

Design and simulation of nonlinear RC Servo Motor model to determine the precision field to work in space (Speed, Torque inertia, Friction).

Dr. Iyad Hatem*
Majd Shahin**

(Received 28 / 9 / 2016. Accepted 13 / 7 / 2017)

□ ABSTRACT □

Direct current radio control (DC RC) servo motors are affected by nonlinear factors in its internal structure, these factors are:

- The integrated gearbox's clearance, inertia torque
- The lost transmitted energy across it.
- The friction in DC Motor axis.
- The accuracy of controller and the effect of bang-bang control method.
- The dead angle that is allowed for garneted a stable work point.

These factors effect on DC RC servo motor output Characteristics in case of step pulse response and nonlinearity irregular motor angular output fixed angular speed (ramp).

In this research paper we designed a non-linear module taking into consideration the mentioned factors and we declare its output behavior in three cases of work (no-load, with various inertia torque load values, and with various friction factors load values).

We simulate the model in case of step impulse and various ramp values input to evaluate motor output accuracy according to required output and we conclude the acceptable Values of work areas of loads with various inertia torques, friction factors and angular speeds, for well-known using DC RC servo motor.

Keywords: RC servo motor, DC motor, Clearance, Non-liner model.

* Associate Professor; Department of Design & Production; Faculty of Mechanical & electrical Engineering; University of Tishreen, Lattakia, Syria.

** Master; Department of Mechatronics Engineering; Faculty of Mechanical & Electrical Engineering; University of Tishreen, Lattakia, Syria.

تصميم نموذج لاختي لمحرك سيرفو ذو مقاومة متغيرة ومحاكاته لتحديد مجال عمله بدقة في فضاء (سرعة، عزم عطالة، معامل احتكاك)

الدكتور إياد حاتم*

مجد شاهين**

(تاريخ الإيداع 28 / 9 / 2016. قُبل للنشر في 13 / 7 / 2017)

□ ملخص □

يتأثر أداء محركات السيرفو التي تعمل بالتيار المستمر ذات المقاومة المتغيرة (RC Servo Motor) بعوامل لاختية في بنيتها الداخلية والتي هي

- خلوصات أسنان علبه السرعة المدمجة وعزم عطالة مسنناتها.
- وضياح نقل الطاقة عبر علبه السرعة.
- الاحتكاك على محور المحرك.
- دقة المتحكم المستخدم استخدامه للتحكم من النمط فصل وصل (bang-bang).
- الزاوية الميتة المسموح بها لضمان عدم اضطراب المحرك.

يظهر تأثير هذه العوامل على خواص خرج المحرك في حالة النبضة الواحدية (step impulse) بالإضافة لعدم خطية وعدم انتظام حركة المحرك عند سرعات زاوية معينه (Ramp).

في هذا البحث قمنا بتصميم نموذج لاختي لمحرك سيرفو ذو مقاومة متغيرة مع مراعاة العوامل المؤثرة المذكورة مع توضيح سلوكه عند عمله في ثلاث حالات (بدون حمل، مع أحمال ذات عزوم عطالة مختلفة، مع أحمال ذات معاملات احتكاك متعددة)، حيث تمت عملية محاكاة لنموذج بنمطي النبضة الواحدية وسرعات ثابتة متعددة لتقييم دقة خرج المحرك نسبة للخرج المرغوب، استنتجنا مجالات العمل المقبولة للحمولة ذات عزم العطالة ومعامل الاحتكاك وسرعات العمل، وذلك من أجل محرك سيرفو ذو بارامترات معروفة.

الكلمات المفتاحية: محرك السيرفو ذو مقاومة متغيرة، محرك التيار المستمر، خلوصات، نموذج لاختي.

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

** ماجستير - قسم هندسة الميكاترونك - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

مقدمة:

يستخدم محرك السيرفو في مجال واسع من التطبيقات كالروبوتات و CNC حيث يسمح بالتحكم الدقيق بالموضع والسرعة والتسارع خطياً أو زاوياً.

إن محركات السيرفو ليست نوعاً مستقلاً من المحركات، بل هي تطبيق لنوع معين من المحركات ضمن حلقة تحكم مغلقة تتألف من محرك وعلبة سرعة وحساس موضع (مشفر ضوئي - مقاومة متغيرة) ومتحكم، حيث يعشق المحرك مع نوع من حساسات تغذية عكسية لضبط الموضع أو السرعة.

