu. Les résultats de simulation, utilisant l'environnement Matlab-Simulink et les résultats expérimentaux réalisés sur la carte STK500, montrent la possibilité d'implanter des algorithmes complexes dans une cible microcontrôleur à virgule fixe dont les registres sont à 8bits.

**Mots-clés:** Microcontrôleurs, Processeurs à virgule fixe, Algorithmes de commande des systèmes électriques, Machine à courant continu.

---

\* Maître de Conférences, Département de la commande Electrique, Faculté de Génie Electrique et Electronique, Université d'Alep.

\*\*Ingénieur, Département d'Electronique, Faculté de Génie Electrique et Electronique, Université d'Alep.

**مقدمة:**

مع تطور المعالجات الرقمية وزيادة تردد نبضات الساعة لها وسعة الذاكرة التي تتعامل معها، انتقل مصممو الأنظمة الصناعية من استخدام الدارات التشابھية إلى استخدام الدارات الرقمية [1]، [2]، حيث تعتبر المتحكمات الصغيرة من بين الشرائح الرقمية المستخدمة بكثرة في التطبيقات الصناعية بمختلف أنواعها. بالنسبة للمتحكمات ذات الفاصلة الثابتة، تكون عملية البرمجة بالنسبة لخوارزميات الأتمتة الصناعية التي تعتمد على طريقة الوصل والفصل (ON/OFF) ضمن المتحكمات أمراً سهلاً وبسيطاً، ولكن تبقى برمجة الخوارزميات التي تتطلب عمليات ضرب وطرح وجمع، وتحتوي على كمالات ومفاضلات وغيرها مسألة غير سهلة، وتحتاج إلى خبرة ومرونة. من أجل هذا الغرض تم بناء خوارزمية قيادة محرك تيار مستمر باستخدام لغة الأسبلي ضمن شريحة متحكم صغيري من عائلة AVR وهو المتحكم Atmega16 مركبة على اللوحة STK500 وربط اللوحة مع الحاسب عبر المنفذ التسلسلي RS232 لإظهار النتائج من جهة وإعطاء أوامر تنفيذية وقيم معطيات إلى المتحكم من جهة أخرى، وذلك باستخدام بيئة Matlab. في البداية قمنا بتمثيل المحرك المستمر مع نظام القيادة رقمياً معتمدين على مبدأ النظام الواحد في تمثيل النظام الرقمي. بعد ذلك بيئاً كيفية بناء الخوارزمية الرقمية ضمن المتحكم وأجرينا التجارب العملية المختلفة التي أظهرت إمكانية بناء الخوارزميات المعقدة ضمن متحكمات بدقة 8 خانات.

**أهمية البحث وأهدافه:**

يركز هذا البحث على البناء الرقمي للخوارزميات ضمن المعالجات ذات الفاصلة الثابتة بشكل عام والمتحكمات الصغيرة بشكل خاص. حيث يبين هذا البحث كيفية التمثيل الرقمي للخوارزمية مع الأخذ بعين الاعتبار النظام الواحد، والذي يضمن عدم طفحان متحولات الخوارزمية شريطة الاختيار الصحيح للقيم الأساسية (القاعدية) لهذه المتحولات، علماً أنه تم الاعتماد على قيم متحولات مؤشرة للتمكن من تمثيل النظام رقمياً بالنسبة للقيم الموجبة والسالبة.

**طريقة البحث ومواده:**

سنقوم في البداية بتمثيل محرك التيار المستمر رياضياً وصندوقياً. بعد ذلك سنعمل إلى تمثيله رقمياً معتمدين أولاً على تمثيل مرشح تمرير منخفض آخذين بعين الاعتبار مبدأ النظام الواحد وموضحين ضرورته. سنبين بعد ذلك كيفية إضافة منظم تناسبي - تكاملي لتحسين استجابة المرشح. بعدئذ سنعرض بناء خوارزمية تنظيم محرك تيار مستمر بالاعتماد على المنظم التناسبي - التكاملي. في النهاية سنقدم النتائج العملية التي أجريت على لوحة الاختبار STK500 مؤكدةً إمكانية بناء خوارزميات معقدة ضمن شرائح متحكمات صغيرة ذات 8 خانات.

**التمثيل الرياضي والصندوقي لمحرك التيار المستمر ذي التهيج المستقل**

يمكن تمثيل محرك التيار المستمر ذي التهيج المستقل بالاعتماد على معادلاته الرياضية [3]، [4]، حيث تعطى معادلة العزم الكهرومغناطيسي بالعلاقة التالية:

$$T_{em} = k\Phi I_a \quad (1)$$

يدعى  $k$  بثابت الارتباط الكهرومغناطيسي ويتعلق ببنية الآلة، ويعبر  $\Phi$  عن التدفق المغناطيسي الناتج عن ملف الثابت ويعبر  $I_a$  عن التيار المار في دوار المحرك (المتحرض).

أما معادلة جهد المتحرض، فتعطى بالعلاقة:

$$V_a = R_a I_a + L_a \frac{dI_a}{dt} + E \quad (2)$$

حيث:

$L_a, R_a$  مقاومة وذاتية ملف المتحرض (الدوار) على التوالي؛

$E$  القوة المحركة الكهربائية العكسية وتتناسب طردياً مع السرعة الزاوية الميكانيكية للدوار  $\Omega$  كما في العلاقة

التالية:

$$E = k\Phi\Omega \quad (3)$$

أما المعادلة الميكانيكية الأساسية فتعطى بالعلاقة:

$$J \frac{d\Omega}{dt} = T_{em} - T_L \quad (4)$$

أما عزم الحمل الكلي  $T_L$  فيقسم إلى قسمين كما يلي:

$$T_L = T_d + f\Omega \quad (5)$$

حيث:

$J$  عزم عطالة المحرك؛

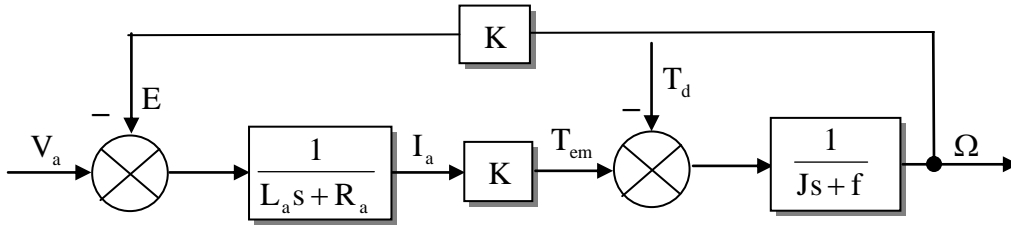
$T_L$  عزم الحمولة الكامل؛

$T_d$  عزم الحمولة المقاوم؛

$f$  ثابت الاحتكاك اللزج.

من المعادلات السابقة وبعد تبديل كل  $\frac{d}{dt}$  بـ  $s$ ، حيث  $s$  معامل لابلاس، وباعتبار  $K = k\Phi$  يمكن أن

نحصل على المخطط الصندوقي الممثل لمحرك DC ذي تهييج مستقل، كما هو موضح في الشكل (1).



