

## التحكم الصلد بنظم التحكم بالموضع باستخدام مراقب الحالة

الدكتور محسن داود\*

(تاريخ الإيداع 25 / 3 / 2009. قُبل للنشر في 31/5/2009)

### □ الملخص □

إن تصميماً متحكماً صلداً مناسباً للتشويش على محور المحرك هي قضية مهمة. أظهرت طريقة فراغ الحالة إنها طريقة التحكم الفعالة لحل تلك المسألة باستخدام مراقب الحالة مع النظم ذات المرتبة الأقل من الخامسة. لقد تم وضع الأساس النظري والتطبيق العملي لاستخدام طريقة فراغ الحالة في تحليل أنظمة التحكم بالموضع وتصميمها عبر استخدام مراقب الحالة.

تم عرض طريقة حساب كل من نموذج الحالة لمحرك التيار المستمر المتصل مع الحمولة الميكانيكية عبر وصلة نابضية مرنة (لتصحيح الفرق بين موضعي محور المحرك والحمولة) ونموذج حساب مراقب الحالة لنظام التحكم بالموضع. وتمت دراسة صلادة التحكم بالنظام للتشويش عندما تتغير بارامترات الحمولة (عزوم العطالة والاحتكاك) وعناصر الدارة المكافئة لمحرك التيار المستمر مع الزمن بواسطة نموذج محاكاة نظم التحكم بالموضع باستخدام Matlab/simulink package.

يمكن تحديد بارامترات متحكمات نظم التحكم بالموضع بواسطة نموذج المحاكاة قبل تنفيذ النظام بالشكل الأساسي مما يؤدي إلى اختصار كبير للوقت.

الكلمات المفتاحية: التحكم الصلد، نظم التحكم بالموضع، مراقب الحالة.

\* أستاذ مساعد - قسم هندسة الميكاترونك - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

## Robust Control of Position Systems by State Observer

Dr. Mohsen Daoud\*

(Received 25 / 3 / 2009. Accepted 31 / 5 / 2009)

### □ ABSTRACT □

Design of a controller sufficiently robust to the disturbances on the motor shaft is an important problem. The state space method is shown to be an efficient control technique to solve this problem by use the state observer with systems less than 5-th order. The theoretical base and practical applications of state observer method in design and analyze of position control systems is presented.

The method of calculation of the motor with flexible load model and the state observer of position control system is presented. After that, the investigation of robustness of system control was performed when the values of parameters change with time or various effects by Matlab simulation package model.

The simulation model is used to determine position control system controller parameters before system implementation and save a lot of time.

**Key words:** Robust control, position control systems, state observer.

---

\* Associate Professor , Mechatronics Engineering Department, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

**مقدمة:**

إن إحدى المشاكل الرئيسية في النماذج الرياضية للنظم الفيزيائية هي أن البارامترات المستخدمة في تلك النماذج يمكن أن لا تتحدد بدقة وهذا يعود إلى عوامل مختلفة متعددة، حيث إن قيم البارامترات يمكن أن تتغير مع الزمن أو بتأثيرات مختلفة.

يدعى الفرق بين النظام الفعلي ونموذج الحساب للنظام بالالتباس Uncertainty، حيث إنه أثناء التشغيل أو عندما تتغير إشارة الدخل بشكل كبير يمكن أن تتغير بارامترات النظام الفعلي. في هذه الحالة لا يعود النموذج الخطي يمثل النظام الفعلي مما يسبب ظهور مشاكل عملية (فقدان الاستقرار مثلا...)، لذلك نحتاج إلى التحكم الصلد Robust control لإعادة التوازن لهذا النوع من الأنظمة في مجال محدد لتغير بارامترات موضوع التحكم control . plant

تعطى البارامترات الكهربائية لمحرك التيار المستمر  $R_{A/LA}$  بدقة حتى 10% من قبل المصنعين، ويمكن أن تتغير الثوابت الميكانيكية للمحرك (عزوم العطالة ومعاملات الاحتكاك للمحرك والحمولة) أكبر بكثير من شروط التشغيل لموضوع التحكم (محرك التيار المستمر تحت الحمولة) [1].

إن تعدد المتغيرات وتنوعها قيد التحكم في نظم التحكم بالموضع الحديثة يجعل الطرق التقليدية في التحليل والتصميم غير مناسبة للاستخدام [2]، [3]. هنا لا بد من استخدام طريقة فراغ الحالة، التي تتيح التحليل في المستوي الزمني لنظم التحكم متعددة المداخل والمخارج وأنظمة التحكم غير الخطية أو المتغيرة مع الزمن وهي مناسبة أيضا في تحليل وتصميم أنظمة التحكم الرقمي والمتحكمات الحديثة البديلة (مراقبات ومتحكمات الحالة المختلفة) .

على أية حال، فإنه وبهدف التحكم بالمحرك نستخدم معلومات عن الحالات الديناميكية المختلفة والخرج وذلك عبر القياس والتغذية العكسية. يكون ذلك في غالبية الأحيان غير ممكن أو مناسب في النظم الحقيقية. والحل هنا يكمن في استخدام مراقب الحالة، الذي يعطي الدخل إلى المضخم ويأخذ الخرج من المشفر وينتج تقديرا للحالات، التي تستخدم في مرحلة لاحقة من قبل المتحكم.

**أهمية البحث وأهدافه:**

الهدف من البحث هو الحصول على نظام تحكم بالموضع يلغي آثار التشويش المسببة من تغيرات الحمولة ويكون صلدا في التحكم بتغيرات بارامترات موضوع التحكم. ويهدف البحث أيضا لوضع نموذج محاكاة لنظام التحكم بالموضع يتيح إجراء التحليل والتصميم لتلك النظم قبل تحقيقها بشكل طبيعي الأمر الذي يؤدي إلى الاختصار الكبير في الوقت والجهد لمهندس نظم التحكم.