النوع الأبسط من محركات السيرفو يتحسس فقط للموضع ونمط تحكمه، (bang-bang) أي يعمل المحرك بكامل طاقته أو يتوقف عند الموضع المطلوب بدون تحكم في سرعة أو طاقة المحرك، هذا النمط غير مستخدم في الصناعة إلا أنه منتشر في التطبيقات البسيطة.

صمم العديد من النماذج لمحرك سيرفو ذو مقاومة متغيرة، R/C Servo Motor أشهرها نموذج خطي لا يراعي لاختية العناصر الداخلية المكونة للمحرك [1]، كما صمم نموذج لخطي لمحرك تيار مستمر يراعي تأثير المسفرات

وعزم الاحتكاك وفق كولومب فقط [2]. إن هذه النماذج تهمل العوامل التالية:

1. دراسة الاحتكاك الدوراني لمحرك التيار المستمر بشكل دقيق، وإهمال عزم احتكاك كولومب وتأثير سترايبك [3].
2. وجود عزم عطالة للمسننات وخلوصات في تعشيقاتها.
3. الاحتكاك في المسننات وانخفاض القدرة المنقولة عبرها.
4. وجود منطقة ميتة في عملية المقارنة يكون خلالها جهد التحكم بمحرك التيار المستمر مساوياً للصفر وتلعب هذه المنطقة الميتة دوراً هاماً في استقرار عمل المحرك.

أهمية البحث وأهدافه:

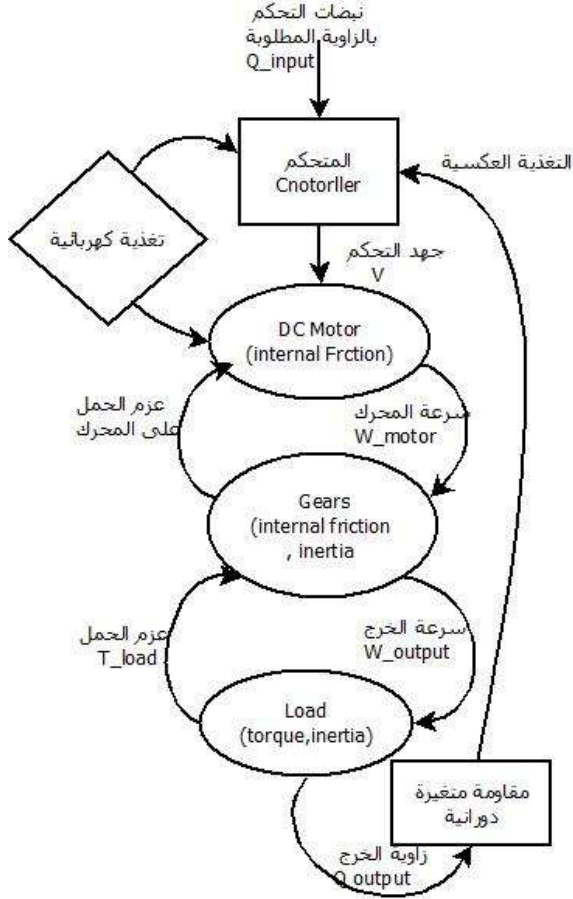
تستخدم محركات السيرفو العاملة بالتيار المستمر ذات المقاومة المتغيرة بشكل واسع في مجالات التحكم غير الصناعية كالروبوتات الصغيرة والمشاريع الهندسية الأكاديمية وتتميز هذه المحركات بخفة وزنها وبساطة استخدامها إلا أنها محدودة الدقة وقليلة الموثوقية، لذا وجب عمل دراسة مفصلة لاستنتاج نموذج يصف عملها بدقة من أجل تقييم دقة موضعها عند العمل تحت ظروف تشغيل مختلفة من وجهة نظر بارامترات الخرج (السرعة المطلوبة، عزم عطالة الحمل، وعزم الحمل).

طرائق البحث ومواده:

1. وصف مكونات محرك السيرفو وآلية عمله:

• إن محرك السيرفو المدروس من نوع (SG90 9 g)

Micro Servo الشكل (1) يشغل بمحرك تيار مستمر معشق مع علبه سرعة مخفضة للسرعة، ومقاومة متغيرة لتحديد الموضع عند تغير زاوية الخرج، يعطي المتحكم المدمج في نظام محرك السيرفو نبضات تشغيل volt $[-5, 0, 5]$ ، أي أن المحرك يعمل بنظام تشغيل اطفاء (bang-bang) كما هو مبين في المخطط الصندوقي في الشكل(2).