الشكل (1): المخطط الصندوقي الممثل لمحرك تيار مستمر ذي تهييج مستقل

يبين المخطط الصندوقي المبين في الشكل (1) أن محرك التيار المستمر يتكون من تابعي انتقال من المرتبة الأولى (مرشحي تمرير منخفض) بالإضافة إلى تغذية عكسية ممثلة بالاضطراب الداخلي. يمثل تابع الانتقال الأول الجزء الكهربائي، ويمثل تابع الانتقال الثاني الجزء الميكانيكي. إن تمثيل هذا المخطط باستخدام بيئة Matlab-Simulink يمكن إنجازه بسهولة والحصول على أشكال السرعة والتيار المتحرض والعزم الكهرومغناطيسي بدلالة الزمن. إلا أننا سنقف حائرين في حال أردنا برمجة نفس المخطط ضمن شريحة معالجة رقمية ذات الفاصلة الثابتة. للتغلب على هذه المشكلة لابد من تحويل تابعي الانتقال السابقين من مجال لابلاس إلى مجال الزمن المنقطع.

## البناء الرقمي لمرشح ذي تمرير منخفض بالصيغة المؤشرة

كما رأينا سابقاً، إن المخطط الصندوقي لمحرك التيار المستمر، يتألف من مرشحين بقيم ثوابت مختلفة بينهما عملية ضرب ( $T_{em} = KI_a$ ). لهذا السبب سننطلق في تمثيلنا لخوارزمية المحرك من خوارزمية المرشح. من المعلوم أن معادلة المرشح المدروس تُعطى بالعلاقة التالية:

$$y = \frac{G}{\tau s + 1} x \quad (6)$$

حيث يعبر  $\tau$  عن الثابت الزمني للمرشح و  $G$  عن ربح المرشح. ولكي نتمكن من تمثيل هذه المعادلة ضمن شريحة المتحكم، يجب علينا أولاً تحويلها إلى الشكل الرقمي. لإجراء التحويل الرقمي لأي معادلة نقوم باستخدام طريقة أولير الأمامية أو العكسية. تُعطى علاقة أولير الأمامية بالشكل:

$$\frac{dx}{dt} = \frac{x[k+1] - x[k]}{T_s} \quad (7)$$

أما علاقة أولير العكسية فتُعطى بالشكل:

$$\frac{dx}{dt} = \frac{x[k] - x[k-1]}{T_s} \quad (8)$$

حيث تعبر  $x[k]$  عن حالة النظام في اللحظة الزمنية  $k$ :

- $k$  اللحظة الحالية.
- $k+1$  اللحظة التالية.
- $k-1$  اللحظة السابقة.

أما  $T_s$  فتعبر عن دور التقطيع (زمن تنفيذ الخوارزمية).

بتطبيق علاقة أولير العكسية (8) على المرشح المعرّف بالمعادلة (6) نحصل على المعادلة الرقمية للمرشح المدروس والمعطاة كما يلي:

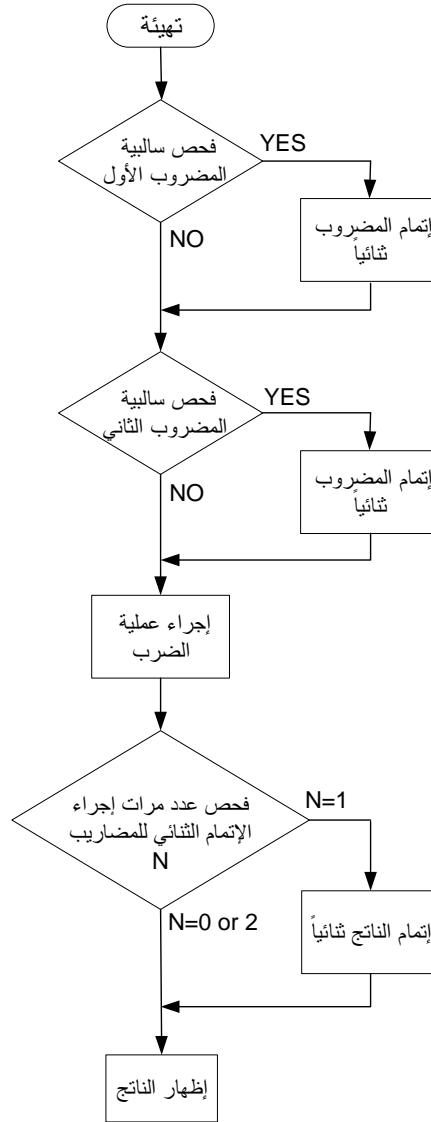
$$y[k] = \frac{GT_s}{T_s + \tau} x[k] + \frac{\tau}{T_s + \tau} y[k-1] \quad (9)$$

في الواقع، لا يمكننا تمثيل المعادلة بهذا الشكل من برمجتها بشكل صحيح ضمن شرائح معالجة الإشارة الرقمية ذات الفاصلة الثابتة، لأن القيم المستخدمة ستؤدي إلى حصول تجاوز عند إجراء العمليات الحسابية عليها، علماً أننا سنقوم بتمثيل القيم المؤشرة بدقة 16bits (الخانة MSB للإشارة). لتفادي هذه المشكلة، سنلجأ إلى تمثيل المعادلة بالنظام الواحد، حيث يضمن التمثيل بهذه الطريقة دخول جميع الأرقام إلى النظام ضمن المجال من  $[-1, 1]$ ، وبالتالي فإن ناتج أي عملية ضرب داخل النظام يبقى ضمن نفس المجال، ونضمن عدم تجاوز الأرقام ضمن النظام لعدد محدد من الخانات أي عدم حدوث طفحان.

تُعطى علاقة المرشح الرقمي الممثل واحدياً بالشكل:

$$\hat{y}[k] = A\hat{x}[k] + B\hat{y}[k-1] \quad (10)$$

حيث  $A = \frac{GT_s}{\tau + T_s} \times \frac{x_b}{y_b} \times 2^{15}$ ،  $B = \frac{\tau}{\tau + T_s} \times 2^{15}$ ، وتعتبر  $x_b, y_b$  عن القيم الأساسية للدخل والخرج.