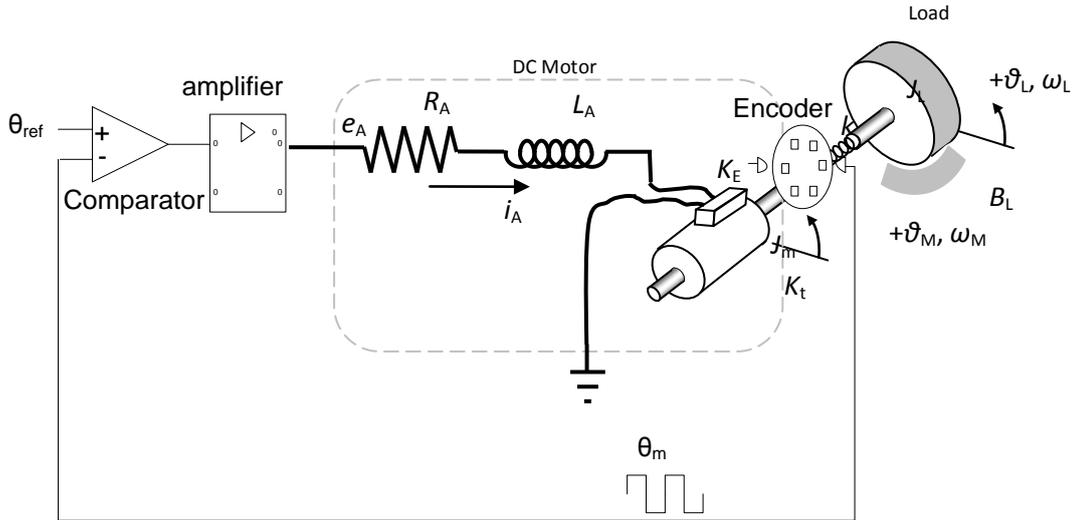
**طرائق البحث ومواده:**

تم إنجاز البحث بالاعتماد على وضع النماذج الرياضية لعناصر نظام التحكم بالموضع واستخدام طريقة فراغ الحالة في دراسة تحليل أنظمة التحكم الحديثة (متعددة المداخل والمخارج) واستخدمت أيضا طريقة محاكاة تلك النظم بواسطة Matlab simulink /Package للحصول على الاستجابة الزمنية عند شروط تشغيل مختلفة.

## النتائج والمناقشة:

### 1 نظم التحكم بالموضع

يمثل الشكل (1) نظام تحكم بالموضع يتألف من محرك تيار مستمر يتم التحكم به عن طريق دائرة المتحرض وهو يدبر حملا ميكانيكيا مع وصلة مرنة بين محور المحرك ومحور الحمولة. يتم تغذية إشارة الموضع عكسيا عن طريق استخدام مشفر ضوئي، يقارن خرجة  $\theta_m$  مع إشارة الدخل المرجعية للموضع  $\theta_{ref}$  وتغذى إشارة الفرق (الخطأ) إلى مضخم يغذي متحرض المحرك.



الشكل (1) نظام تحكم بالموضع

### 2 النموذج الرياضي للمحرك مع الحمولة في فراغ الحالة.

يمثل الشكل (2) محرك التيار المستمر مع الحمولة والمتصلين بواسطة وصلة مرنة ثابت مرونتها  $k_s$ ، وثوابت المحرك هي ( $R_A$  ( $\Omega$ ) - مقاومة دائرة المتحرض و  $L_A$  (Henry) تحريضية المحرك،  $-K_E$  (V.sec/rad) ثابت القوة المحركة الكهربائية العكسية،  $K_t$  (Nm/A) - ثابت العزم للمحرك،  $J_m$  (Kg.m<sup>2</sup>) - عزم العطالة للمحرك،  $-b_m$  - التخماد الميكانيكي). أما ثوابت الحمولة فهي ( $J_L$  (Kg.m<sup>2</sup>) - عزم العطالة للحمولة،  $-b_L$  - تخماد الحمولة،  $b$  - التخماد المرن)

إن المعادلات التفاضلية المعبرة عن ديناميكية المحرك/الحمولة هي:

- تكون معادلة دائرة المتحرض كما يلي:

$$L_A \frac{di_A}{dt} + R_A i_A + K_E \frac{d\theta_M}{dt} = v_{in}$$

- يكون النموذج الرياضي الميكانيكي للمحرك كما يلي:

$$K_t \cdot i_A - (b_m + b) \omega_m - k_s (\theta_m - \theta_L) - b \cdot \omega_L = J_m \cdot \frac{d\omega_m}{dt}$$

