

"تصميم منظم تسلسلي للتحكم في محرك تيار مستمر ذو تهيج مستقل مستخدم في نظم التحكم الصناعية باستخدام Matlab"

الدكتور علي أحمد محمود*

الدكتور مخايل سليم مخول**

جاسم يوسف***

(تاريخ الإبداع 2013 / 5 / 7. قُبِلَ للنشر في 2013 / 8 / 28)

▽ ملخص ▽

يعتبر التنظيم التسلسلي أحد الطرق الأساسية الهامة لتصحيح وضبط عمل أنظمة التحكم الآلي لعمل المحركات الكهربائية العاملة على آلات التسوية والخراطة ذات العمل الثقيل نسبياً، هذه الآلات تحتاج إلى زمن قصير في الحالات العابرة وذلك عند تطبيق أحمال فجائية على محاورها. احتلت المنظمات التسلسلية استخداماً واسعاً في مثل أنظمة العمل هذه، نظراً لبساطة تركيبها وسهولة استخدامها ونتائجها الجيدة في تحسين دلائل الجودة للحالات العابرة. في هذا البحث تم استخدام طريقة لاختيار أكثر من منظم توصل على التسلسل، وذلك لتنظيم بارامترات الحالة العابرة للعزم والسرعة في نفس الوقت، وتم الحصول على تحسين واضح في عمل النظام بتقليل الخطأ الستاتيكي والخطأ الديناميكي وكذلك زيادة سرعة الاستجابة للنظام.

الكلمات المفتاحية: دلائل الجودة، التعويض التسلسلي، محرك تيار مستمر، التصميم باستخدام Matlab.

*أستاذ - قسم هندسة الأتمتة الصناعية - كلية الهندسة التقنية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.
**أستاذ - قسم هندسة الأتمتة الصناعية - كلية الهندسة التقنية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.
***طالب دراسات عليا (ماجستير) - قسم هندسة الأتمتة الصناعية-كلية الهندسة التقنية- جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

"Series Regulator Design for DC-Motor Used in Industrial Control Systems Using Matlab"

Dr. Ali Ahmad Mahmoud *
Dr. Mikhael Salim Makhoul**
Jasem Yousef ***

(Received 7 / 5 / 2013. Accepted 28 / 8 / 2013)

▽ ABSTRACT ▽

Series Compensators is considered as one of the basic methods to correct and set the performance of the automatic controlling systems of the electric motors that are working on the equation and lathe machines which have a heavy work proportionally. These machines need a short time in the transient situation since it is applying suddenness loads on its axes.

The cascade Compensators occupied a wide use in these work systems and that is because of its simple setup, easy use and its good results in improving the quality marks of the transient conditions.

The method used in this research is to choose more than a regulator which is connected in cascade in order to regulate the parameters of the transient situation for the Torque and the speed in the same time. Clear improvements were obtained in decreasing the static error and the dynamic error in working system as well as increasing the rapid reaction to the system.

Keywords: quality criteria, series compensator, DC-motor, design using Matlab.

* Professor Department of Industrial Automation, Faculty of Technical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

** Professor Department of Industrial Automation , Faculty of Technical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

*** Postgraduate Student, Department of Industrial Automation, Faculty of Technical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

مقدمة:

يتم تقييم أداء أنظمة التحكم الآلي المستخدمة في العمليات التقنية المختلفة من خلال العديد من البارامترات التي تتميز بها الاستجابة الزمنية لهذه الأنظمة، أي نوع وشكل المسار الذي تسلكه إشارة الخرج وصولاً إلى الحالة المستقرة. هذه البارامترات تدعى دلائل جودة النظام وهي بشكل أساسي عبارة عن: التجاوز الأعظم (Maximum Over Shoot)، زمن الوصول إلى الذروة (Peak Time)، زمن الاستقرار (Settling Time)، زمن الارتفاع (Rise Time) و الخطأ الستاتيكي (Steady State Error) [3].

هناك العديد من الطرق المتبعة لتحسين جودة عمل مثل هذه الأنظمة، مثل التصحيح التسلسلي بإضافة المعوضات التسلسلية النموذجية المعروفة مثل معوضات التقديم في الطور (Lead Compensators)، معوضات التأخير في الطور (Lag Compensators)، معوضات التأخير - تقديم (Lag-Lead Compensators) أو إضافة منظم تناسبي - تكاملي - تفاضلي (PID).

تتصدر مهمة المصمم في هذه الحالات في اختيار بارامترات هذه المنظمات اعتماداً على إحدى الطرق المعروفة، و تصميمها في المجال الزمني أو اعتماداً على المحل الهندسي للجذور أو اعتماداً على مخططات بود [1]. في معظم هذه الحالات سيتم تعقيد تابع النقل لنظام التحكم، ولا بد بعد انتهاء التصميم من اختبار استجابة النظام، للتأكد من أن إضافة هذا المنظم أدت بالنتيجة لتحسين الحالة العابرة وأصبحت دلائل جودتها ضمن الحدود المسموحة.

في بحثنا هذا نتطرق إلى طريقة جديدة تستخدم تقنيات النمذجة والبرمجة في Matlab، للحصول على المنظم الذي يحقق دلائل الجودة المطلوبة. منطلقين من تحديد أبسط تابع نقل مرغوب يحقق هذه الدلائل، ومن ثم بناءً عليه يتم حساب المنظم المطلوب إضافته تسلسلياً، بحيث يجعل تابع النقل المكافئ (المحصلة) مساوياً لتابع النقل المرغوب. النموذج الذي تم وضعه بالاستعانة ب Matlab يمكننا من معرفة سلوك النظام قبل التصحيح وبعده، ويمكننا ببساطة من استنتاج كافة المنحنيات المميزة للنظام قبل وبعد إضافة المنظم، ومقارنتها مع بعضها وذلك ببساطة وخلال وقت قصير.

أهمية البحث وأهدافه:

تكمن أهمية البحث في أنه يضع طريقة لاختيار منظم اعتماداً على المميزات الترددية اللوغارتمية التي يتم وضعها بحيث يحقق النظام دلائل الجودة المرغوبة، وذلك من خلال تحديد العلاقة بين دلائل جودة الحالة العابرة للنظام ومحددات المميزات الترددية اللوغارتمية.

البحث يضع خوارزمية لاختيار هذا المنظم في حالة تنظيم إشارة واحدة للخروج أو أكثر من إشارة في آن واحد كتتنظيم السرعة والعزم التي تكون ضرورية في الكثير من نظم القيادة الآلية الصناعية.

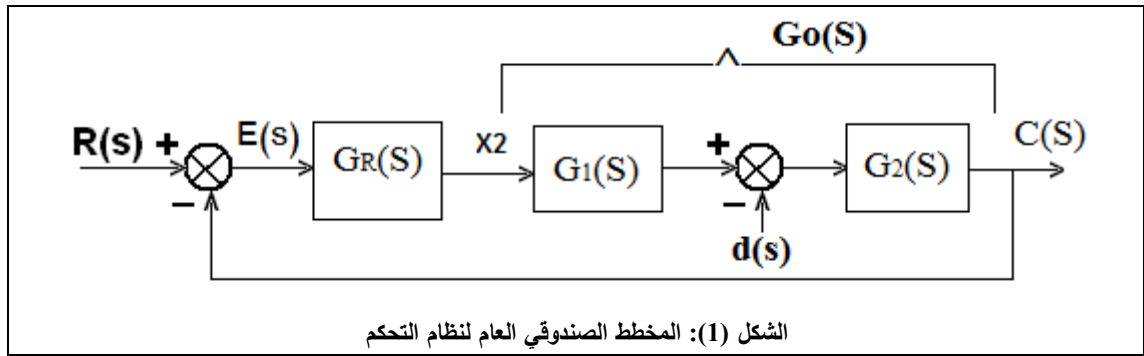
تم الاهتمام في هذا البحث بوضع نموذج حاسوبي باستخدام Matlab & Simulink يساعد ببساطة على تمثيل نظم التحكم الآلي هذه بسهولة واستنتاج دلائل الجودة قبل التصحيح وبعده، وبالتالي أثر عنصر التصحيح المضاف على تحسين دلائل الجودة هذه.

طرائق البحث ومواده:

يقوم البحث على وضع طريقة رياضية لتصميم المنظم الذي يحقق دلائل الجودة اعتمادا على العلاقة بين المميزات الترددية اللوغارتمية ودلائل الجودة لنظم التحكم الآلي. وبالتالي انطلاقا من مميزات ترددية لغارتمية مفترضة تحقق هذه الدلائل، يمكن اختيار المنظم الذي يجعل النظام المصحح يمتلك هذه المميزات المفترضة. تم الاعتماد على النمذجة الحاسوبية باستخدام برنامج Matlab & Simulink لوضع نموذج لنظام القيادة المدروس تمكن من دراسة أثر البارامترات المختلفة على استجابة هذه النظم وبالتالي على دلائل جودة هذه النظم. تعتبر النمذجة الرياضية من الطرق الهامة لتصميم نظم التحكم والقيادة الآلية ذات المعطيات المحددة المرغوبة في الحالتين الستاتيكية والديناميكية.

التصحيح التسلسلي لنظم التحكم الآلي:

من الطرق الأكثر شيوعا في تصميم عناصر تصحيح نظم التحكم الآلي بهدف الحصول على الاستجابة الزمنية المثلى، طريقة الوصل التسلسلي لعناصر التصحيح مع النظام وحساب هذه العناصر اعتمادا على مخططات بود، وذلك للعلاقة الواضحة بين محددات مخطط بود ودلائل جودة النظام. فإذا كان للنظام المخطط الصندوقي المبين في الشكل (1).