آلية عمل
محرك
السيرفو: يتم



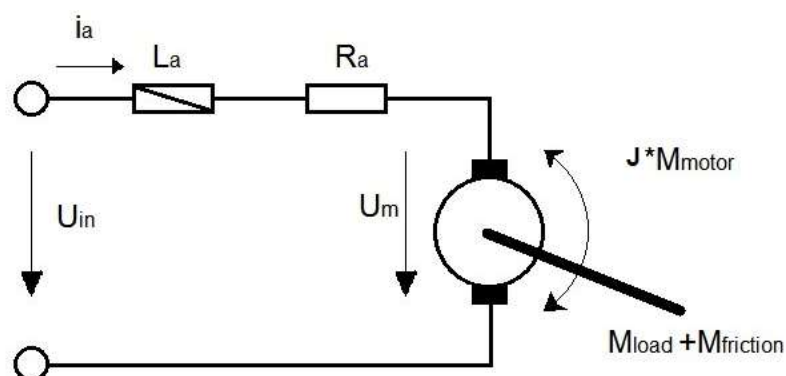
ارسال نبضات تحكم تحدد الزاوية المطلوبة إلى المتحكم فيقوم بمقارنتها بزاوية الخرج ويرسل جهد التحكم المناسب إلى الشكل (1) محرك سيرفو نوع (SG90 9 g Micro Servo) الشكل (2) نموذج المكونات والمتغيرات الداخلية في محرك السيرفو

المحرك الكهربائي الذي يتغلب على احتكاكه الداخلي ويقوم بتحريك مسننات علبه السرعة التي تنقل الحركة إلى الحمل بشكل مخفض للسرعة متغلبه على عزم الاحتكاك وعطالة المسننات وتنقل الحركة أخيرا إلى الحمل الذي يتميز بعزم وعطالة خاصين به، فتتم الحركة التي يقيس مقدارها مقاومة متغيرة موصولة بشكل مباشر إلى محور تحريك الحمل، فيبقى المتحكم على دراية بزاوية الخرج بصورة آنية.

2. النماذج الرياضية للمكونات الداخلية لمحرك السيرفو

2.1. النموذج الرياضي للمحرك الكهربائي

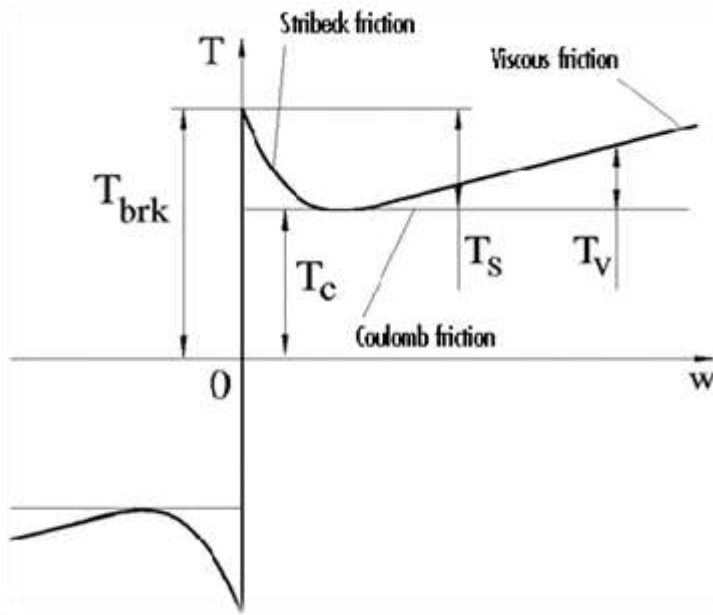
الدائرة المكافئة للمحرك التيار المستمر موضحة بالشكل(3)



تمت دراسة النموذج الرياضي للمحرك الكهربائي ذو التيار المستمر ووضع المعادلات الرياضية المحددة لسلوكه سابقا [1,4]