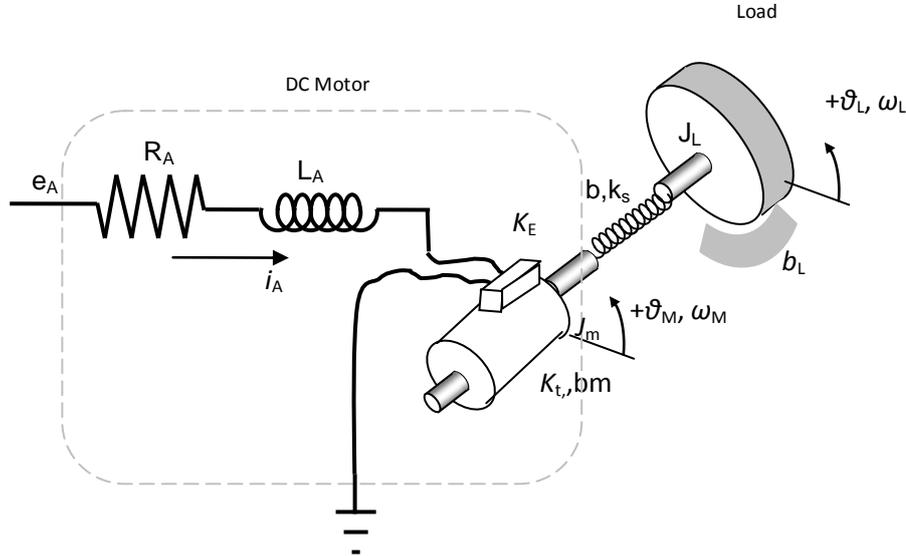
- يكون النموذج الرياضي الميكانيكي للحمولة كما يلي:

$$- (b_L + b) \omega_L + k_s (\theta_m - \theta_L) + b \cdot \omega_m = J_L \cdot \frac{d\omega_L}{dt}$$

ولدينا

$$\omega_m = \frac{d\theta_m}{dt}$$

$$\omega_L = \frac{d\theta_L}{dt}$$



الشكل (2) محرك التيار المستمر مع الحمولة بوصلة مرنة.

نختار متغيرات الحالة للنظام على الشكل التالي كما هو مبين بالشكل (3):

$$X = \begin{bmatrix} i_A \\ \omega_m \\ \theta_m \\ \omega_L \\ \theta_L \end{bmatrix}$$

حيث:

- $i_A$  تيار المتحرض.
- $\omega_m$  السرعة الزاوية للمحرك.
- $\theta_m$  الانزياح الزاوي للمحرك (الموضع).
- $\omega_L$  السرعة الزاوية للحمولة.
- $\theta_L$  الانزياح الزاوي للحمولة.

بالأخذ بعين الاعتبار الشكل العام لمعادلات الحالة، الذي يكون كما يلي:

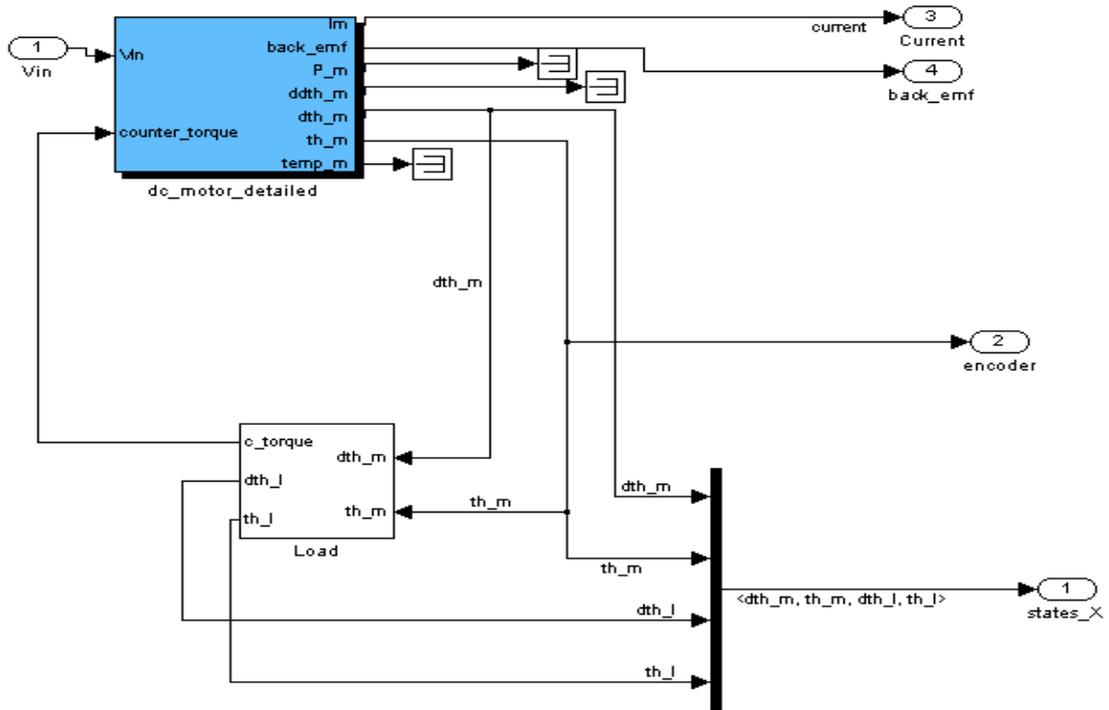
$$\dot{X} = AX + BU$$

$$Y = CX + DU$$

فإنه يمكننا أن نمثل محرك التيار المستمر مع الحمولة في فراغ الحالة بالشكل:

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_A \\ \dot{\omega}_m \\ \dot{\theta}_m \\ \dot{\omega}_L \\ \dot{\theta}_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_A/L_A & -K_E/L_A & 0 & 0 & 0 \\ K_t/J_m & -(b_m+b)/J_m & -k_s/J_m & b/J_m & k_s/J_m \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & b/J_L & k_s/J_L & -(b_L+b)/J_L & -k_s/J_L \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ \omega_m \\ \theta_m \\ \omega_L \\ \theta_L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1/L_A \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot v_{in}$$