من المخطط الصندوقي (1) نكتب:

$$\begin{aligned}
 E(s) &= R(s) - C(s) \\
 C(s) &= [E(s) \cdot G_R(s) \cdot G_1(s) - d(s)] G_2(s) \\
 E(s) &= R(s) - E(s) \cdot G_R(s) \cdot G_1(s) \cdot G_2(s) + d(s) G_2(s) \\
 E(s)[1 + G_R(s) \cdot G_1(s) \cdot G_2(s)] &= R(s) + d(s) G_2(s) \\
 E(s) &= \frac{R(s) + d(s) G_2(s)}{1 + G_R(s) \cdot G_1(s) \cdot G_2(s)} \quad (1)
 \end{aligned}$$

حيث:

$R(s)$: إشارة الدخل. $E(s)$: إشارة الخطأ. $G_R(s)$: تابع النقل للمنظم. $d(s)$: إشارة التشويش.
 $G_1(s) \cdot G_2(s)$: تابع النقل المفتوح لنظام التحكم. $G_2(s)$: الجزء من نظام التحكم الخاضع للتشويش.
 لنفرض أن لنظام التحكم تابع نقل له الصيغة العامة التالية في الحالة المفتوحة:

$$G(s) = \frac{K \cdot \prod_{j=1}^n (1 + T_j S)}{S^v \cdot \prod_{i=1}^m (1 + T_i S)} \quad (2)$$

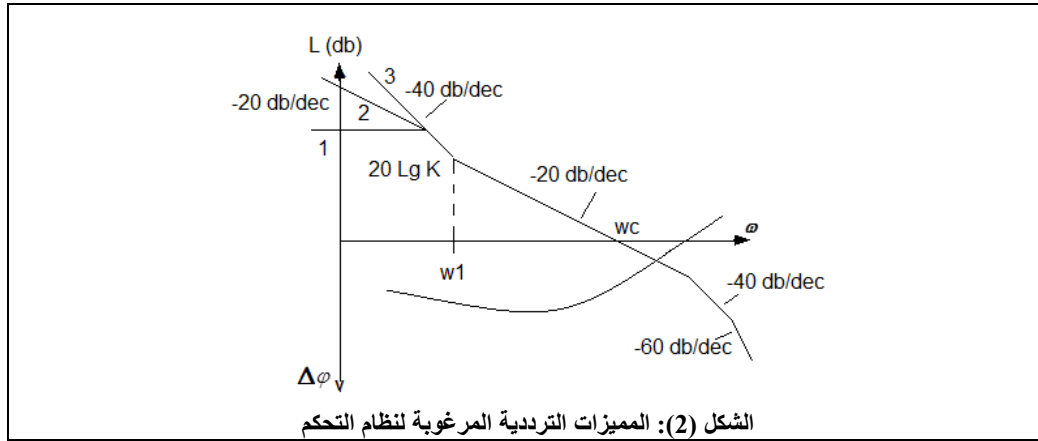
حيث: v : عدد حلقات التكامل في النظام (درجة اللاستاتيكية للنظام). n : عدد حلقات التقديم في النظام.
 m : عدد حلقات التأخر في النظام. K : ثابت ربح النظام.

حتى يحقق نظام التحكم شروط جودة محددة ومعلومة (في الحالتين الستاتيكية والديناميكية) لابد لمنحني المميزات الترددية اللغارتمية للنظام المفتوح أن يأخذ شكلاً محدداً له علاقة بدلائل الجودة هذه. يبين الشكل (2) المميزات الترددية اللغارتمية المرغوبة بشكل عام ليحقق نظام التحكم دلائل جودة مقبولة. حتى يتم تحقيق المطلوب من دلائل جودة نظام التحكم لابد من أن يكون شكل المميزات الترددية اللغارتمية في مجال الترددات المنخفضة محققاً للخطأ الستاتيكي المطلوب [1] [6].

ومن المعلوم ان الخطأ الستاتيكي يتعلق بنوع إشارة الدخل و صنف النظام وكذلك بثابت ربح النظام K . في حال كان $v = 0$ أي أن نظام التحكم خالٍ من أي حلقة تكامل وبالتالي فإن الخطأ الستاتيكي وفقاً للعلاقة (1) سيكون متعلقاً فقط بثابت ربح النظام K وللحصول على الدقة المطلوبة (أي تحديد الخطأ الستاتيكي) ضمن الحدود المقبولة لابد أن تحقق العلاقة التالية:

$$K \geq \frac{R}{e_{ss}} \quad (3)$$

حيث: R : مطال إشارة الدخل. e_{ss} : الخطأ الستاتيكي المسموح.



ولإلغاء إشارة الخطأ تماماً لابد من إضافة حلقة تكامل على التسلسل في دخل النظام وعندها يصبح صنف النظام واحد ($v=1$).

الجزء من منحني المميزات الترددية اللغارتمية المرغوبة المبين بالشكل (2) والموضح بالميل $(-20, 0)$ db/dec (...), 40 يحدد درجة اللاستاتيكية النظام وبمعنى آخر عدد حلقات التكامل فيه. ومن المعروف أنه كلما زادت درجة اللاستاتيكية أي زادت قيمة v فإن الدقة الديناميكية تزداد في مجال واسع للتردد.

ان المواصفات الديناميكية للنظام تتعلق بشكل كبير ومباشر بشكل المميزات الترددية اللغارتمية في مجال الترددات المتوسطة. وللحصول على احتياطي للاستقرار مقبول لابد أن يكون ميل منحني المميزات الترددية اللغارتمية في مجال الترددات المتوسطة أي في المنطقة المجاورة لتردد القطع ω_c , هذا الميل يجب أن يكون (-20 db / dec) وممتد بشكل كافي حول هذا التردد وكلما كان امتداد هذا الجزء أكبر حول تردد القطع كلما ازداد احتياطي الاستقرار للطور [6]:

$$\gamma_c(\omega_c) = -180 + \varphi(\omega_c) \quad (4)$$

حيث: $\gamma_c(\omega_c)$: احتياطي الطور للاستقرار. $\varphi(\omega_c)$: زاوية الطور للنظام الموافقة لتردد القطع.

إن قيمة احتياطي الطور الموافقة لتردد القطع تحدد مقدار التجاوز الأعظمي واهتزازية النظام.

$$\Delta C_{max} = C_y [1 - \sin \gamma_c] \quad (5)$$

حيث C_y : القيمة المستقرة لإشارة الخرج.

إن تردد القطع يحدد سرعة استجابة النظام حيث يعطى زمن الارتفاع بالعلاقة التقريبية التالية، [2] [1]:

$$t_r \approx \frac{(1.5 \div 2)}{\omega_c} \quad (6)$$

كما يعطى زمن الوصول للذروة بالعلاقة التقريبية التالية، [2] [1]:

$$t_p \approx \frac{\pi}{\omega_c} \quad (7)$$

مما سبق نستنتج:

- أن تردد الانكسار المجاور لتردد القطع من جهة الترددات المنخفضة ω_L يؤثر على دلائل الجودة ، بحيث إن اقتراب هذه الترددات من تردد القطع يؤدي إلى انخفاض احتياطي الاستقرار للطور، ويزداد بنفس الوقت زمن الوصول إلى الذروة.

- أن تردد الانكسار المجاور لتردد القطع من جهة الترددات العالية ω_H يؤثر على الجزء الابتدائي من منحنى الاستجابة الزمنية للحالة العابرة.

- كلما اقترب هذا التردد من تردد القطع كلما ازداد زمن تأخير بدء المنحنى العابر [2] [1].

وهكذا فإنه للحصول على دلائل جودة محددة لابد أن يكون للنظام مميزات ترددية لوغارتمية محددة نسميها المميزات المرغوبة L_{CO} . وبالتالي إذا كنا نريد الحصول على هذه المميزات المرغوبة يوصل عنصر تصحيح على التسلسل في دخل النظام يمكن الحصول على المميزات الترددية اللوغارتمية له من العلاقة:

$$L_R = L_{CO} - L_{un} \quad (8)$$

حيث: L_{un} : المميزات الترددية اللوغارتمية للنظام المفتوح قبل التصحيح.

L_R : المميزات الترددية اللوغارتمية لعنصر التصحيح

***وضع طريقة لتنظيم المقدار المتحكم به:**

عند تصميم المنظمات الآلية التسلسلية حيث يوصل المنظم على التسلسل في دخل النظام كما في الشكل

(1) فإن النظام يصبح مؤلف من:

$G_R(S)$ تابع النقل للمنظم، و $G_O(S)$ تابع النقل المفتوح للنظام قبل التصحيح.

وبالتالي يكون تابع النقل للنظام المفتوح المصحح $G_O(S)$ يساوي:

$$G_{CO}(s) = G_R(s) \cdot G_O(s) \quad (9)$$

حيث: $G_O(s) = G_1(s) \cdot G_2(s)$ وذلك عندما $d(s) = 0$

وبفرض أن تابع النقل للنظام قبل التصحيح له الشكل التالي:

$$G_O(s) = \frac{K_1 \cdot K_2 \dots \dots \dots K_n \cdot e^{-\tau_s \cdot s}}{\prod_{i=1}^m (1 + T_i \cdot s)} \quad (10)$$

حيث: τ_s : ثابت التأخير الزمني. T_i : ثابت زمني لنظام التحكم.