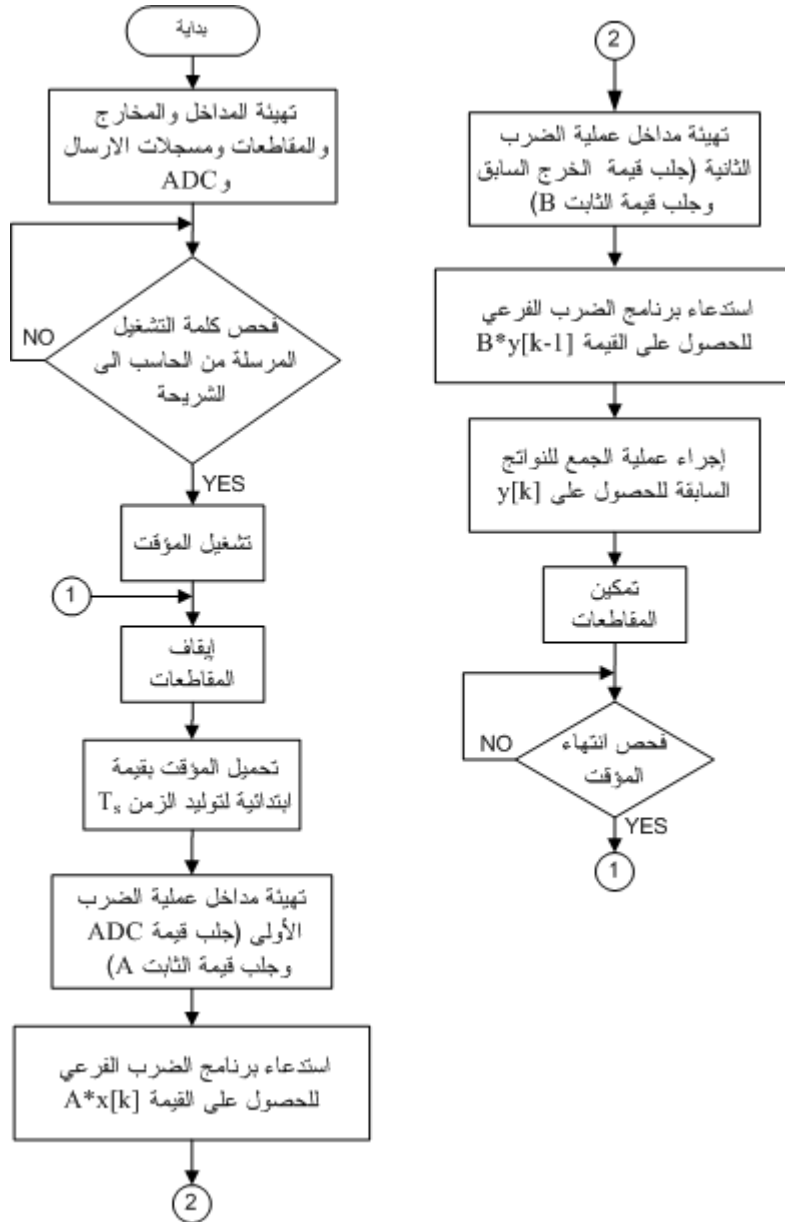


الشكل (2): خوارزمية الضرب المؤشر

من المعادلة (10) نجد أن تمثيل خوارزمية المرشح يوول إلى إجراء عمليتي ضرب وعملية جمع للحصول على القيمة النهائية للخروج  $\hat{y}[k]$ . ولكن إذا أردنا التعامل مع إشارات دخل مؤشرة، فإنه يجب مراعاة إجراء هذه العمليات بحيث تضمن لنا إخراج نتائج صحيحة على اعتبار أننا نريد تنفيذها ضمن شرائح متحكمات صغيرة ذات 8bits لا تحتوي على تعليمات تتعامل مع قيم مؤشرة. إن تمثيل الدخل والثابت للمرشح بدقة 8bits غير كافٍ، لأن استخدام ثمان خانات لا يحقق في الواقع الدقة المطلوبة، لذلك علينا تمثيل الثوابت والمتحولات في خوارزمية المرشح بطول 16bits (مع العلم أن الخانة 16 تمثل خانة الإشارة في العمليات المؤشرة). إن عملية الضرب المؤشر 16bits\*16bits غير موجودة في شرائح المتحكمات الصغيرة المستخدمة، لذلك قمنا بوضع الخوارزمية الموضحة في الشكل (2) والتي تضمن لنا إعطاء نتائج صحيحة مهما كانت إشارات المضارب.

وبما أن المبدل التشابهي - الرقمي في شريحة المتحكم الصغري مصمم لتحويل القيم ضمن المجال (0→5V) وهي قيم موجبة لذا فإنه يجب طرح (2.5V) برمجياً من قيمة الدخل ليصبح المجال (-2.5→2.5V) وبذلك نضمن دخول القيم الموجبة والسالبة إلى المرشح.

بعد إضافة قيمة (-2.5V) برمجياً إلى قيمة الدخل الذي تم تبديله باستخدام المبدل التشابهي - الرقمي، نبدأ بإجراء عمليات الضرب المؤشر والجمع على هذه القيمة مع الثوابت A, B المعرفة سابقاً، ونقوم بإخراج الناتج على المنفذ التسلسلي الموصول مع الحاسب وقراءة قيمة الخرج  $\hat{y}[k]$  عن طريق بيئة Matlab.



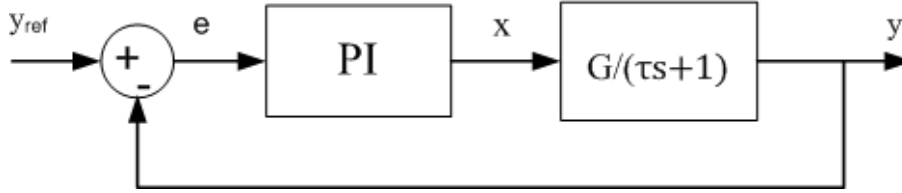
الشكل (3): خوارزمية المرشح المؤشر

يوضح الشكل (3) خوارزمية المرشح الرقمي المؤشر الذي تم بناؤه ضمن الشريحة. نلاحظ في خوارزمية المرشح وجود مؤقت، الهدف منه هو ضبط دور التقطيع المعتمد في هذه الخوارزمية وهو  $T_s = 200\mu\text{sec}$ ، لذلك تم

تشغيل المؤقت وتحميله في بداية البرنامج لتوليد هذا الزمن ثم فحص انتهائه في آخر البرنامج [5]. إن قيمة  $\hat{y}[k]$  الناتجة في نهاية الخوارزمية يتم إرسالها عبر المنفذ التسلسلي إلى الحاسب ثم يتم رسمها باستخدام برنامج مكتوب في بيئة Matlab.

### تحسين استجابة المرشح باستخدام منظم تناسبي - تكاملي PI

من المعلوم أن استجابة المرشح تعتمد على قيمة الثابت الزمني  $\tau$  (تم اعتماد قيمة  $\tau = 0.01\text{sec}$ ) فإذا أردنا زيادة سرعة الاستجابة، فإنه يمكن استخدام منظم PI كما في الشكل (4).



الشكل (4): المخطط الصندوقي لمرشح مع منظم تناسبي - تكاملي

تعطى المعادلة الرياضية للمنظم التناسبي - التكاملي كما يلي:

$$x = (K_p + \frac{K_I}{s})e \quad (11)$$

وباستخدام طريقة تعويض قطب المرشح بصفر المنظم التناسبي - التكاملي ( $\frac{K_I}{K_p} = \frac{1}{\tau}$ ) نحصل على تابع

انتقال الحلقة المغلقة للمخطط الصندوقي (4) كما هو موضح في العلاقة التالية:

$$x = \frac{K_p G / \tau}{s + K_p G / \tau} e \quad (12)$$

تظهر المعادلة (12) أن سرعة استجابة الحلقة المغلقة تتعلق بقيمة  $K_p$  فكلما كانت قيمة  $K_p$  كبيرة كلما كانت سرعة الاستجابة أعلى.