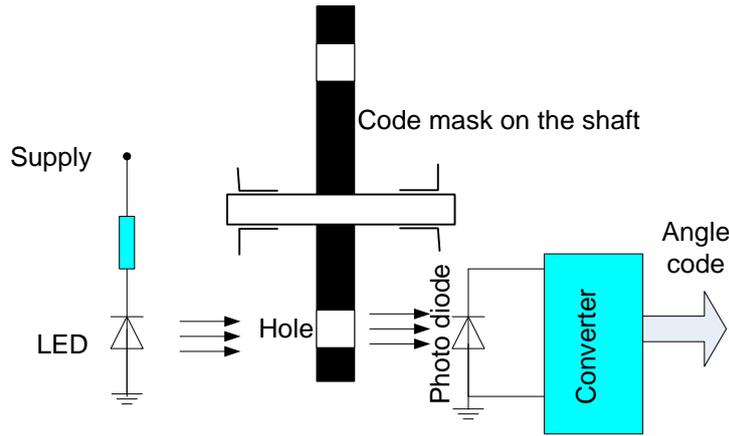
$$Y = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ \omega_m \\ \theta_m \\ \omega_L \\ \theta_L \end{bmatrix}$$



الشكل (3) نموذج حساب محرك التيار المستمر مع الحمولة بوصلة مرنة.

### 3 المشفرات الضوئية.

تستخدم المشفرات على نطاق واسع كحساسات موضع في نظم التحكم بالروبوت والحركة وهناك نوعان منها، المطلقة والتزايدية وكل واحد منها يضم ثلاثة عناصر (مرسل ضوئي، قرص تشفير، مستقبل ضوئي) والشكل (4) يبين بنية المشفر الضوئي. يختلف نوعا المشفر عن بعضهما البعض من حيث بنية قرص التشفير وكيفية تعرف النظام على إشارة الخرج [4].



الشكل (4) المشفر الضوئي.

تولد المشفرات التزايدية إشارة تزيد أو تنقص القيمة المقاسة بخطوات تزايدية. أما المشفرات المطلقة فتولد شيفرة تشير مباشرة إلى الموضع المطلق. تتميز المشفرات بأنها تمتلك خرجاً رقمياً عبارة عن سلسلة نبضات بتردد لا يتأثر بإشارات التشويش (الحرارة، التخامد) كما في الحساسات التشابيهية.

#### 4 مراقب الحالة لنظم التحكم بالموضع.

يعتمد بناء المراقب لحالة موضوع التحكم (محرك تيار مستمر + الحمولة) على قياس متغيرات الخرج والدخل لهذا الموضوع وذلك بهدف توليد أو تقدير متغيرات الحالة الخاصة به [5],[6].

إن موضوع التحكم المعطى بمعادلات الحالة

$$\dot{X} = AX + BU$$

$$Y = CX$$

يجب أن يكون محققاً للمراقبية حتى يمكن تحديد متغيرات الحالة بطريقة غير مباشرة من الخرج والدخل.

سنرمز لشعاع الحالة المقدر بالرمز  $\hat{X}$  ونبنى نموذج للمراقب معادلته:

$$\dot{\hat{X}} = A\hat{X} + BU$$

إن اختلاف بارامترات الحالة المقدر عن الفعلية الناجم عن الخطأ في تصميم مراقب الحالة والتشويش وكذلك اختلاف قيم متغيرات الحالة الأولية. لتصحيح الخطأ الناتج في متغيرات الحالة المقدر تتم مقارنة الخرج الفعلي مع

الخرج المقدر  $\hat{Y}$

$$\hat{Y}(t) = C\hat{X}(t)$$

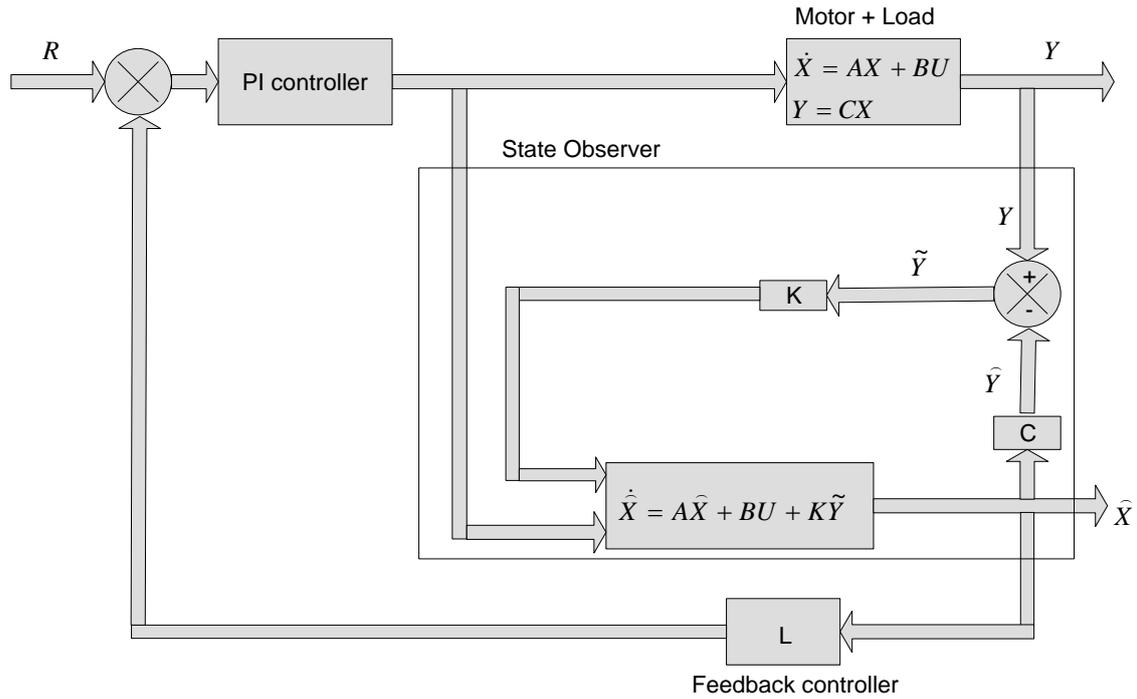
ثم نغذي الفرق في الخرج:

$$\tilde{Y} = Y(t) - \hat{Y}(t)$$

إلى المراقب كما هو مبين بالشكل (5) ، وتكون معادلة المراقب عندئذ بعد إدخال الخطأ في الخرج بالشكل:

$$\dot{\hat{X}} = A\hat{X} + BU + K\tilde{Y}$$

$$= (A - K.C)\hat{X} + BU + K.Y$$



الشكل(5) مراقب الحالة لنظام تحكم بالموضع.