وبفرض أن للمنظم تابع النقل التالي:

$$G_R(s) = \frac{\prod_{j=1}^L (1 + T_j \cdot s)}{K_1' \cdot K_2' \dots \dots \dots K_n' \cdot T_0 \cdot s} \quad (11)$$

حيث: L : عدد الثوابت الزمنية.

في هذه الحالة يكون تابع النقل للنظام المصحح:

$$G_{CO}(s) = \frac{K_1 \cdot K_2 \dots \dots K_n \cdot e^{-\tau_s \cdot S} \prod_{j=1}^L (1 + T_j \cdot S)}{K_1' \cdot K_2' \dots \dots K_n' \cdot T_0 \cdot S \cdot \prod_{i=1}^m (1 + T_i \cdot S)} \quad (12)$$

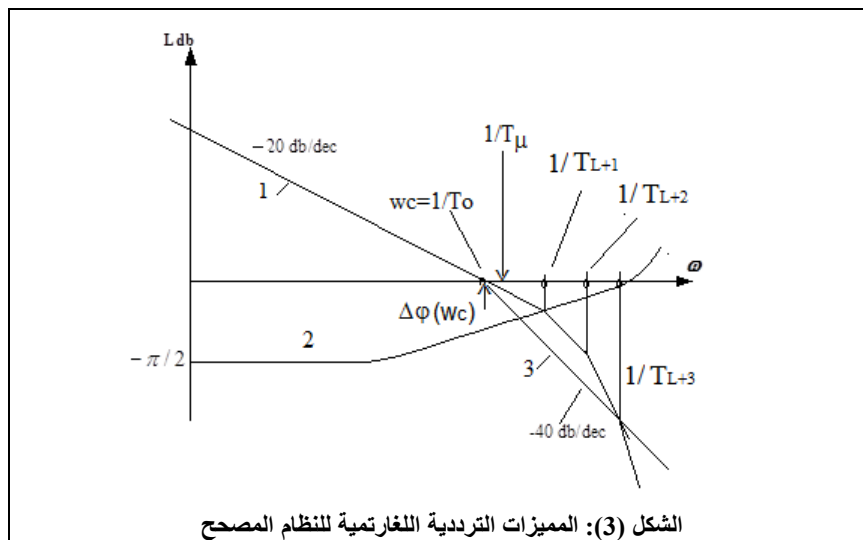
في حال:
 $K_1 = K_1', K_2 = K_2', \dots \dots K_n = K_n'$
 $T_i = T_j$

يصبح التابع السابق على الشكل التالي:

$$G_{CO}(s) = \frac{e^{-\tau_s \cdot S}}{T_0 \cdot S \cdot \prod_{i=L+1}^m (1 + T_i \cdot S)} \quad (13)$$

ويمناقشة العلاقات السابقة نجد أن:

- أي بإدخال المنظم ذو تابع النقل المبين بالعلاقة (11) وباختيار مناسب لثوابته يتم حذف L حلقات التكامل ذات الثوابت T_i .
- إن حذف حلقات التكامل ذات الثوابت الزمنية المتوسطة والكبيرة يؤدي إلى زيادة سرعة استجابة النظام.
- إن أهم ميزات العلاقة (13) هي أنها تتيح امكانية اختيار الثابت T_0 المناسب, هذا الاختيار سيكون له تأثير جيد على ضبط جودة النظام.
- إذا تم اختيار T_0 بحيث يحقق الشرط $T_0 < T_{L+1}$ حيث T_{L+1} تمثل الثابت الأكبر من بين الحلقات المتبقية بدون تعويض بالتالي يمكن وضع المميزات الترددية اللغارتمية للعلاقة (13) كما في الشكل (3):



- إن الجزء من مخطط بود المذكور في مجال الترددات المنخفضة والمتوسطة يملك ميل (- 20 dB/dec) المستقيم رقم (1).

ويكون الاحتياطي عند تردد القطع γ المبين بالمنحني رقم (2) يعتمد على مقدار بعد تردد القطع $1/T_0$ عن أقرب تردد انكسار $1/T_{L+1}$.

وبالأخذ بعين الاعتبار ثابت التأخير الزمني τ_p يكون احتياطي الطور معطى بالعلاقة:

$$\gamma(\omega c) = -\pi + \frac{\pi}{2} + \tau_p \cdot \omega c + \sum_{i=1}^m \tan^{-1}(T_i \omega c) \quad (14)$$

إن الزاوية $\gamma(\omega c)$ المعطاة بالعلاقة (14) ليست كبيرة لذا فإنه عند تردد الانكسار الموافق فإن:

$$\tan^{-1}(T_i \cdot \omega_i) = \tan^{-1} 1 = \frac{\pi}{4}$$

ويما أن $T_0 > T_{L+1}$ فإن:

$$\tan^{-1}(T_i \cdot \omega_i) < \frac{\pi}{4}$$

ومنه نعتبر:

$$\tan^{-1}(T_i \cdot \omega_i) \approx T_i \cdot \omega_i$$

أي:

$$\gamma(\omega c) \approx -\frac{\pi}{2} + \tau_p \cdot \omega c + \sum_{L+1}^m T_i \cdot \omega_i = -\frac{\pi}{2} + T_\mu \cdot \omega c \quad (15)$$

حيث: $T_\mu = \tau_p + \sum_{L+1}^m T_i$ هي مجموع الثوابت الزمنية للحلقة غير المعوضة.

بالأخذ بعين الاعتبار العلاقة (15) يمكن بتقريب مقبول أن نكتب:

$$G_0 = \frac{1}{T_0 S (T_\mu S + 1)} \quad (16)$$

إن المميزات الترددية للغارتمية الموافقة للعلاقة (16) تنطبق على المنحني (1) في مجال الترددات المتوسطة

في الشكل (3).

أما في مجال الترددات العالية فهو عبارة عن المنحني (3) ذي الميل (-40 dB/dec) تردد الانكسار لهذه الحلقة $1/T_\mu$ يقع قريبا من تردد القطع حيث يأخذ في الاعتبار قيم جميع ثوابت الحلقات ذات الثوابت الصغيرة على الصفات الديناميكية للحلقة. وهكذا تم البرهان أنه عند الحاجة إلى الحصول على شروط دقة هندسية محددة في حالة التصحيح التسلسلي يمكن اعتماد التابع المبين بالعلاقة (16) كتابع نقل لنظام التحكم المصحح.

في هذه الحالة يصبح تابع النقل للنظام المغلق بالشكل:

$$G_c = \frac{1}{T_0 S (T_\mu S + 1) + 1} \quad (17)$$

وتكون جذور المعادلة المميزة من الشكل:

$$G_{1,2} = -\frac{1}{2T_\mu} \mp \sqrt{\frac{1}{4T_\mu^2} - \frac{1}{T_0 T_\mu^2}} = \frac{1}{T_0} \left(-\frac{a}{2} \mp \sqrt{\frac{a^2}{4} - a} \right)$$

حيث: $a = T_0 / T_\mu$: ثابت حلقة التنظيم الموافقة.

عندما $a < 4$ فإن الاستجابة الزمنية لنظام القيادة والتحكم عند تطبيق إشارة دخل على شكل قفزة واحدة وعند

شروط ابتدائية صفرية تعطى بالعلاقة التالية:

$$X(t) = X_{SP} \left[1 - e^{-t/2T_\mu} \left(\cos \frac{\sqrt{4a - a^2}}{2\alpha T_\mu} t - \frac{\alpha}{\sqrt{4a - a^2}} \sin \frac{\sqrt{4a - a^2}}{2\alpha T_\mu} t \right) \right] \quad (18)$$

إن مجموع قيمة الثوابت الزمنية للحلقات غير المعوضة T_μ يحدد بشكل كامل سرعة استجابة نظام التحكم أي

يحدد الزمن اللازم لاستقرار الحالة العابرة t_s وبالنسبة للعلاقة (18) فإن زمن الحالة العابرة يعطى بالعلاقة:

$$t_s = (3 \div 4) \cdot 2 \cdot T_\mu = (6 \div 8) \cdot T_\mu \quad (19)$$

إن اهتزاز النظام والتجاوز الاعظمي له يتحدد أيضاً من الثابت a ، ومنه فإننا بالاختيار الصحيح للثابت a يمكن

أن نجعل النظام يحقق المواصفات الديناميكية المطلوبة.