2.1.1. العلاقات المحددة لنموذج محرك التيار المستمر

$L_a * \frac{di_a}{dt} = U_a - i_a * R_a - K_e * w$ <p>حيث أن: L_a: ذاتية ملف المحرك، i_a التيار المار بملف المحرك، U_a جهد التشغيل (التحكم)، R_a مقاومة ملف المحرك، w سرعة دوران المحرك، K_e الثابت الكهربائي للمحرك، K_m الثابت الميكانيكي للمحرك.</p>	(1)
$J_{total} * \frac{dw}{dt} = K_m * i_a - M_{load} - M_{friction}$ <p>حيث أن: J_{total}: عزم عطالة جملة الأجزاء الدوارة (قلب المحرك + المسننات + الحمل)، K_m الثابت الميكانيكي للمحرك، M_{load} عزم الحمل، $M_{friction}$ عزم الاحتكاك على محور المحرك.</p>	(2)
<p>بالاستفادة من نموذج قوة الاحتكاك وفق The Coulomb, the viscous and the Stribeck model الموضحة في [5,6] يأخذ عزم الاحتكاك قيمتين تبعاً للشرط الموضح هنا:</p> $M_{friction} = \begin{cases} (T_c + (T_{brk} - T_c) * e^{-c_v w }) * sign(w) + f * w, & \text{if } M_i - M_{load} > T_{break} \\ M_i - M_{load}, & \text{otherwise} \end{cases}$	(3)
<p>حيث أن: T_{break} قيمة عزم الاحتكاك الستاتيكي، T_c عزم احتكاك كولومب، c_v ثابت احتكاك في نموذج سترايبيك</p> <p>f ثابت عزم الاحتكاك وفق نموذج فيرسكوس.</p>	



الشكل (4) عزم الاحتكاك وفق نموذج كولومب فيرسكوس وستراييك

يوضح الشكل (4) عزم الاحتكاك وفق نموذج كولومب فيرسكوس وستراييك، يبين نموذج الاحتكاك هذا قيمة الاحتكاك الكبيرة عند وضع السكون ثم انخفاضها تدريجيا تبعا لتأثير ستراييك مع بدء الحركة، ثم ارتفاع قيمة الاحتكاك مع ازدياد السرعة طرديا بفعل معامل احتكاك فيرسكوس.

حيث أن:

T_s عزم احتكاك ستراييك

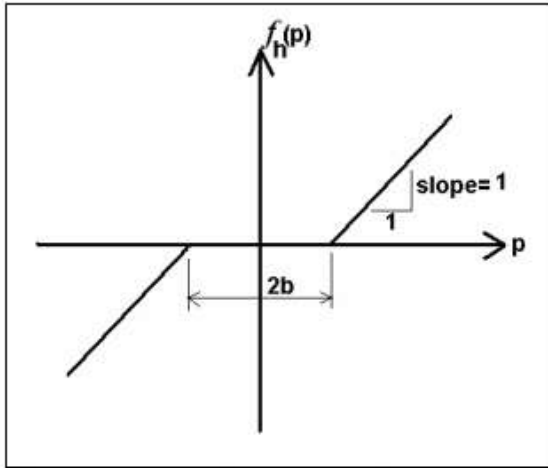
T_v عزم احتكاك فيرسوس

T_c عزم احتكاك كولومب

T_{brk} عزم الاحتكاك الستاتيكي

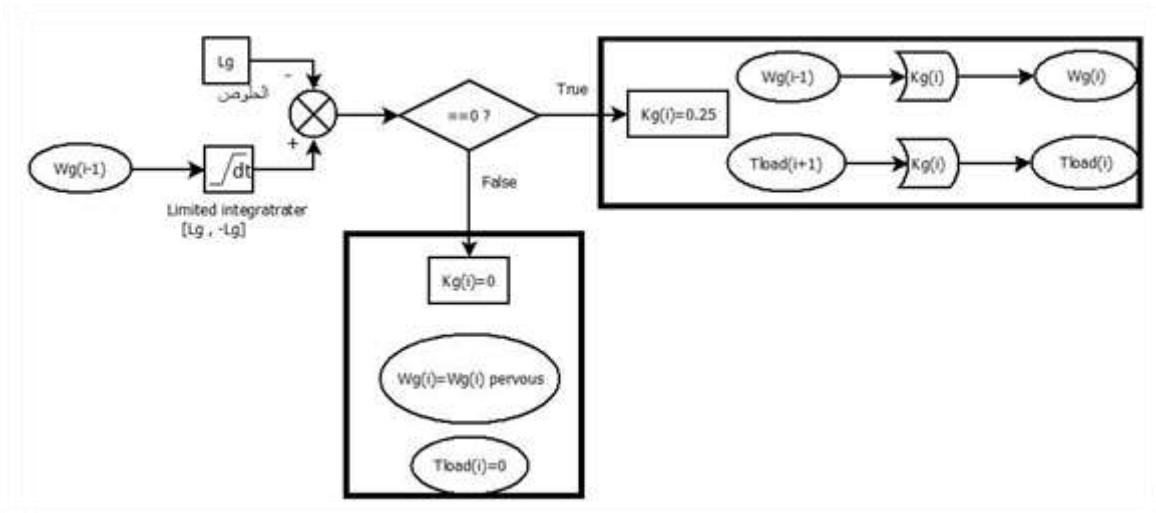
2.2. نموذج مسننات علبة السرعة:

يراعى في هذا النموذج أثر خلوصات مسننات علبة السرعة وعطالتها وكفاءة التعشيقات فيها، حيث تلعب دورا كبيرا في انخفاض دقة المحرك عند العمل على سرعات منخفضة ونسبة تضخيم $K < 1$. فمن الملاحظ عند الاستخدام العملي أنه عند تجاوز الزاوية المطلوبة بقيمة أعلى من خلوص المسنن يضطر المحرك لعكس جهة دورانه [7] والتحرك بقيمة أكبر من ضعفي خلوص المسنن للبدء بالعودة إلى الزاوية المطلوبة مضروبة بمعكوس نسبة التضخيم، وفي أثناء ذلك يكتسب طاقة حركية تستنزف وقتا للفرملة التي بدورها قد لا تكون كافية لتثبيت الزاوية عند النقطة المطلوبة، مما يؤدي إلى تكرار حالة عكس جهة الدوران والفرملة حتى نجاح الثبات عند الهدف (إن وجود الاحتكاك وفق نموذج ستراييك يساهم في فرملة المحرك والثبات عند نقطة الهدف).



الشكل (5) تابع انتقال الحركة في مسننين معشقين

يظهر الشكل (5) تابع انتقال الحركة بين مسنن معشقين باعتبار نسبة التضخيم $K=1$ والخلوص بينهما b_2 .
يبين الشكل (6) سلوك التعشيق في نقل الحركة، فعند وجود خلوص بين مسنني التعشيق تبقى سرعة المسنن الأبعد عن المحرك دون تغيير حيث يكون تأثير التخامد بفعل الاحتكاك فيها مهملاً عند فترات زمنية صغيرة، أما المسنن الأقرب إلى المحرك يعتبر طرفاً حراً بسبب عدم تلامسه مع المسنن التالي فنعتبر أن الحمل وعزوم العطالة التالية للخلوص مساوية للصفر.



الشكل (6) مخطط عمل علبة السرعة.

ينقص الخلوص بفعل تكامل فرق سرعتي مسنني التعشيق مع الزمن حتى ينعدم وعند ذلك يقوم التعشيق بتضخيم السرعة بمقدار K وبتضخيم العزم بمقدار $1/K$.

2.2.1 المعادلات المحددة لسلوك المسنن i من علبة السرعة:

$$x_i = \int (w_{i+1} - w_i) dt$$

$$x_i = \begin{cases} x_i = b & \text{if } x > b \\ x_i = -b & \text{if } x < -b \\ x_i \text{ not changed} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$K_i = \begin{cases} 0, & -b < x < b \\ 0.25, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

حيث أن:

الازاحة الزاوية للمسنن ضمن الخلوص

$$W_{i+1}, W_i \text{ سرعة المسنن الذي رقمه } i \text{ و } i+1$$

$$-b, b \text{ حدود الخلوص بين المسنن الذي رقمه } i \text{ والمسنن } i+1$$

$$K_i \text{ نسبة تضخيم السرعة بين المسننين } i, i+1$$

توضح المعادلات (4) الخلوص بين المسننين $i, i+1$ بدلالة السرعة الزاوية لكل منهما مع مراعاة الحد الأعظمي له $-b, b$ ، عند وجود الخلوص بمقدار محتوي ضمن المجال $[-b, b]$ تفصل الأجزاء قبل الخلوص من جهة المحرك عما يليها ويبقى المسنن $i+1$ يدور بسبب قصوره الذاتي و قصور الجملة اللاحقة له أما عزم التدوير الفعال المنتقل من جهة المحرك عبر المسنن i والمسننات السابقة يعتبر بالنسبة للمسنن $i+1$ غير منقول بسبب عدم التلامس بين بينه وبين المسنن i و يعمل العزم المحرك بشكل كامل على عكس جهة دوران الحركة في محور المحرك و المسننات السابقة $i+1$