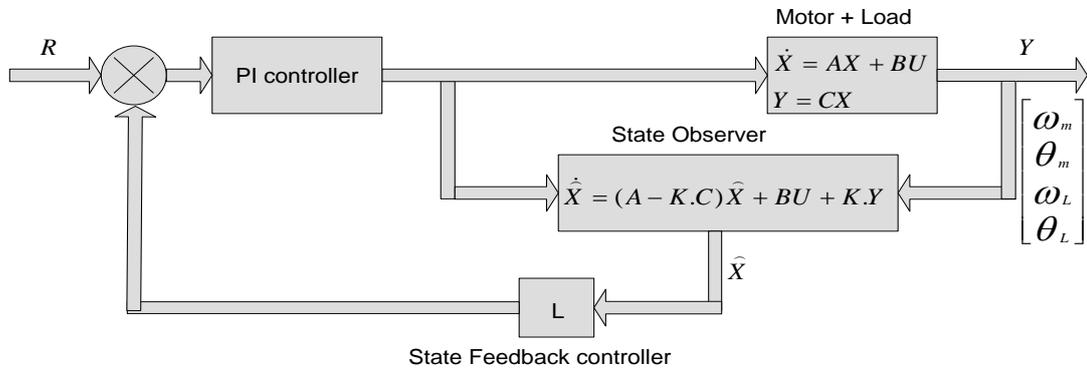
ويتم اختيار المصفوفة  $K$  بحيث تكون القيم المميزة للمصفوفة  $(A-K.C)$  متوضعة في الأماكن المرغوب بها في المستوي العقدي، أو بعبارة أخرى تكون أقطاب المراقب في مواقع مرغوب بها لضمان تلاشي الخطأ بين متغيرات الحالة الفعلية ومتغيرات الحالة المقدرة  $\tilde{X}$ :

$$\tilde{X} = X - \hat{X}$$

$$\therefore \dot{\tilde{X}} = \dot{X} - \dot{\hat{X}} = AX + BU - A\hat{X} - BU + K\tilde{Y}$$

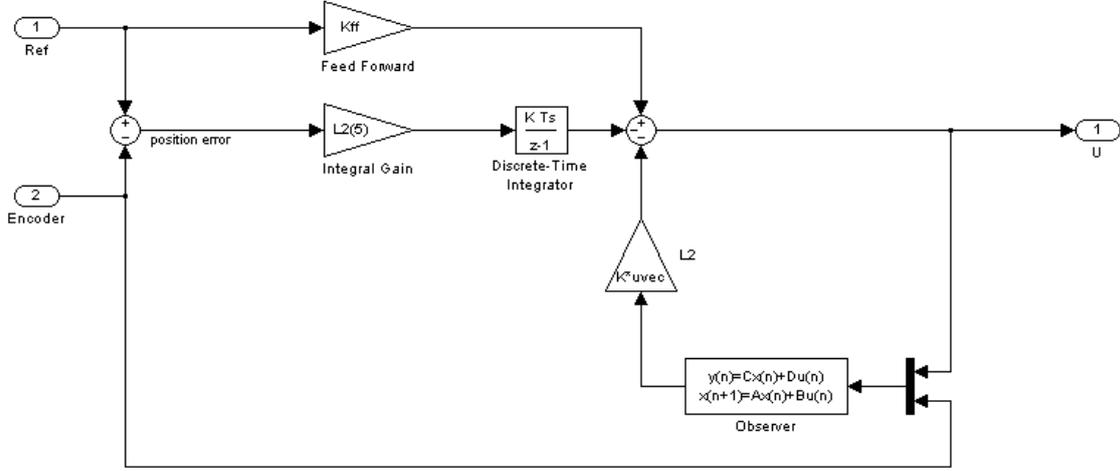
$$= AX - A\hat{X} + K.C.X + K.C.\hat{X} = (A - K.C)\tilde{X}$$

مما سبق نستنتج أن المصفوفة  $(A-K.C)$  هي المتحكم في تغير الخطأ ولذلك يتم اختبار المصفوفة  $K$  على أساس توزيع الأقطاب (Pole placement) في مواقع ملائمة في المستوي العقدي ويمكن تمثيل المراقب لنظام التحكم بالموضع بالمخطط الصندوقي الوارد على الشكل (6)



الشكل(6) مراقب الحالة لنظام تحكم بالموضع.