الطريقة المبينة أعلاه تستخدم على نطاق واسع في المشاريع الهندسية التطبيقية لتصميم عناصر التصحيح لنظم التحكم الآلي، حيث إنه من المعطيات المطلوبة (أي عند تحديد شروط الجودة المطلوبة يتم تحديد الثابت a). وبمساعدة العلاقة (15) يتم حساب الثابت T_μ وبالتالي يكون قد تحدد لدينا تابع النقل المفتوح لنظام التحكم المرغوب (الذي يحقق دلائل الجودة المطلوبة):

$$G_{o,com} = \frac{1}{a T_\mu S (T_\mu S + 1)} \quad (20)$$

وإذا كان تابع النقل للنظام غير المصحح معطى بالعلاقة:

$$G_{o,uncom} = \frac{K_1 \cdot K_2 \dots \dots K_n}{(T_\mu S + 1) \cdot \prod_{i=1}^L (T_i S + 1)} \quad (21)$$

يكون تابع النقل لعنصر التصحيح المطلوب وبالتوافق مع العلاقة (9) معطى بالعلاقة:

$$G_R = \frac{G_{o,com}}{G_{o,uncom}} = \frac{\prod_{i=1}^L (T_i S + 1)}{K_1 \cdot K_2 \dots \dots K_n \cdot a \cdot T_\mu S} \quad (22)$$

بالنظر للعلاقة (22) يمكن التأكد من أنه كلما زاد عدد حلقات النظام L فإن المنظم اللازم سيكون ذا تابع نقل أكثر تعقيداً. عندما $L = 0$ (هذا يوافق أن جميع الثوابت T_i صغيرة) عندها يكون تابع نقل المنظم حسب العلاقة:

$$G_{o,com} = \frac{1}{T_e \cdot S} \quad (23)$$

حيث: $T_e = (K_1 K_2 \dots \dots K_n) a T_\mu$

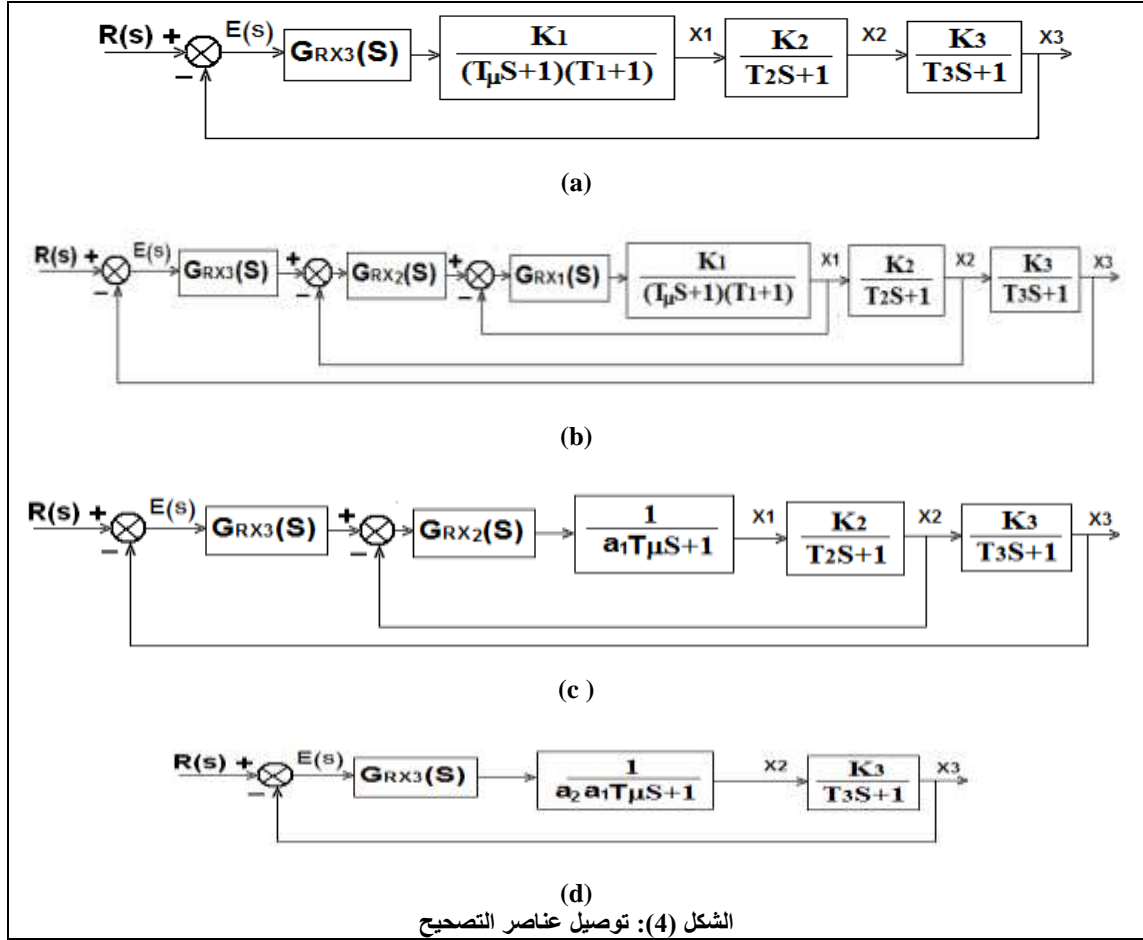
في هذه الحالة يكون المنظم عبارة عن مكامل بثابت تكامل T_e . وعندما $L = 1$ فإن تابع نقل المنظم يكون على الشكل التالي:

$$G_R = \frac{T_1 S + 1}{T_e S} = \frac{T_1}{T_e} + \frac{1}{T_e S} \quad (24)$$

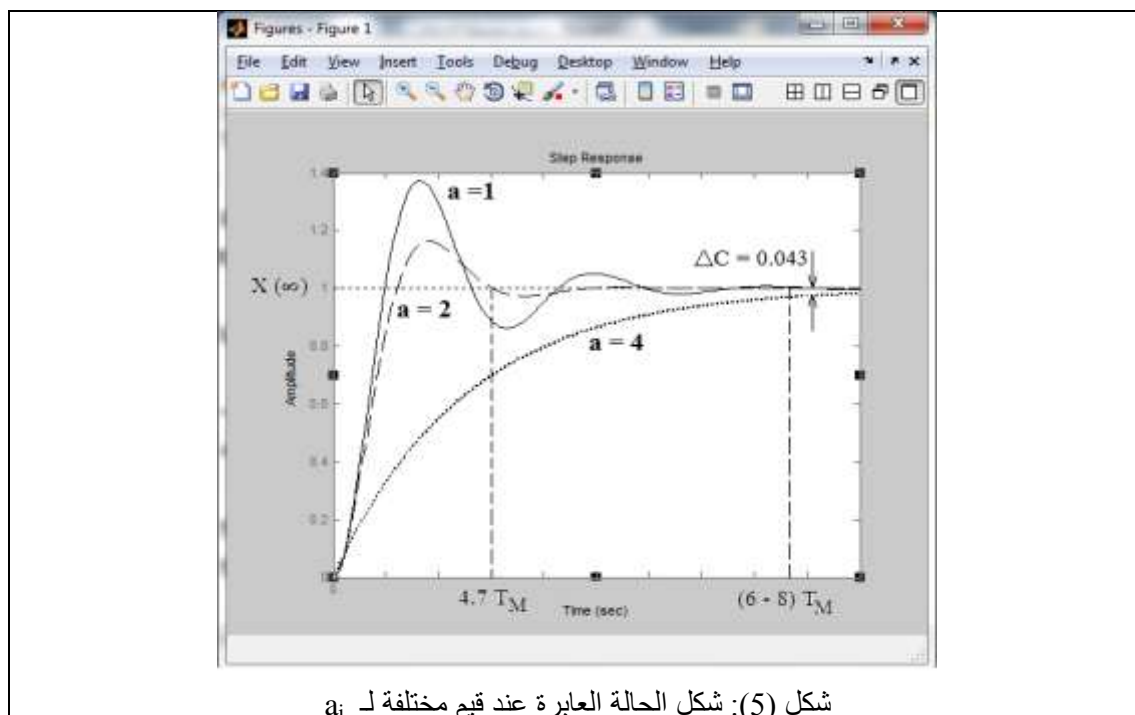
ويظهر من هذه العلاقة أنه في هذه الحالة يلزمنا عنصر تناسب مع عنصر تكامل. وعندما $L = 2$ فإنه لا بد من منظم تناسبي تكاملي تفاضلي عند زيادة L فإنه في تابع نقل المنظم سيكون هناك تضاعف لحلقات العطالة.

- انطلاقاً من ضرورة التقليل من الانحراف يسمح فقط بحلقة ذات عطالة واحدة وبكلمات أخرى فإن عنصر التصحيح يجب ألا يحتوي أكثر من عنصرين ذوي ثوابت الزمنية العليا والمتوسطة (العظمى والمتوسطة).
- إذا احتوت حلقة التحكم على أكثر من عنصرين ذوي الثوابت الزمنية العظمى والمتوسطة T_i بحاجة إلى تعويض (تصحيح) فإن ذلك يتطلب اختيار عناصر التصحيح المناسبة.

لنفرض أنه لدينا حلقة تحكم بحاجة إلى تنظيم إشارة الخرج X_3 مبينة في الشكل (4-a).



من وجهة نظر الحماية من الانحراف يفضل اختيار منظم بسيط (قليل التعقيد).
 هذا الأمر ممكن وذلك باستخدام طريقة مساعدة، وهي وضع منظم خاص لكل عنصر من عناصر النظام شكل (4-a). وبذلك يكون لدينا في كل حلقة فقط منظم واحد لتعويض الحلقات ذات الثوابت $T_i \div T_L$.
 في الشكل (4-a) يلزم وضع ثلاثة معوضات لتعويض ثلاث حلقات زمنية T_1, T_2, T_3 . والمنظم G_{RX3} من أجل حلقة واحدة يمتلك تابع نقل ذي المعادلة التفاضلية من الدرجة الثانية.