أما التمثيل الرقمي للمنظم التناسبي - الرقمي فيعطى بعد استخدام العلاقة (8) آخذين بعين الاعتبار النظام الواحد، بالعلاقة التالية:

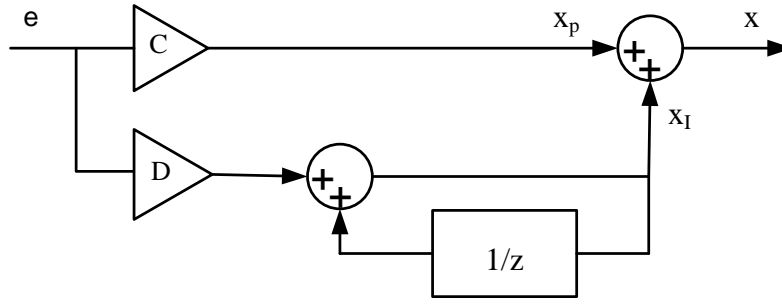
$$\hat{x}[k] = C\hat{e}[k] + D\hat{e}[k] + \hat{x}_1[k-1] \quad (13)$$

حيث  $C = \frac{K_p e_b}{x_b}$  و  $D = \frac{K_I T_s e_b}{x_b}$  أما  $\hat{x}_1[k-1]$  فتعبر عن القيمة الواحدة لخرج المكامل بمفرده في

اللحظة السابقة.

من الشكل (5) نجد أن بناء المنظم PI ما هو إلا عمليتا ضرب وعمليات جمع وعملية مراكمة (مكامل)، مع الانتباه إلى أن عمليات الضرب هي عمليات ضرب مؤشر كما تم معالجتها في خوارزمية المرشح السابقة.

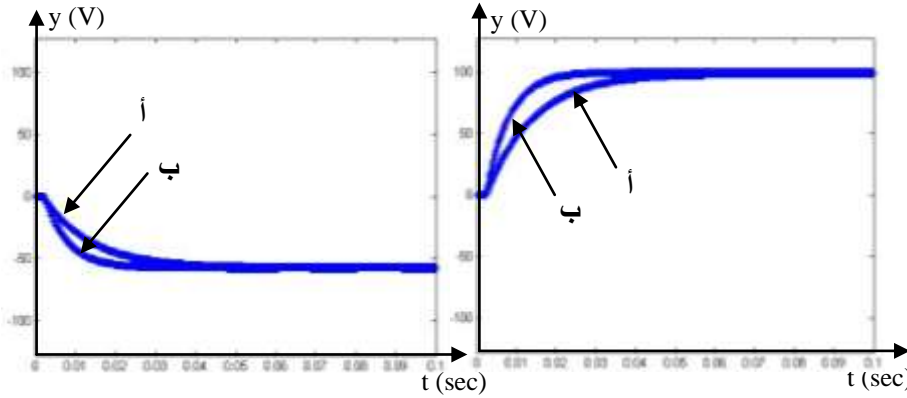




الشكل (5): المخطط الصندوقي لمنظم PI

يوضح الشكل (6) الفرق في استجابة المرشح بمفرده واستجابة المرشح مع وجود منظم تناسبي - تكاملي. علماً أنه تم اختيار القيم التالية:

$$K_p = 2, T_s = 200\mu\text{sec}, y_b = 4, e_b = 4, x_b = 1.01 * K_p e_b, G = 1$$



الشكل (6): استجابة المرشح من أجل قيم دخل موجبة وسالبة أ- بدون وجود منظم PI ب- مع وجود منظم PI

#### بناء خوارزمية محرك DC يتعامل مع مداخل موجبة وسالبة

يعتمد بناء خوارزمية محرك تيار مستمر على استخدام خوارزميتي مرشحين بثوابت مختلفة مع عملية ضرب واحدة لخرج المرشح الأول بثابت  $K$  (الشكل (1)). أما المعادلات الرقمية الممثلة لهذين المرشحين مع الأخذ بعين الاعتبار مبدأ النظام الواحدي فتعطى كما يلي:

- بالنسبة للجزء الكهربائي

$$\hat{I}_a[k] = A_1(\hat{V}_a[k] - \hat{E}[k]) + B_1\hat{I}_a[k-1] \quad (14)$$

حيث  $A_1 = \frac{T_s/R_a}{T_s + \tau} \frac{V_{a-b}}{I_{a-b}}$ ،  $B_1 = \frac{\tau}{\tau + T_s}$ ، و  $\hat{E} = \frac{E}{V_{a-b}}$ ، أي أن القيمة الأساسية للقوة المحركة

الكهربائية العكسية هي نفسها القيمة الأساسية لجهد المتحرض.

- بالنسبة للجزء الميكانيكي

$$\hat{\Omega}[k] = A_2(\hat{T}_{em}[k] - \hat{T}_d[k]) + B_2\hat{\Omega}[k-1] \quad (15)$$

حيث  $B_2 = \frac{\tau}{T_s + \tau}$ ،  $A_2 = \frac{T_s/f}{T_s + \tau} \frac{I_{a-b}}{\Omega_b}$

أما علاقة العزم (1) فتحول إلى النظام الواحدي كما يلي:

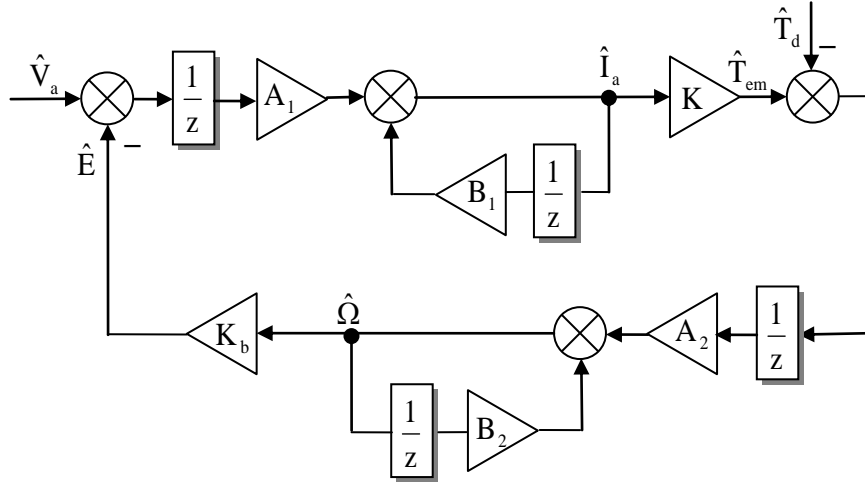
$$\hat{T}_{em}[k] = K\hat{I}_a[k] \quad (16)$$

حيث تم اعتبار القيمة الأساسية للعزم الكهرومغناطيسي هي نفسها القيمة الأساسية لتيار المتحرض. وتعطى علاقة القوة المحركة الكهريائية العكسية في النظام الواحدي على الشكل التالي:

$$\hat{E}[k] = K_b\hat{\Omega} \quad (17)$$

$$. K_b = \frac{K\Omega_b}{V_{a\_b}} \quad \text{حيث}$$

يوضح الشكل (7) المخطط الصندوقي الممثل لمحرك التيار المستمر رقمياً في النظام الواحدي.