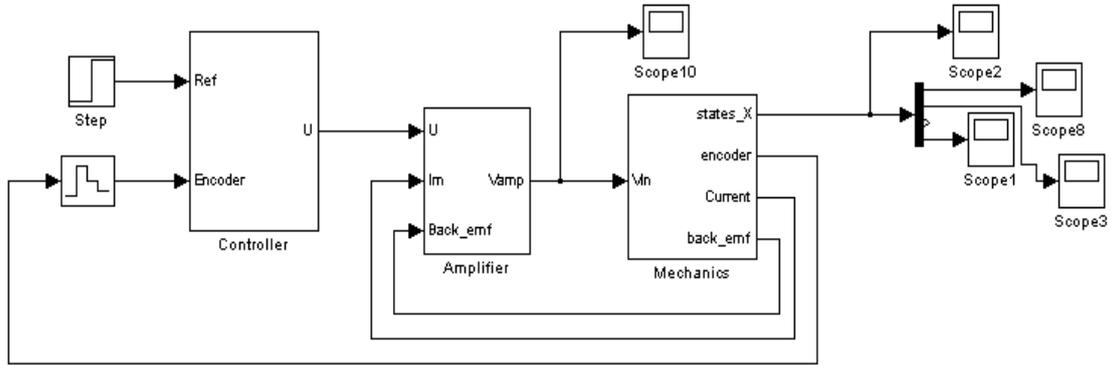
من أجل جعل المراقب يعمل جيداً مع المتحكم (وفقاً للاستجابة السريعة المطلوبة لآليات السيرفو) فإن أقطابه يجب أن تتوضع قريبة أكثر إلى مركز الإحداثيات وعلى النصف الأيسر للمحور الحقيقي في المستوي العقدي.



الشكل (7) نموذج المحاكاة للمراقب والمتحكم PI.

### نتائج النمذجة والمحاكاة:

يمكن استخدام Matlab simulink/ package [8] لتنفيذ المحاكاة لنموذج نظام التحكم بالموضع بعناصره المختلفة ابتداءً بموضوع التحكم (المحرك والحمولة) مروراً بالمضخمات والمشفرات والمتحكم التناسبي التكاملي PI وانتهاءً بمراقب الحالة، حيث يبين الشكل (6) نموذج المحاكاة السابق .



الشكل (8) نموذج المحاكاة لنظام تحكم بالموضع.

سنتمكن بمساعدة نموذج المحاكاة السابق من رصد تغيرات الاستجابة الزمنية (تغير الموضع والسرعة) عند تغيير الدخل المرجع من جهة وعند تغيير بارامترات المحرك (الخطأ في عناصر الدارة المكافئة) وتغيير بارامترات الحمل (عزوم العطالة ومعاملات الاحتكاك والتخامد).

إن بارامترات نموذج الحساب [7] واردة في الجداول التالية:

الجدول (1) بارامترات محرك التيار المستمر

Maxon Re25 10 watt dc motor					
$R_A(\Omega)$	$L_A(H)$	$K_b(V.sec/rad)$	$K_t(Nm/A)$	$J_m(kg.m^2)$	$b_m$
2.06	0.000238	0.0235	0.0235	1.07 e-6	12e-7

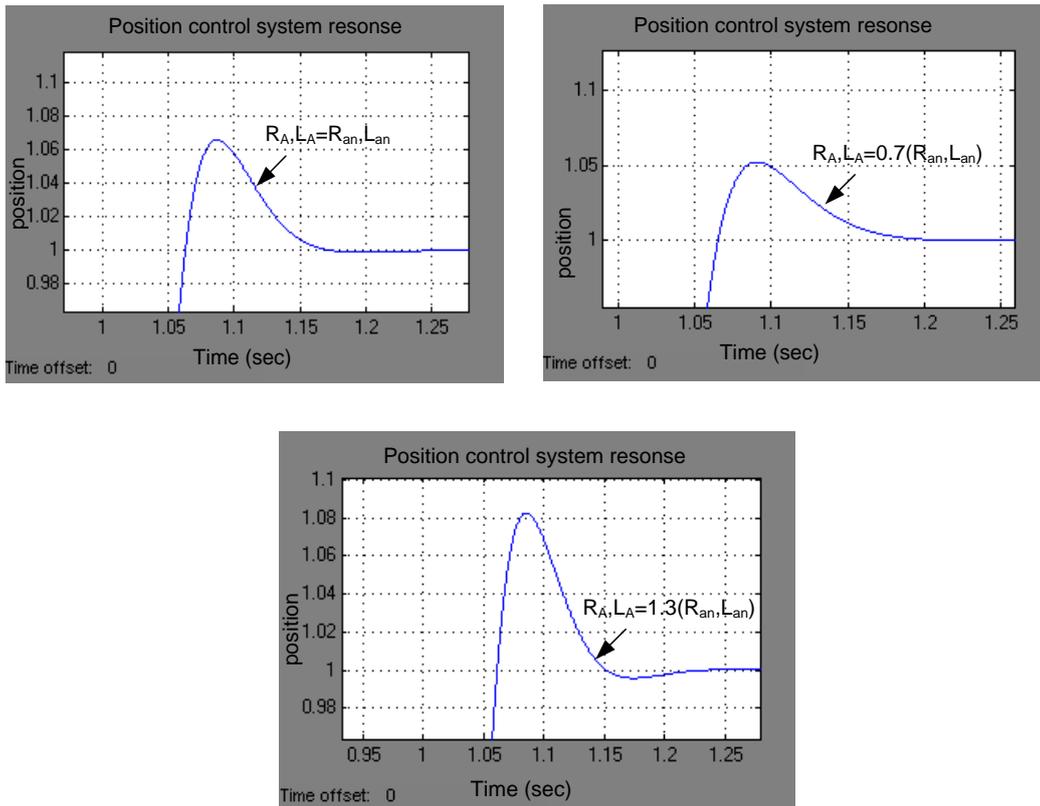
الجدول (2) بارامترات الحمولة

$J_L$	$b_L$	$K_s$	$b$
10.07e-6	12e-6	100	0.0001

الجدول (3) مواقع أقطاب الحلقة المغلقة المرغوبة

$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_4$
-0.3	-0.33	-0.35	-0.37

سندرس أولاً تأثير تغيير عناصر الدارة المكافئة لمحرك التيار المستمر على مميزات الاستجابة الزمنية لنظم التحكم بالموضع ( زمن الصعود  $t_r$  ، زمن التخاذم  $t_s$  ، تجاوز الهدف الأعظمي (Maximum overshoot) عندما تتغير تلك العناصر في المجال (0.7-1.3) من قيمها الاسمية، حيث يظهر ذلك بوضوح على الشكل (8).