شكل (5): شكل الحالة العابرة عند قيم مختلفة لـ a_i

$$G_R = \frac{T_1 T_2 T_3}{T_e} S + \frac{T_1 T_2 + T_1 T_3 + T_2 T_3}{T_e} S + \frac{T_1 + T_2 + T_3}{T_e} S + \frac{1}{T_e S}$$

للنظر كيف يؤثر إضافة منظم عدد (2) للمتحولين X_1 و X_2 كما هو مبين في الشكل (4-b). من أجل ذلك يتم تحديد تابع النقل لمنظم الحلقة الداخلية للمتحول X_1 وذلك باستخدام الطريقة الموضحة في بداية الفقرة وبذلك يكون تابع النقل للنظام المرغوب في الحلقة الأولى:

$$G_{ox1}(s) = \frac{1}{a_1 T_\mu S (T_\mu S + 1)} \quad (25)$$

تابع نقل الجزء من النظام في الحلقة الأولى:

$$G_{opx1}(s) = \frac{K_1}{(T_\mu S + 1) (T_1 S + 1)} \quad (26)$$

وبذلك يكون تابع النقل للمنظم:

$$G_R = \frac{T_1 S + 1}{K_1 a_1 T_\mu S} + \frac{T_1}{T_{e1}} + \frac{1}{T_{e1} S} \quad (27)$$

حيث:

$$T_{e1} = K_1 a_1 T_\mu$$

يكون تابع النقل المغلق للحلقة الأولى:

$$G_{ox1}(s) = \frac{1}{a_1 T_\mu S (T_\mu S + 1) + 1} \quad (28)$$

مع الأخذ بالاعتبار العلاقة (28) يكون تابع النقل لحلقة المتحول X_2 المفتوحة:

$$G_{opx2}(s) = G_{cx1}(s) \cdot \frac{K_2}{(T_2 S + 1)} = \frac{1}{a_1 T_\mu S (T_\mu S + 1) + 1} \cdot \frac{K_2}{(T_2 S + 1)} \quad (29)$$

إذا تم اختيار a_1 بشكل تكون معه الحلقة الداخلية ذات تخامد كبير فإن العلاقة (29) يمكن تبسيطها. والتطبيقات العملية بينت أن تبسيط تابع النقل وذلك بحذف الحد ذو الدرجة الثانية من المعادلة المميزة، لا يؤثر بشكل واضح على دقة الحساب في نظم القيادة الآلية الكهربائية وبذلك يمكن إعادة كتابة العلاقة (29) على الشكل:

$$G_{opx2}(s) = \frac{1}{a_1 T_\mu S + 1} \cdot \frac{K_2}{(T_2 S + 1)} \quad (30)$$

حلقة التحكم للمتحوّل X_2 مبينة في الشكل (4-c) حيث يتبين أنه لم يعد هناك وجود للثابت الزمني T_1 . وتقييم الجزء المتبقي سيتم من خلال الثابت $T_{\mu 2} = a_1 T_\mu$ بالتالي يكون تابع النقل المرغوب على الشكل:

$$G_{ox2}(s) = \frac{1}{a_1 T_{\mu 2} S (T_{\mu 2} S + 1)} = \frac{1}{a_1 a_2 T_\mu S (a_1 T_\mu S + 1)} \quad (31)$$

ويكون تابع النقل لمنظم المتحوّل X_2 ناتج عن تقسيم العلاقة (31) على العلاقة (30):

$$G_{Rx2}(s) = \frac{T_2 S + 1}{K_2 a_1 a_2 T_\mu S (a_1 T_\mu S + 1) + 1} = \frac{T_2}{T_{e2}} + \frac{1}{T_{e2} S} \quad (32)$$

حيث:

$$T_{e2} = K_2 a_1 a_2 T_\mu$$

ويكون تابع النقل المغلق لهذه الحلقة:

$$G_{cx2}(s) = \frac{1}{a_1 a_2 T_\mu S (a_1 T_\mu S + 1)} \quad (33)$$

باختيار مناسب للثابت a_2 يمكن حذف الجزء ذي الدرجة الثانية من المعادلة المميزة دون التأثير الواضح على

دقة النتائج ويكون تابع النقل المفتوح للنظام من أجل المتحوّل X_3 هو:

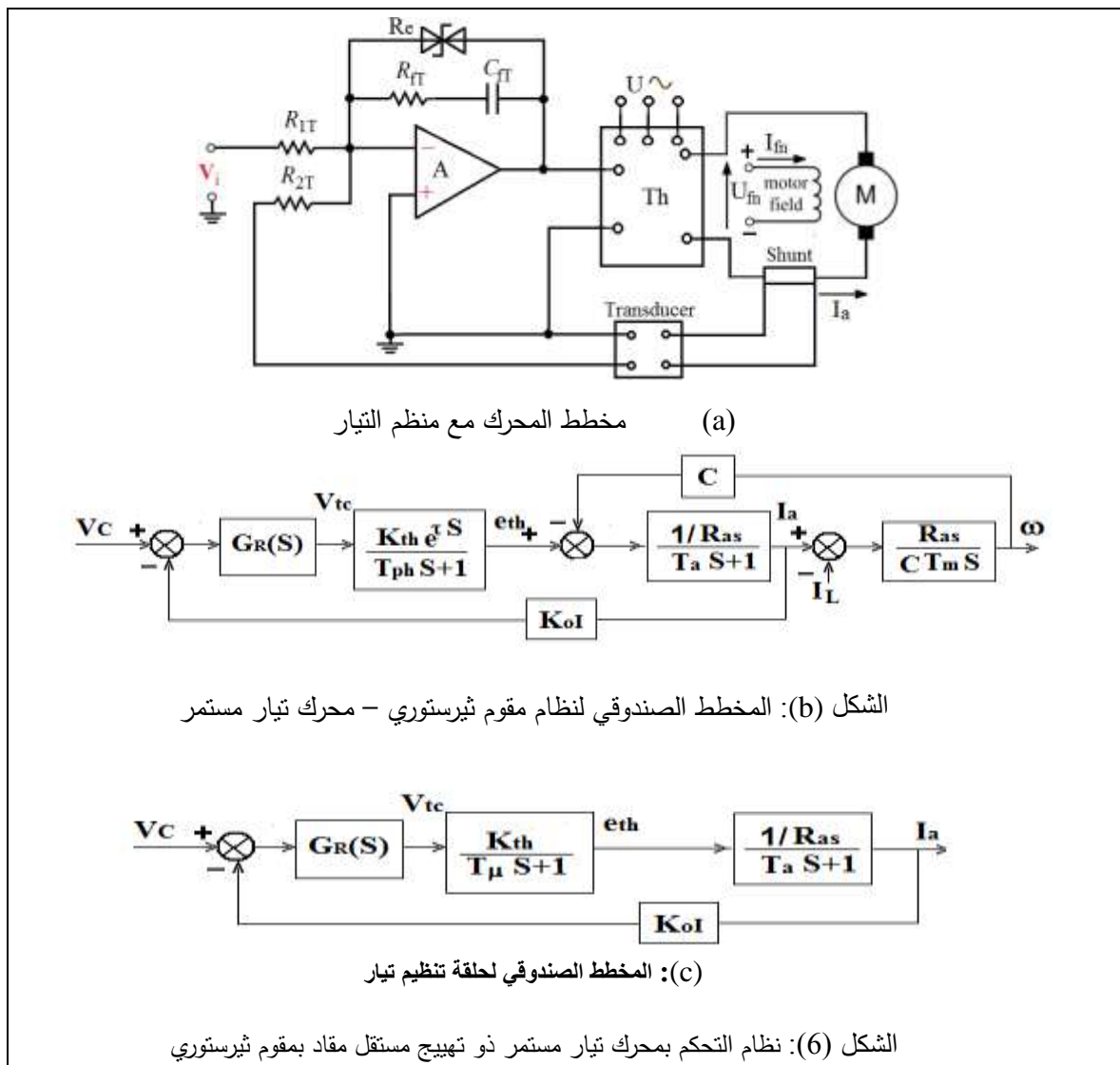
$$G_{ox3}(s) = G_{cx2}(s) \cdot \frac{K_3}{T_3 S + 1} = \frac{1}{a_1 a_2 T_\mu S + 1} \cdot \frac{K_3}{T_3 S + 1} \quad (34)$$

النتائج والمناقشة:

سيم تطبيق الدراسة السابقة على محرك تيار مستمر بالمواصفات التالية:

الجهد الإسمي: $V_n=220$ Volt، الاستطاعة الإسمية: $P_n=30$ Kw، التيار الإسمي: $I_n=147$ A، السرعة الإسمية: $\omega_n=147$ rad/sec، وسرعة اللاحمل $\omega_0=182.4$ rad/sec، مقاومة المتحرض: $R_a=0.045\Omega$. تتم تغذية المحرك من مقوم ثايرستوري بالمواصفات التالية: $V_{th}=230$ Volt، جهد التحكم: $V_{cth}=10$ Volt، تيار المقوم الإسمي: $I_{th}=300$ A، المقاومة المكافئة للمقوم: $R_{th}=0.06\Omega$. مجموع عزوم العطالة منقولة لمحور المحرك: $J=1.3$ Kg.m²، الثابت الزمنية للمتحرض: $T_a=0.06$ sec، وضعت في دائرة الدائر مفرعة لقياس التيار (75 , 200 A)، ثابت مفرعة التيار $K_I = 50$ mV.