الشكل (7): التمثيل الرقمي لمحرك التيار المستمر مع الأخذ بعين الاعتبار النظام الواحدي

وجدنا سابقاً أن خوارزمية المرشح ما هي إلا عملية مراكمة لمجموع مضاريب، لذا فإن المشكلة الأساسية التي تظهر في تمثيل المرشح بشكل عام هي إجراء عمليات الضرب بين قيم صغيرة، الأمر الذي يؤدي إلى عدم إجراء التراكم على اعتبار أننا نقوم بضرب  $16\text{bits} * 16\text{bits}$  وأخذ الـ  $16\text{bits}$  العلوية من الناتج. فعندما تكون قيم المضاريب صغيرة، فهذا يعني أن ناتج الضرب لن يؤثر على  $16\text{bits}$  العلوية المأخوذة، وهذا لن يؤدي إلى حدوث عملية تراكم، لأننا نعتمد في هذه العملية على ناتج الضرب السابق، فإذا كان ناتج الضرب دائماً صفراً، فهذا يعني أننا لن نحصل على نتائج صحيحة للخوارزمية.

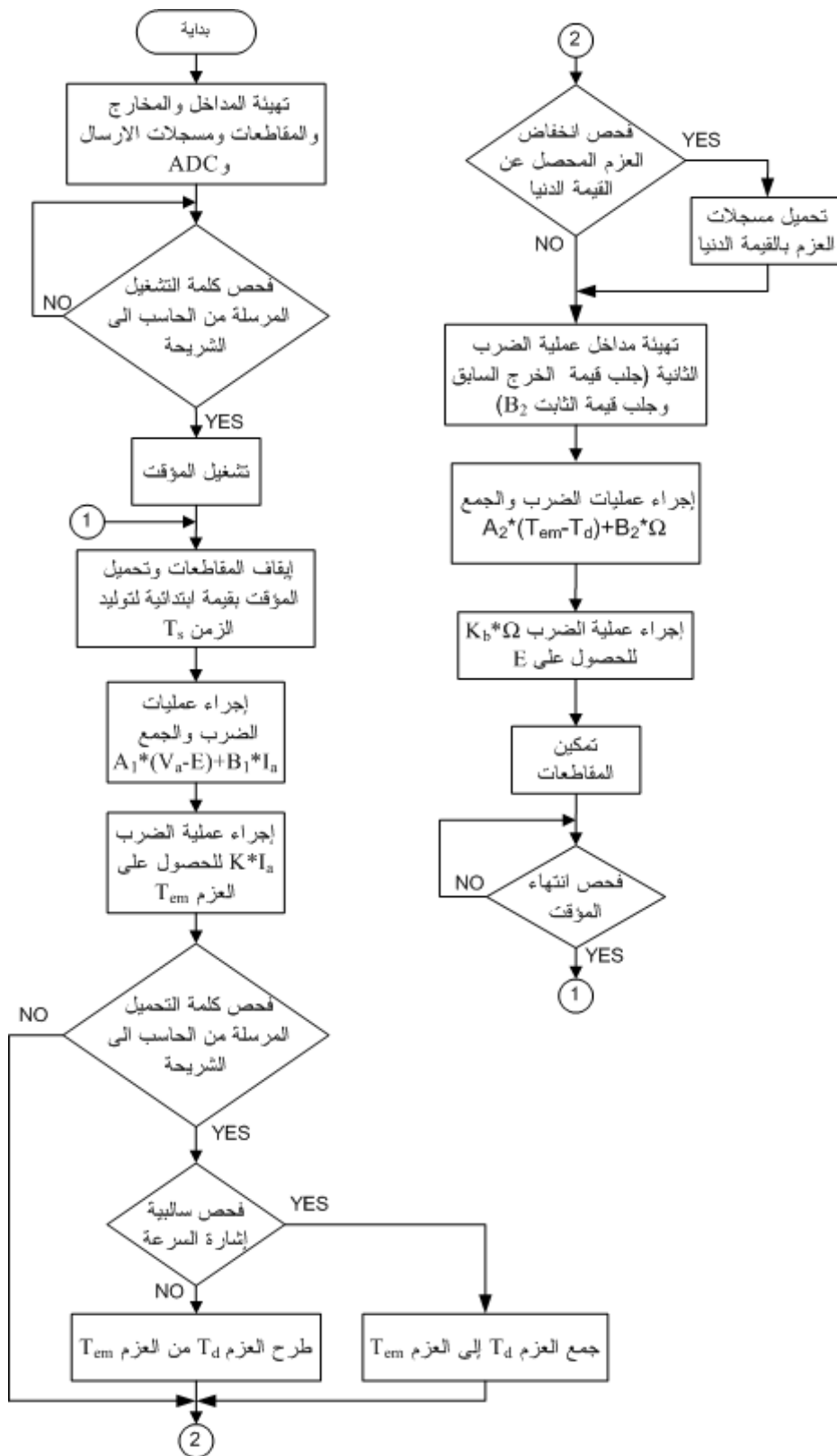
من المعلوم أننا نمثل الدخل والثوابت بطول  $15\text{bits}$  على اعتبار أن الخانة  $16$  تمثل الإشارة. إن مشكلة القيم الصغيرة لثوابت المرشح تظهر معنا في مرشح السرعة ضمن خوارزمية المحرك على اعتبار أن إحدى القيم تعتمد على  $f$  (ثابت الاحتكاك اللزج) وهو ذو قيمة صغيرة جداً. لذلك ومن المعادلات المستنتجة بالنظام الواحدي والتي تبين قيم الثوابت  $A_2, B_2$  الخاصة بمرشح السرعة نجد أن قيمة الثابت  $A_2$  صغيرة جداً، لذلك سنضطر إلى زيادة قيم الثوابت الأخرى التي تدخل في علاقة  $A_2$  لرفع قيمتها بحيث نستطيع إجراء عملية التراكم من جراء ضرب الثابت  $A_2$  بالقيمة  $\hat{T}_{em} - \hat{T}_d$ . والجدير بالذكر أنه عند إجراء عملية الإتمام الثنائي في عملية الضرب المؤشر علينا الانتباه إلى عدم إهمال أية خانة، لأنها تؤثر على القيمة المضروبة، وبالتالي تؤثر في عملية المراكمة.