الشكل (8) استجابة نظم التحكم بالموضع عند تغيير بارامترات الدارة المكافئة لمحرك التيار المستمر.

يمكن من الشكل (8) أن نحصل على قيم مميزات الاستجابة الزمنية لنظم التحكم بالموضع في ظروف عدم الدقة في تحديد عناصر الدارة المكافئة كما في الجدول (4).

الجدول (4) تأثير تغير عناصر الدارة المكافئة للمحرك على الاستجابة الزمنية لنظم التحكم بالموضع

قيم عناصر الدارة المكافئة	Overshoot	Time settling (sec)	Time rise (sec)
$0.7(R_{an}, L_{An})$	1.052	1.2	1.063
$(R_{an}, L_{An})$	1.066	1.17	1.063
$1.3(R_{an}, L_{An})$	1.082	1.15	1.063

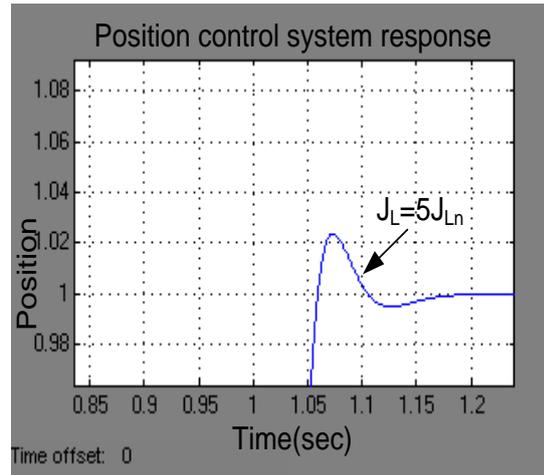
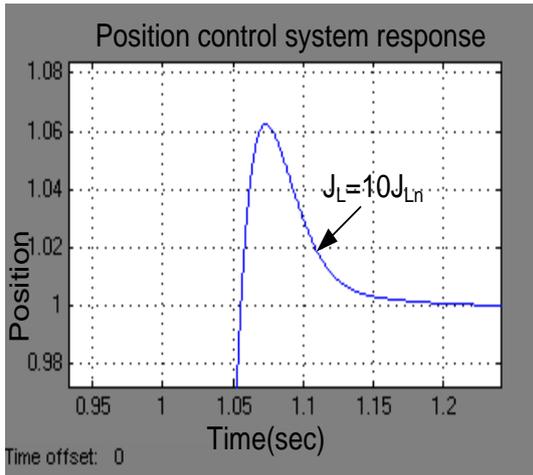
يتبين من الجدول (4) أن التغير في مميزات الاستجابة الزمنية لنظم التحكم بالموضع عند الارتياح في تقدير عناصر الدارة المكافئة للمحرك بمقدار  $\pm 30\%$  صغيراً جداً ويبقى ضمن الحدود المسموحة.

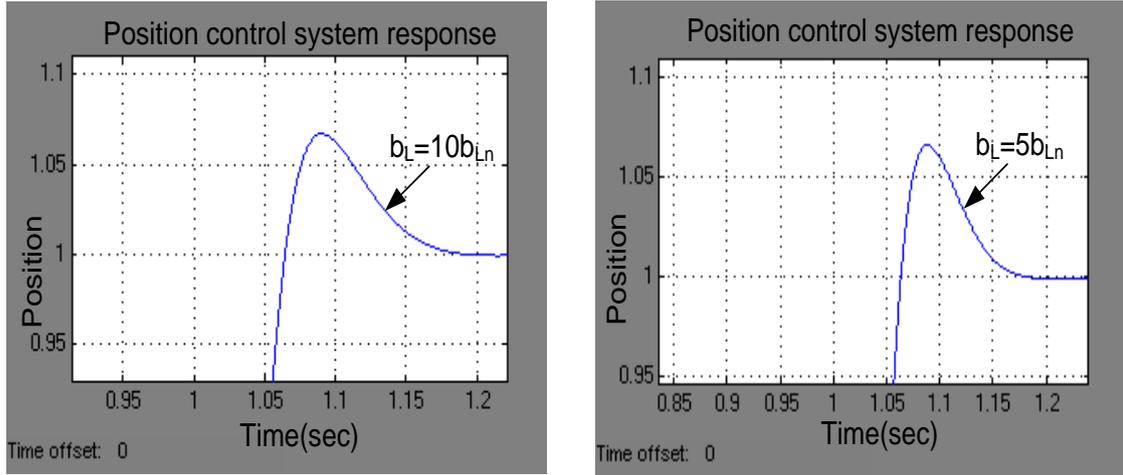
وفي المرحلة الثانية ندرس تأثير تغير بارامترات الحمولة (عزوم العطالة والاحتكاك للمحرك والحمولة) على مميزات الاستجابة الزمنية ، حيث أتت النتائج كما هو مبين بالشكل (9) والجدول (5).

الجدول (5) تأثير تغير ثوابت الحمولة على الاستجابة الزمنية لنظم التحكم بالموضع.