بناء على المعطيات السابقة يكون المخطط الصندوقي للنظام، كما في الشكل (6):



تحديد بارمترات المخطط الصندوقي للنظام:

$$K_{th} = \frac{V_{tc}}{V_c} = \frac{230}{10} = 23$$

مجموع مقاومات دائرة المتحرض:

$$R_{as} = 1.1(R_a + R_{th}) = 1.1(0.045 + 0.06) = 0.116 \Omega$$

الضرب بـ 1.1 لتعويض المفايد في أسلاك التوصيل والوصلات [7]. كما تعطى الثابت الزمني للمقوم

$$T_{\mu} = \tau_{th} + T_{ph} = 0.01 \text{ sec}$$

بالتوافق مع الدراسة السابقة يكون تابع النقل المفتوح المرغوب لحلقة تنظيم التيار:

$$G_{com,1}(S) = \frac{1/K_t}{2T_{\mu}S(T_{\mu}S + 1)}$$

تابع النقل لحلقة التيار المفتوحة قبل التصحيح:

$$G_{uncom}(S) = \frac{K_{th}/R_{as}}{(T_{\mu}S + 1)(T_aS + 1)}$$

وبالتالي يكون تابع النقل للمنظم:

$$G_{RI}(S) = \frac{G_{com,I}(S)}{G_{uncom}(S)} = \frac{1/K_I}{2T_m S (T_m S + 1)} \times \frac{(T_\mu S + 1)(T_a S + 1)}{K_{th} / R_{as}}$$

حيث: $T_e = \frac{K_I \cdot K_{th}}{R_{as}} \cdot 2T_\mu$ ثابت التكامل في المنظم التناسبي التكاملي. دارة المنظم التكاملي مبينة في الشكل

(6-a). الثابت الزمني لحلقة التغذية العكسية للمنظم :

$$T_{oin} = R_{JT} \cdot C_{JT} = T_a$$

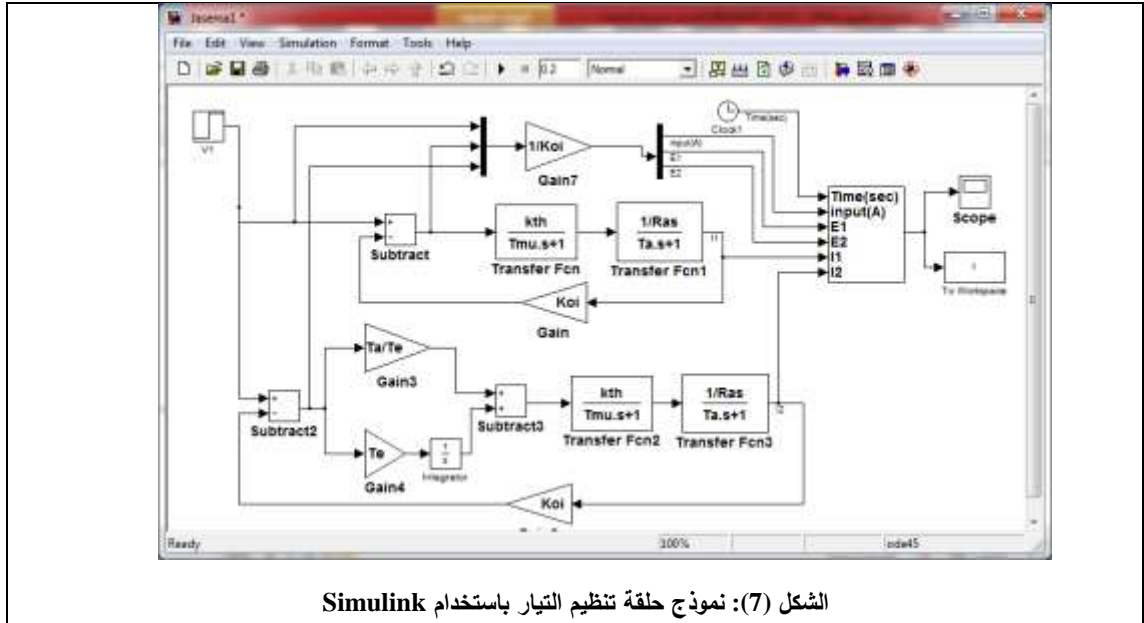
وبفرض $R_{JT} = 10 \text{ K}\Omega$ تكون $C_{JT} = 6 \mu F$.

$$K_{ol} = K_{sh} \cdot K_I \cdot R_{IT} / R_{JT} \quad ; \quad K_{sh} = \frac{V_{sh}}{I_{sh}} = \frac{75 \times 10^{-3}}{200} = 0.000375 \text{ V / A}$$

باعتبار $R_{IT} = R_{JT} = 10 \text{ K}\Omega$ ، يكون قيمة تابع نقل المسار العكسي في حلقة تنظيم التيار

$$\cdot K_{ol} = 0.000375 \text{ V / A}$$

بناءً على القيم المحسوبة تم وضع نموذج باستخدام Simulink في MatLab كما في الشكل (7)، هذا النموذج يمثل حلقة تنظيم التيار، ويمكن من خلاله دراسة الاستجابة الزمنية والخطأ الستاتيكي قبل التصحيح وبعد التصحيح، وبالتالي أثر المنظم الذي تم تصميمه على دلائل جودة النظام.



الشكل (7): نموذج حلقة تنظيم التيار باستخدام Simulink

الخوارزمية (المخطط التدفقي) المتبعة لحساب بارمترات منظم العزم والسرعة هي على الشكل التالي:



برنامج حساب بارمترات منظم العزم والسرعة

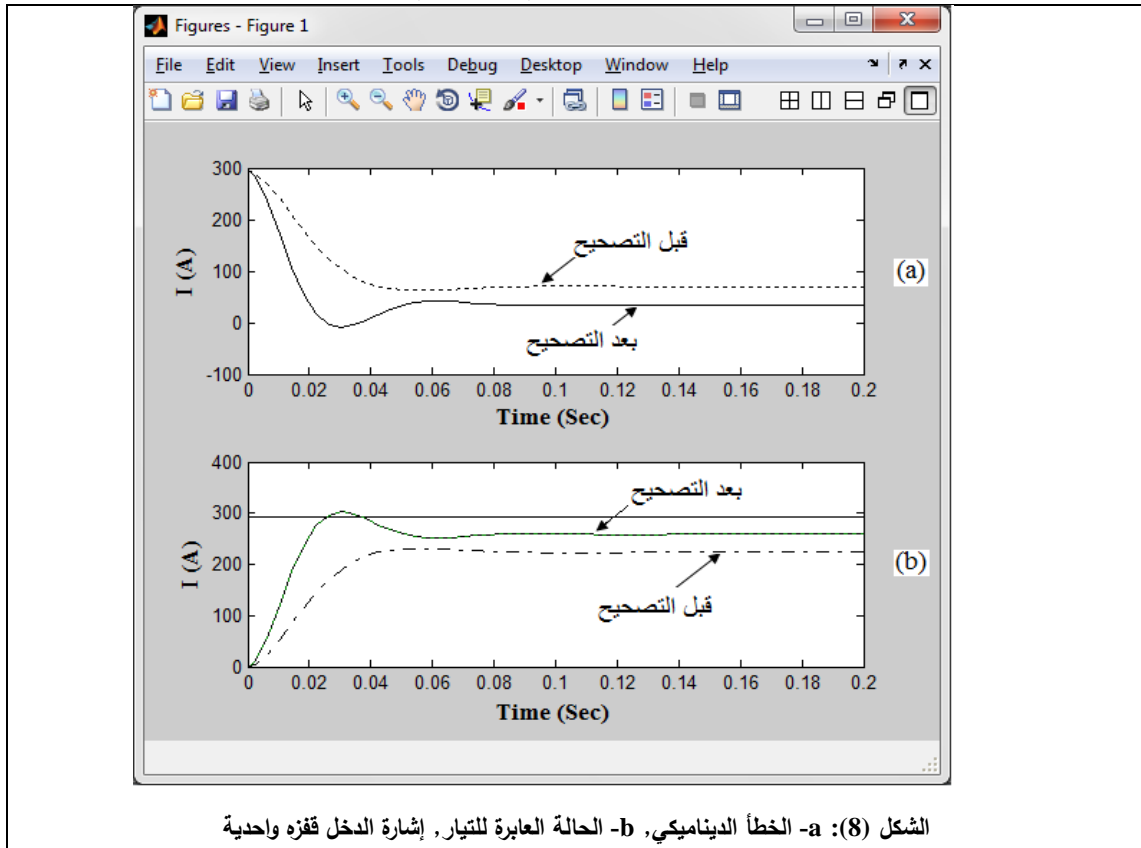
```

1 % DC-Motor
2 Vin=230; % nominal Volt DC-Motor ; Volt
3 Pn=3043; % nominal Power DC-Motor ; Watt
4 In=147; % nominal Current DC-Motor ; Ampere
5 Wn=147; % nominal Speed (Rad/sec)
6 Imaxid=2; %limit Iu
7 Rs=0.045; % Sen of Resistance unitmeter
8 Wn=182.4;
9
10 % Thyristor
11 Vin=230; % الجهد المقدم للثايرستوري الأسي
12 Vty=10; % الجهد المقدم للثايرستور
13 Ity=300; % التيار المقدم للثايرستور
14 Kit=1.2; % عامل ريثت التخميد للثايرستور
15 Rts=0.06; % المقاومة المكافئة لثايرستور
16 J=1.5;
17 Tm=0.06; % الثابت الزمني للمحرك
18 Isk=200; % التيار مقومة الثايرستور
19 Vth=75e-3; % جهد الفتحعة الأسي
20 Kd=5; % ثابت التردد
21 Vg=1; % الجهد المرجعي
22 z=1; % ثابت الزمن
23 Kd=1/In; % ثابت زخم العزم
24 Iaw=1*(In-Ity); % التيار المقدم للمحرك
25 ms=0.01; % ثابت التردد المقوم
26 Istar=Imaxid*In; % التيار المقدم للثايرستور
27 Ke=Vg/Istar; % ثابت الجهد المقوم
28 Kr=Kit; % ثابت العزم
29 be=1; % ثابت التردد
30 TM=0.06; % ثابت التردد المقوم
31 kv=Vg/Wn; % ثابت الجهد المقوم
32 kv=13.9; % ثابت العزم المقوم
33 s=tf('s');
34 Goc=1/(Rs*(s^2+2*s+1)); % تابع النقل المقوم
35 KKoc=1/(Rs^2*tm^2);
36 m=1;
37 pcc=[-1; -1*tm];
38 Goc=plotz(pcc, KKoc);
39 KKu=Kth/(Ra*tm*Ta);
40 m=[];
41 pu=[-1*tm; -1*Ta];
42 Gc=plotz(pu, KKu);
43 Gc=mirreal(Goc, Gc);
44 Goc=feedback(Goc, KK); % تابع النقل المقوم
45 Gc=feedback(Gc, KK); % تابع النقل المقوم
46 z1=zero(Gc);
47 C1=6e-6; % حساب مكثف عنصر التصحيح
48 RC=1/(z1*C1); % حساب مقاومة خرج عنصر التصحيح
49 s=tf('s');
50 Gm=s*Gc;
51 Gmk=mirreal(Gm);
52 hk=diagm(Gmk);
53 R1=1/(C1*kk);
54 G=ff([0, 1], [b*TM, 1]);
55 Gocs=Goc*Gc;
56 Gosr=agr*Gocs;
57 G22=feedback(Gocs, kv);
58 G2=feedback(Gosr, kv);
59 subplot(2,1,1);
60 step(10*Goc);
61 hold on;
62 step(10*Guc);
63 subplot(2,1,2);
64 step(10*G22);
65 hold on;
66 step(10*G2);