بدايةً، قمنا بإدخال قيمة الجهد التشابهي عن طريق أحد أقطاب المبدل التشابهي - الرقمي الموجود ضمن شريحة المتحكم الصغري، حيث تتراوح قيمة الجهد المدخل ( $0 \rightarrow 5V$ ) فيتم طرح ( $2.5V$ ) برمجياً لتصبح قيمة الجهد

المدخل بعد الطرح ضمن المجال (2.5V→-2.5V) وهذه القيم تعبر عن الجهد المقدم إلى المحرك ضمن المجال (-). (220V→220V) والذي يعطينا بالنهاية السرعة ضمن المجال (230rad/sec→-230rad/sec). يتم إدخال قيمة الجهد هذه إلى مرشح التيار (عملية ضرب وعملية جمع) لإعطاء قيمة التيار  $\hat{I}_a$  والممثلة بـ 15bits، ثم يتم ضرب قيمة التيار هذه بقيمة الثابت K لإعطاء العزم  $\hat{T}_{em}$ . إن المشكلة التي تحدثنا عنها تظهر عند إدخال قيمة  $\hat{T}_{em} \pm \hat{T}_d$  إلى مرشح السرعة. إن هذه القيمة في الحالة المستقرة صغيرة جداً وكذلك قيمة الثابت  $A_2$ ، لذلك قمنا برفع قيمة هذا الثابت بتغيير قيم بعض الثوابت (وضعنا قيمة  $T_s = 300\mu\text{sec}$ ). كما وقمنا بتحديد قيمة العزم الأصغرية بحيث لا ينخفض العزم عن هذه القيمة، وذلك لضمان استمرار عملية المكاملة إلى الحد المطلوب. مع الانتباه إلى أنه عند تطبيق عزم حمولة  $\hat{T}_d$  فإنه يجب تطبيقه بما يتناسب مع اتجاه دوران المحرك. فإذا كانت إشارة السرعة موجبة نقوم عندها بطرح العزم  $\hat{T}_d$  من العزم  $\hat{T}_{em}$  وإدخال الناتج  $(\hat{T}_{em} - \hat{T}_d)$  إلى مرشح السرعة. أما إذا كانت إشارة السرعة سالبة، فإنه يجب جمع العزم  $\hat{T}_d$  إلى العزم  $\hat{T}_{em}$  وإدخال الناتج  $(\hat{T}_{em} + \hat{T}_d)$  إلى مرشح السرعة بحيث لا يعمل عزم الحمولة على تدوير المحرك بل تحميله في كلا الحالتين. ثم نقوم بضرب قيمة السرعة  $\hat{\Omega}$  الناتجة على خرج مرشح السرعة والممثلة بـ 15bits بقيمة الثابت  $K_b$  للحصول على قيمة القوة المحركة الكهربائية العكسية  $\hat{E}$  ثم طرحها من قيمة جهد الدخل  $\hat{V}_a$  وإدخال الناتج  $(\hat{V}_a - \hat{E})$  من جديد إلى مرشح التيار. يبين الشكل (8) المخطط النهجي لخوارزمية محرك DC تتعامل مع جهود دخل مؤشرة.

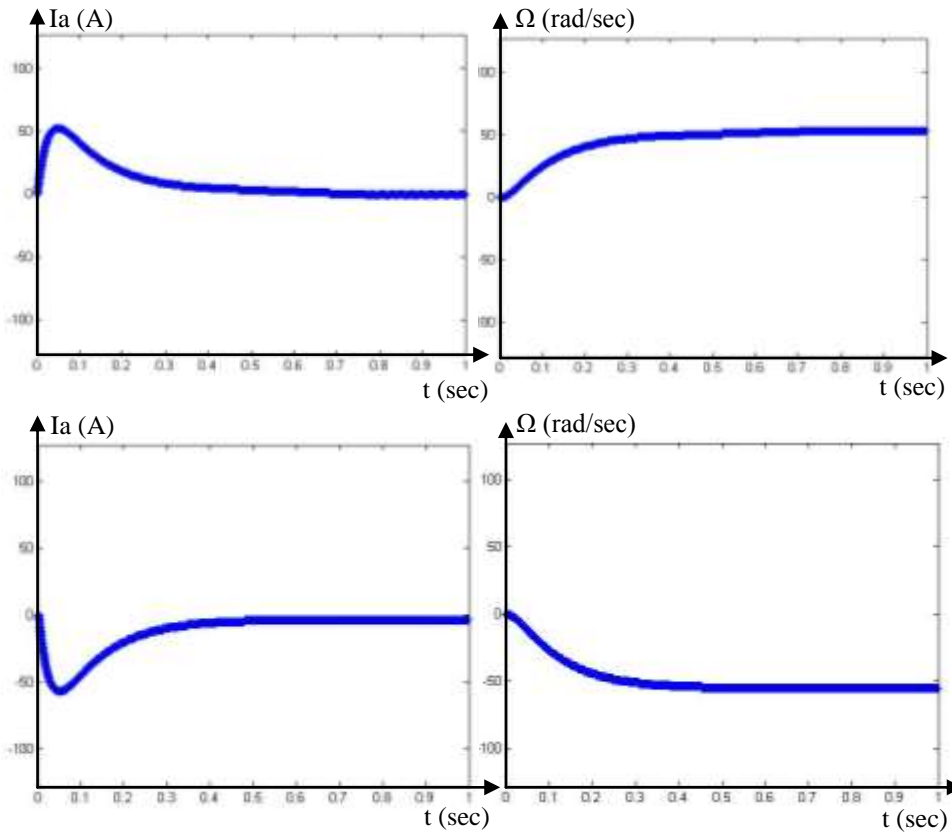
من المخطط النهجي لخوارزمية المحرك (الشكل (8)) نلاحظ النقاط التالية:

- لا يبدأ تنفيذ الخوارزمية إلا بعد إرسال كلمة التشغيل من الحاسب إلى شريحة المتحكم الصغرى، وذلك لالتقاط الحالات العابرة وحالات الإقلاع.
- تم إيقاف المقاطعات عند بداية تنفيذ الخوارزمية وتمكينها عند نهاية التنفيذ، وذلك لضمان عدم تغيير القيم المرسله أثناء تنفيذ الخوارزمية.
- لا يتم تحميل المحرك بقيمة الحمل  $T_d$  إلا عند إرسال كلمة التحميل المحددة في برنامج الخوارزمية من الحاسب إلى الشريحة.
- تم استخدام المؤقت  $T_0$  لتوليد الزمن  $T_s=300\mu\text{s}$ ، وهذا الزمن يمثل دور التقطيع.



الشكل (8): المخطط النهجي لخوارزمية محرك DC يتعامل مع قيم دخل مؤشرة

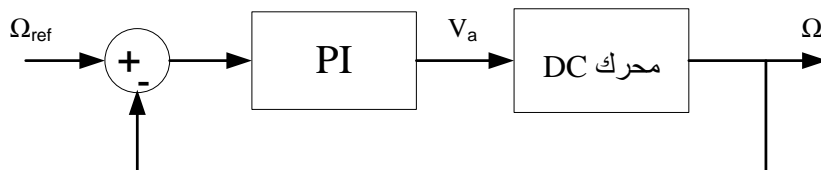
يوضح الشكل (9) إشارة السرعة والتيار في خوارزمية المحرك من أجل قيم دخل موجبة وسالبة.



الشكل (9): إشارة السرعة والتيار في خوارزمية المحرك من أجل قيم دخل موجبة وسالبة

يبين الشكل (9) دقة النتائج، في الحالة العابرة والساتاتيكية، التي تم الحصول عليها نتيجة بناء خوارزمية المحرك المستمر المؤشر ضمن شريحة المتحكم الصغري ولا يوجد هناك أي طفحان في قيم المتحولات.