قيم ثوابت الحمولة	Overshoot	Time settling (sec)	Time rise (sec)
$bL=b_{Ln}, J_L=J_{Ln}$	1.066	1.17	1.063
$J_L=5xJ_{Ln}$	1.023	1.21	1.06
$J_L=10xJ_{Ln}$	1.062	1.26	1.055
$bL=5xb_{Ln}$	1.066	1.17	1.063
$bL=10xb_{Ln}$	1.066	1.17	1.063

يلاحظ من الجدول (5) التغير الطفيف لمميزات الاستجابة الزمنية لنظم التحكم بالموضع عند التغير في بارامترات الحمولة بدرجة كبيرة عن القيم الاسمية لتلك البارامترات.

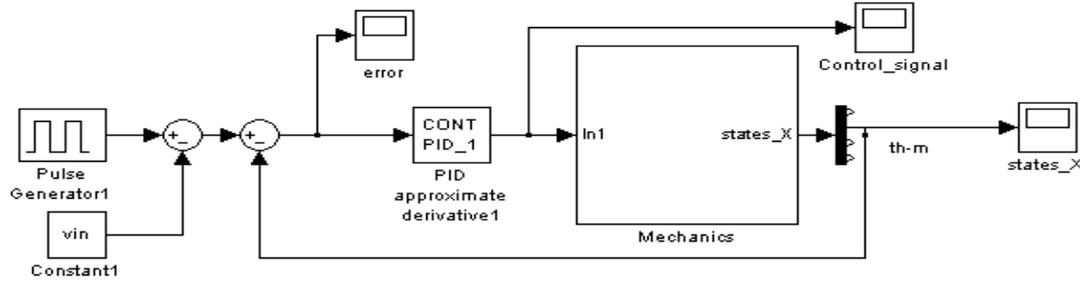




الشكل (9) استجابة نظم التحكم بالموضع عند تغير بارامترات الحمولة لمحرك التيار المستمر.

### التحكم باستخدام متحكمات الـ PID

إن التحكم بمحرك التيار المستمر مع الحمولة باستخدام متحكمات الـ PID يتم وفقاً لمخطط المحاكاة الوارد على الشكل (10)، حيث إنه عند بناء هذا المخطط وضبط بارامترات النظام من الضروري مراعاة حالة عدم تجاوز إشارة التحكم (خرج المتحكم) للحدود التي يسمح بها المضمخ وذلك لتجنب حالة إشباع المتحكم.



الشكل (10) نموذج المحاكاة للتحكم بمحرك التيار المستمر مع الحمولة.

في الكثير من الحالات من غير المرغوب اشتقاق إشارة الدخل المرجعي لأنها قد تكون دالة خطوة ثابتة وهذا قد يعطي نتائج سيئة عند الاشتقاق. ومن ناحية أخرى نحتاج في كثير من الحالات للتحكم بأكثر من متغير في النظام في الوقت نفسه وهذا ما لا يمكن لمتحكمات الـ PID من تحقيقه بخلاف متحكمات فراغ الحالة لنظم التحكم بالموضع.

### الاستنتاجات والتوصيات:

- إن نظرية فراغ الحالة عبر توزيع الأقطاب فعالة في الحصول على الأداء المرغوب لنظم التحكم بالموضع في ظروف التشويش المختلفة، حيث إنها لا تعطي الحلول الأمثلية لبعض النظم ذات المرتبة العالية مما يستلزم عندئذ استخدام متحكمات التحكم الأمثل (LQR).

- إن التحكم بالعمليات متعددة المتغيرات يجعل من الطرق التقليدية في التحكم (PID) غير فعالة ، حيث تكون مفيدة في التحكم بمتغير واحد فقط وفي هذه الحالة لا بد من استخدام الطرق الحديثة في التحكم (نظرية فراغ الحالة وطرق التحكم الأمثل).
- أظهرت المحاكاة فعالية كبيرة في تصميم نظم التحكم بالموضع وتحليلها حيث يمكننا تصميم متحكم ابتدائي والتأكد منه بالمحاكاة وبعدها إضافة التفاصيل للنموذج كالمراقب والتحقق ثانياً.
- أتاح استخدام المحاكاة إمكانية اختصار 90% من الوقت اللازم لتحقيق نظام التحكم بالموضع حيث إنه بدون المحاكاة نحتاج إلى تنفيذ النظام بشكل كامل مع المراقب دون التأكد من تحقيق بارامترات النظام.
- إن استخدام المراقب الذي يأخذ الدخل والخرج من موضوع التحكم الحقيقي بدلاً من قناة التغذية العكسية بالحالة يجعل النظام أكثر صلابة لأخطاء النمذجة وتشويش الحمولة الممكن على محور المحرك.

### المراجع:

- [1] ROHRS, C.E. MELSA, J.L. *Linear control systems*. McGraw-Hill, New York 1993, 332.
- [2] Chen, C.T. *Analog and digital control system design: transfer function, state space and algebraic methods* . Saunders college pub., New York , 1992,1013.
- [3] JAMES M. *Motion control theory needed in the implementation of practical robotic systems* . Master degree thesis, Blacksburg, Virginia, 2000 ,84.
- [4] SELEZNEVA, A. *Modeling and synthesis of tracking control for belt drive system*. Master degree thesis, Finland, 2007,80.
- [5] OGATA, K. *Modern control engineering*. Third edition. Prentice Hall, USA1997,836.
- [6] SKOGESTAD, P. *Multivariable feedback control* . Willy, 1997,428.
- [7] ROGER, A. *DC motor control*, Sweden, lund, 2006,17.
- [8] Matlab, Simulink Package, Toolboxes, control system Demos.