```

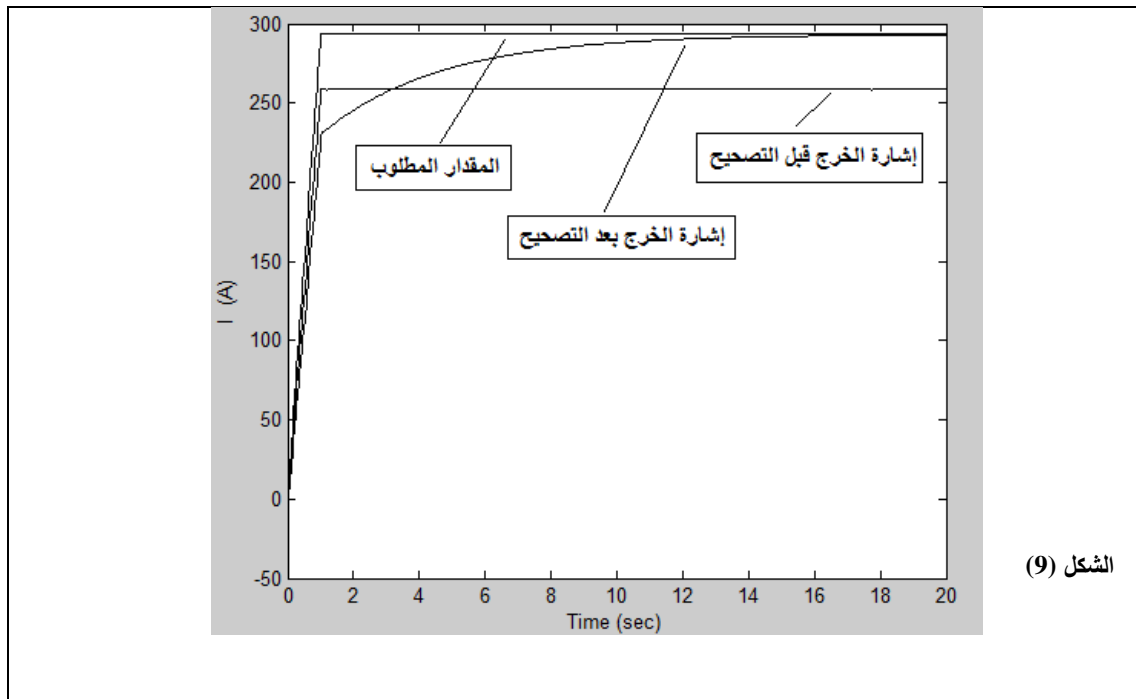
ملاحظة: البرنامج صالح من أجل معطيات نظام آخر.

الشكل (8): يبين قيمة الخطأ الديناميكي و الستاتيكي قبل التصحيح وبعده.



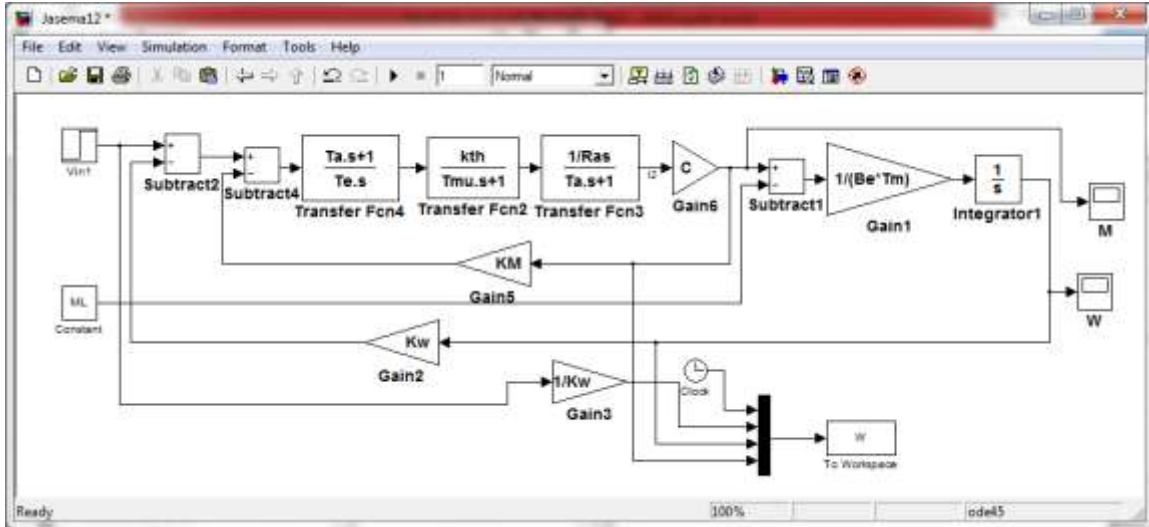
الشكل (8): a- الخطأ الديناميكي, b- الحالة العابرة للتيار, إشارة الدخل قفزه واحدة

يبين الشكل (9) الاستجابة الزمنية للتيار بعد التحكم بتغير إشارة الدخل لتحديد تسارع الحالة العابرة.



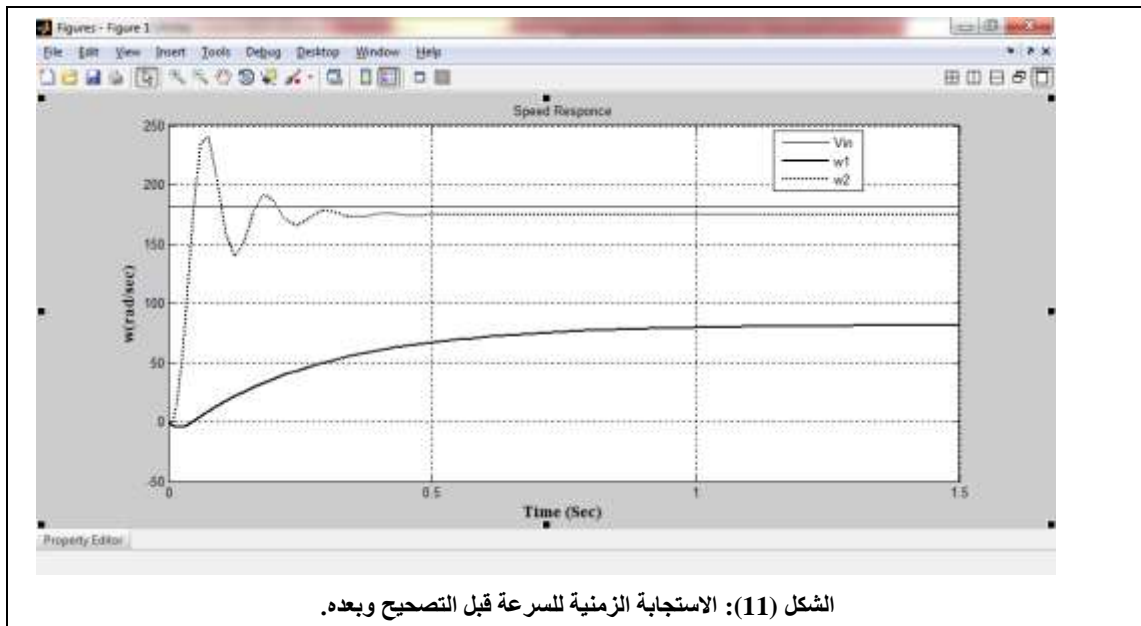
الشكل (9)

يبين الشكل (10) نموذج النظام بعد تنظيم السرعة.