### 3-5 بناء خوارزمية محرك DC مع منظم PI بإشارات دخل موجبة وسالبة



الشكل (10): المخطط الصندوقي لمحرك DC مع تنظيم السرعة

كما رأينا، سببت إضافة منظم PI إلى المرشح زيادةً في سرعة الاستجابة، ولكن في حالة المحرك فإن إضافة منظم PI إليه سيقوم بزيادة سرعة الاستجابة بالإضافة إلى تثبيت القيمة المراد تنظيمها على القيمة المرجعية المطلوبة. فإذا أردنا تنظيم سرعة المحرك بدون تنظيم التيار، فإننا نقوم بإضافة المنظم التناسبي - التكاملي كما في الشكل (10). ينتضح من هذا الشكل أن خرج المنظم PI هو عبارة عن الجهد  $V_a$  الواجب تطبيقه على المحرك.

الجدير بالذكر أنه تم حساب ثوابت المنظم التناسبي - التكاملي بالاعتماد على طريقة تعويض قطب المحرك مع صفر المنظم كما تم في فقرة المرشح مع المنظم. يظهر الاختلاف هنا من حيث إن تابع انتقال الكلي للمحرك

حسب المخطط الصندوقي الموضح في الشكل (1) هو من المرتبة الثانية. تم اختيار حذف القطب القريب من مبدأ الإحداثيات مع صفر المنظم ومن ثم حساب تابع انتقال الحلقة المغلقة للمخطط الصندوقي (10). طبعاً اعتبرنا معامل تخادم مساوٍ إلى  $\zeta = 0.707$  عند حساب ثوابت المنظم التناسبي - التكاملية وذلك للحصول على استجابة أمثلية للسرعة.

من الملاحظ أنه لبناء هذه الخوارزمية، فإنه يجب إدخال قيمة السرعة المرجعية  $\Omega_{ref}$ ، وأن هذه القيمة سيتم إدخالها إلى شريحة المتحكم كجهد عن طريق المبدل التشابهي - الرقمي بخلاف الحالة السابقة، حيث كانت القيمة المدخلة تعبر عن الجهد  $V_a$  المطبق على المحرك، فالقيمة المدخلة في حالتنا هذه ضمن المجال (0→5V) تعبر عن السرعة المرجعية المطلوبة ضمن المجال (-230→230rad/sec). ولكن عند تطبيق السرعة الأعظمية (الموجبة أو السالبة) أو قيم قريبة منها لوحظ حدوث تجاوز في قيمة التيار عند الإقلاع عن قيمته الأساسية المصمم عليها. وبنتيجة إجراء المحاكاة على برنامج Matlab وُجد أن تيار الإقلاع قد وصل إلى قيمة قدرها 30A تقريباً، وهذه القيمة تتجاوز القيمة الأساسية التي تم التصميم عليها. لذلك وللحصول على استجابة صحيحة للمحرك دون حصول تجاوز في قيمة التيار  $I_a$  فإنه يمكن استخدام إحدى الطريقتين التاليتين:

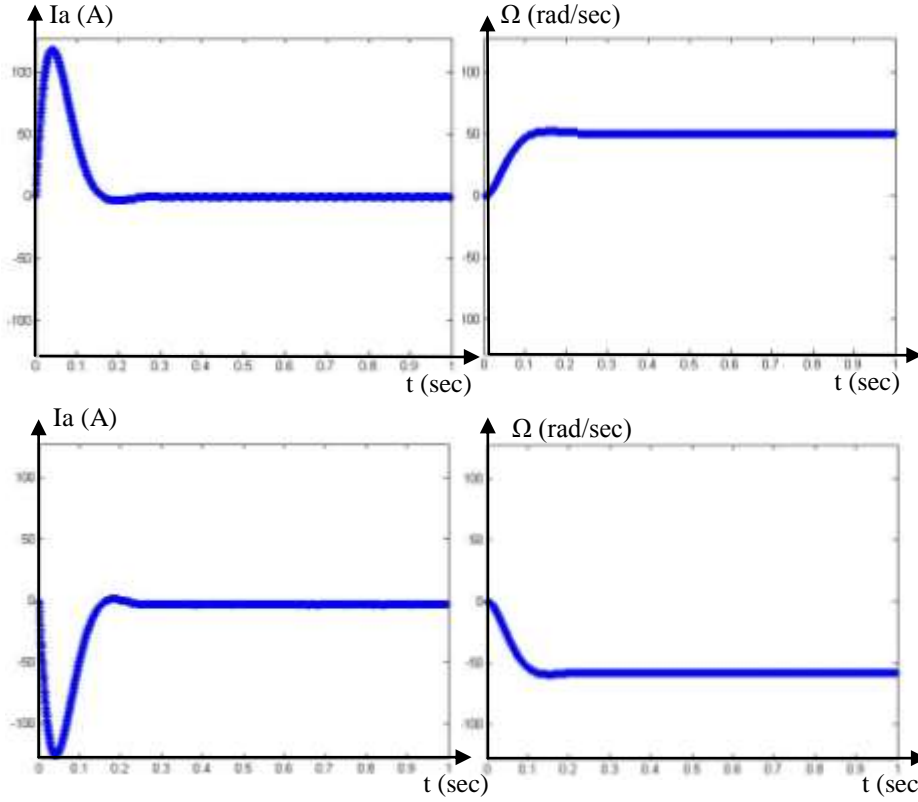
- تطبيق سرعة مرجعية لا تسبب تجاوزاً في قيمة التيار، وقد وُجد أنها ضمن المجال (-100→100rad/sec). وهذا المجال يكافئ بالجهد المجال (1.25→3.75V) وبالطبع يتم طرح (2.5V) برمجياً للحصول على السرعات الموجبة والسالبة.

- تطبيق السرعة المرجعية ضمن المجال (-230→230rad/sec) ولكن بشكل تدريجي أي تطبيق أي قيمة جهد ضمن المجال (0→5V) ولكن بشكل متدرج وذلك للتخلص من القيم الكبيرة لتيار الإقلاع. ولا يفضل حل المشكلة بزيادة القيمة الأساسية للتيار، لأن ذلك سيسبب خسارة في الدقة على اعتبار أن حالة التجاوز تحدث فقط عند الإقلاع، أما القيمة المستقرة، فهي قيمة صغيرة جداً مقارنة مع القيمة الأساسية التي تم اختيارها أثناء التصميم.

عند تطبيق الجهد التشابهي ضمن المجال المحدد (الذي يعبر عن السرعة) على شريحة المتحكم يتم طرح قيمة السرعة الحقيقية من السرعة المرجعية وإدخال إشارة الفرق (التي تسعى إلى الصفر) إلى المنظم الموضح سابقاً والذي يعطينا في خرج الجهد  $V_a$ . نقوم بإدخال هذا الجهد إلى المحرك ونقوم بإجراء المعالجة كما في خوارزمية المحرك المؤشر وبنفس الطريقة والاعتبارات المتبعة تماماً.