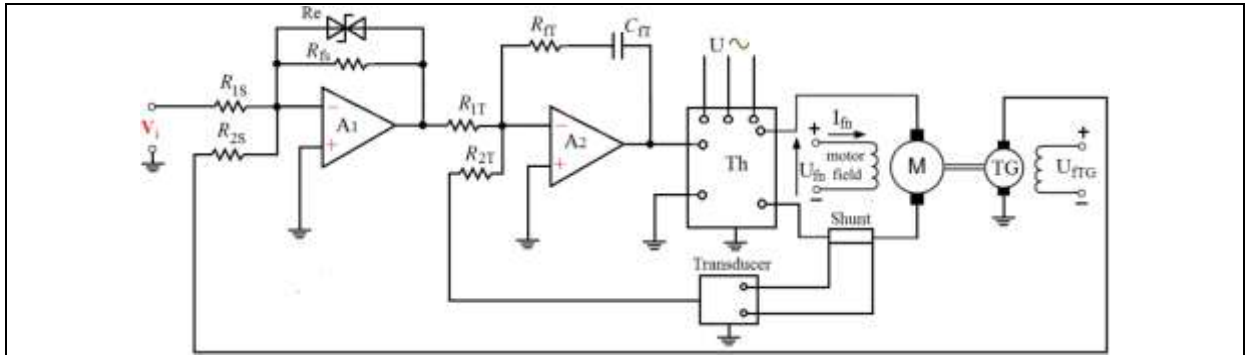
الشكل (10): نموذج النظام يبين تنظيم السرعة.

يبين الشكل (11) الاستجابة الزمنية قبل إضافة منظم حلقة السرعة, حيث تظهر إشارة الخطأ كبيرة في عملية التحكم.

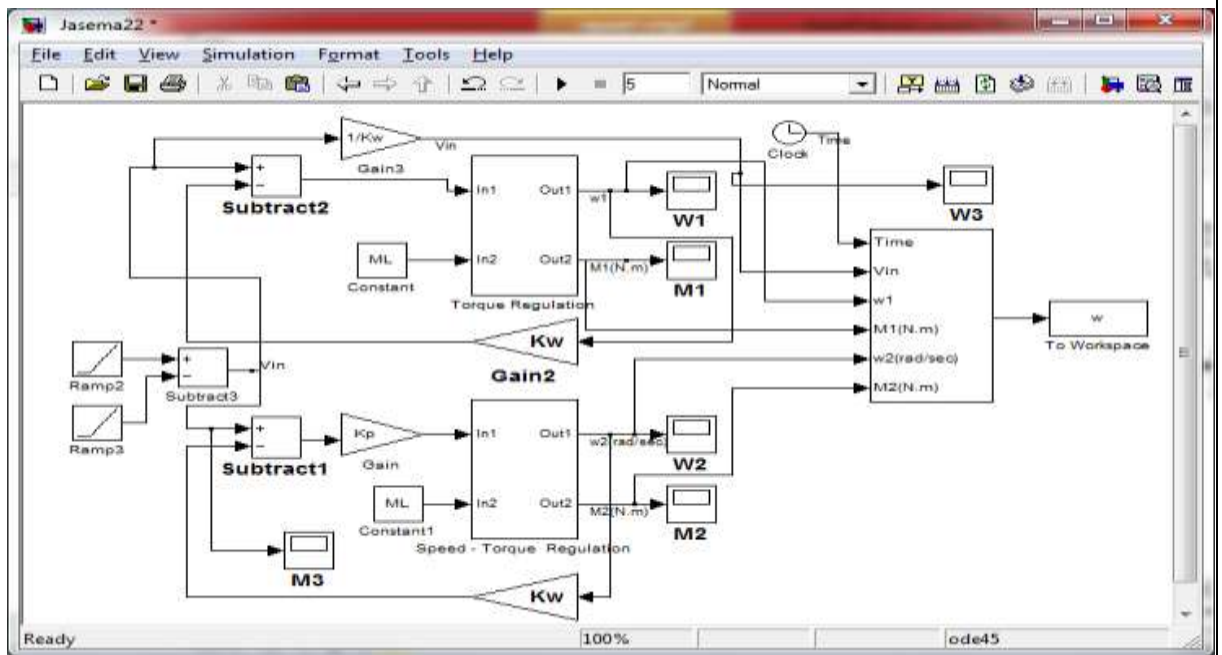


الشكل (11): الاستجابة الزمنية للسرعة قبل التصحيح وبعده.

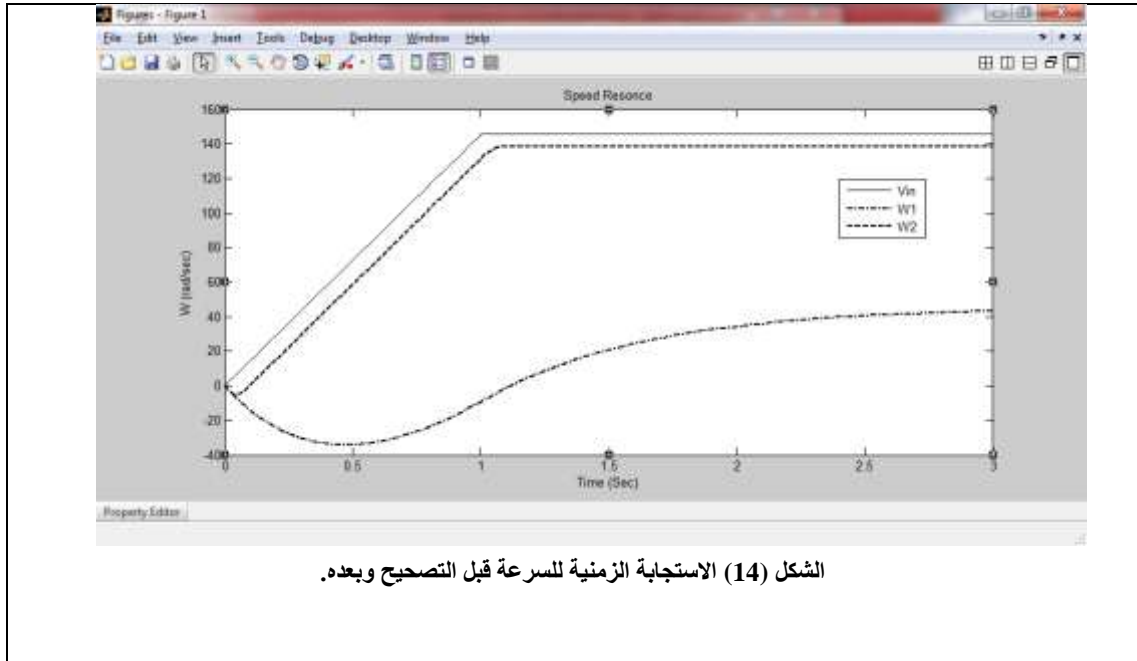
من الشكل (11) نلاحظ Vin المقدار المطلوب, W1 الاستجابة قبل التصحيح, W2 الاستجابة بعد التصحيح.



الشكل (12): دائرة النظام مع إضافة منظمي العزم والسرعة.



الشكل (13): النموذج وفق MatLab, لتنظيم حلقتي التيار والعزم قبل وبعد التصحيح.



الاستنتاجات والتوصيات: الاستنتاجات:

- 1- تم في هذا البحث توضيح كيف يستخدم Matlab لتصميم منظم تسلسلي يحقق دلائل الجودة المرغوبة اعتمادا على المميزات الترددية للغارتمية المرغوبة.
 - 2- وضع نموذج للنظام باستخدام Simulink and Matlab.
 - 3- وضع برنامج حاسوبي لحساب بارامترات النظام وحساب الخطأ الستاتيكي.
 - 4- بينت النتائج أن إضافة منظم تسلسلي مصمم وفق الطريقة المقترحة لتنظيم العزم أدى إلى تخفيض الخطأ الستاتيكي من 20% إلى صفر بالمئة دون التأثير على زمن سرعة الاستجابة الزمنية ودون وجود اهتزازات في الحالة العابرة.
 - 5- إضافة منظم تسلسلي لتنظيم السرعة مصمم وفق الطريقة المقترحة أدى إلى تخفيض الخطأ الستاتيكي في السرعة من 55% إلى 3.6% وإلى إلغاء الخطأ الديناميكي و المحافظة على سرعة استجابة النظام.
- التوصيات:

- 1- نوصي باستخدام التصحيح التسلسلي في نظم التحكم والقيادة الآلية وذلك لسهولة تنفيذه وبساطة تركيبه.
- 2- نوصي بوضع نماذج حاسوبية لدراسة أداء نظم التحكم الآلي قبل البدء بتنفيذها وذلك للتأكد أن النظام يؤدي وظيفته بشكل جيد وفق الشروط المطلوبة.

المراجع:

- 1- Ashish Tewari, *Modern Control Design With Matlab and Simulink* , England 2002, 503
- 2- A. T. Johns, D.F,Warne, *The Control Techniques Drives and Controls Handbook*. UK, 2001.374
- 3- I.Stefani, T.Raymond, *Design of Feedback Control Systems*, New York,2002, 848.
- 4- Michael A., Mohammad, H.: *PID Control, New Identification and Design Methods* 2006.
- 5- Isaac, A., Victor, S.: *Mathematical Modeling and Computer Simulation of a Separately Excited dc Motor with Independent Armature/field control*. In *proc. IEEE. Ind. Electron., vol. 37*.2002 *IEEE*.
- 6- V. E. KLOCOF, *Teoria elctroprivad* Moskow 1985. 560 p.
- 7- SHINIANSKY, A,V. *spravisHnik bo Aftamatizirovano Electroprivda*. MOSCO, 1983. 616.