## النتائج والمناقشة:

يوضح الشكل (11) استجابة التيار والسرعة في كلا اتجاهي الدوران بوجود منظم PI.



الشكل (11): إشارة السرعة والتيار في خوارزمية المحرك مع PI من أجل قيم دخل موجبة وسالبة

من الأشكال (9) و(11) والتي تظهر استجابة متحولات المحرك بدون وجود منظم PI وفي حال وجوده، يمكن ملاحظة النقاط التالية:

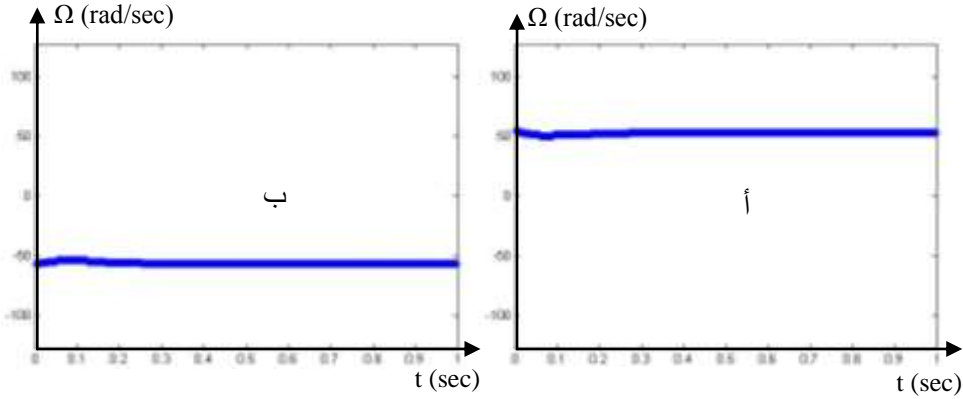
- في خوارزمية المحرك مع PI تتضح زيادة سرعة استجابة النظام بشكل كبير مقارنةً مع استجابة خوارزمية المحرك.

- إن تيار الإقلاع في خوارزمية المحرك مع PI ازداد بشكل ملحوظ مقارنةً مع تيار المحرك من أجل نفس قيمة الدخل وهذا هو السبب في عدم تطبيقنا للسرعة الكلية عند إضافة منظم PI لأنه سيحدث تجاوز لقيمة التيار الفعلية عن القيمة الأساسية، كما تحدثنا سابقاً.

- في خوارزمية المحرك مع PI نلاحظ دقة شكل الاستجابة بالنسبة للتيار والسرعة، حيث يحدث في الاستجابة تجاوز لإشارة السرعة ولمرة واحدة، وهذا هو شكل الاستجابة المعروف، والذي يظهر بوجود المنظم التناسبي - التكاملية من أجل معامل تخامد  $\zeta = 0.707$ .

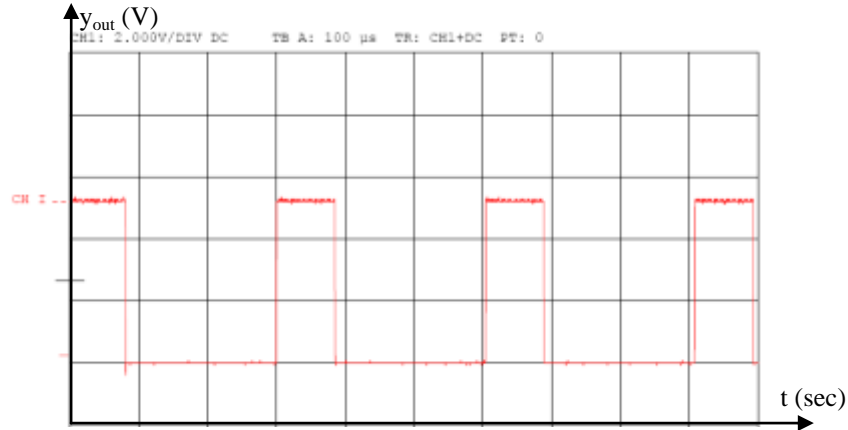
- من المعلوم أنه عند تحميل المحرك، فإن المنظم PI سيسعى إلى إعادة قيمة السرعة إلى ما كانت عليه قبل التحميل (تنبيت السرعة)، مع ضرورة الانتباه إلى كيفية التحميل عند تغيير جهة الدوران.

يوضح الشكل (12) تغيرات إشارة السرعة عند تحميل المحرك بالحمولة الاسمية في كلا اتجاهي الدوران للمحرك.



الشكل (12): تغيرات إشارة السرعة عند تحميل المحرك أ- عند الدوران الأمامي ب- عند الدوران العكسي

من هذا الشكل يتضح لنا دقة النتائج والأداء العالي للمنظم التناسبي - التكاملي، حيث إن سرعة المحرك تعود إلى قيمتها المرجعية بعد تطبيق الحمولة الاسمية للمحرك. أما الشكل (13) فيبين الزمن الذي تستغرقه خوارزمية تنظيم سرعة محرك التيار المستمر باستخدام المنظم التناسبي - التكاملي وهو بحدود  $90\mu\text{s}$ .



الشكل (13): زمن تنفيذ خوارزمية تنظيم سرعة محرك DC باستخدام المنظم التناسبي- التكاملي.

### الاستنتاجات والتوصيات:

- تم في هذا البحث بناء خوارزمية تنظيم سرعة محرك تيار مستمر بالاعتماد على المنظم التناسبي - التكاملي ضمن شريحة المتحكم الصغري Atmega16 ذي الدقة 8 خانات. كان الهدف من بناء هذه الخوارزمية بيان ما يلي:
- كيفية تحويل الخوارزمية من شكلها التشابهي إلى الشكل الرقمي.
- مفهوم النظام الواحد للضرورة للتغلب على مشكلة طفحان قيم متحولات النظام.
- طريقة بناء الخوارزمية الرقمية ضمن شرائح متحكمات ذات الفاصلة الثابتة من جهة وذات الدقة 8 خانات من جهة أخرى.
- كيفية التعامل مع العمليات المؤشرة في بناء الخوارزميات ضمن شرائح لا تتوفر فيها تعليمات مباشرة لإجراء



هذه العمليات.

وقد أظهرت النتائج العملية صحة البناء الرقمي للخوارزمية، حيث لم يحدث أي مشكلة متعلقة بطفحان قيم المتحولات. كما أكدت النتائج إمكانية بناء خوارزميات معقدة ضمن شرائح متحكمات ذات دقة 8 خانات.

### المراجع:

- 1- KENJO T., *Power Electronics for the Microprocessor Age*, Oxford University Press, 1990-225.
- 2- BATEMAN A.; STEPHENS I., *The DSP Handbook*, Prentice-Hall, London, England, 2002-664.
- 3- ONG C, *Dynamic Simulation of Electric Machinery*, Prentice-Hall, New Jersey, 1998-626.
- 4- بري مضيف، 1994- تحويل طاقة. منشورات جامعة حلب، 532 صفحة.
- 5- LUECKE J, *Analog and digital circuits for electronic control system application*, Newnes, Oxford, 2005- 329.