2.2.2. عزم عطالة الأجزاء المتحركة المكافئة طاقيا للأجزاء المتحركة الموصولة عبر مجموعة مسننات

إلى محور المحرك

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot J \cdot w^2 \quad (5) \quad \text{عند وصل جسم عطالته } J \text{ إلى المحرك تكون الطاقة الحركية التي يكتسبها}$$

حيث أن: E_k الطاقة الحركية الناتجة عن السرعة الزاوية J عزم عطالة الجسم الدوار أما عند وصله عبر مسنن بنسبة تضخيم K تكون طاقته الحركية

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot J \cdot (Kw)^2 \quad (6)$$

عند مكافئة جسم دوار عطالته J موصول بمسنن بنسبة تضخيمه K بجسم مكافئ عطالته J' موصول مباشرة إلى المحرك، من أجل نفس الطاقة الحركية المكتسبة يكون

$$\frac{1}{2} \cdot J' \cdot w^2 = \frac{1}{2} \cdot J \cdot (K \cdot w)^2$$

$$J' = K^2 \cdot J \quad (8) \quad \text{تكون عطالة الجسم الدوار المكافئ طاقيا هي}$$

يمكننا استنتاج عزم عطالة المكافئ لكل جزء من الأجزاء الدوارة (المسننات والحمل الموصول إلى علبه السرعة)

عزم عطالة المسنن n من علبه السرعة $J_{gear(n)}$

عزم عطالة المسنن n المكافئ بالطاقة لمسنن متصل مباشرة بالمحرك $J'_{gear(n)}$

$$J'_{gear(n)} = J_{gear(n)} * \left(\prod_{i=1}^{i=n} K_i \right)^2 \quad (9)$$

عزم عطالة الحمل J_{load}

عزم عطالة الحمل المكافئ

$$J'_{load} = J_{load} * \left(\prod_{i=1}^{i=4} K_i \right)^2 \quad (10)$$

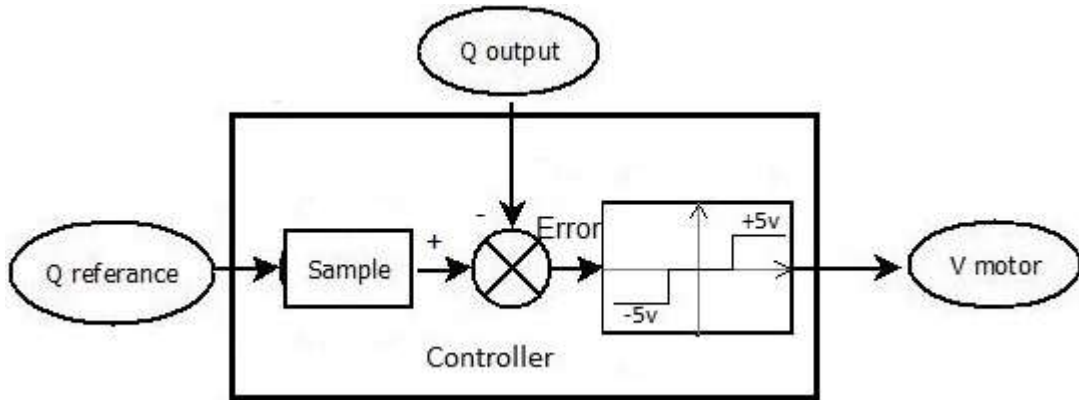
مجموع عزوم عطالة جميع الأجزاء الدوارة فيما إذا كانت موصولة مباشرة إلى محور المحرك

$$J_{total} = J_{motor} + \sum_{n=1}^4 J'_{gear(n)} + J'_{load} \quad (11)$$

يبرز دور المسننات في اظهار السلوك اللاخطي لمحرك السيرفو ولاسيما من خلال المعادلة (11) و (4) حيث يظهر تغير في عزم عطالة جملة الأجزاء المتحركة أثناء تحرك المسننات ضمن منطقة خلوص التعشيق .

2.1. نموذج المتحكم Controller:

يقوم المتحكم بأخذ عينات من اشارة الدخل المرجعية المتأخرة زمنيا خلال فترة زمنية منتظمة، ثم يقارنها مع زاوية الخرج وعلى أساسها يضع جهد التحكم الذي يكون حصرا إحدى القيم $[-5, 0, +5]$ Volt [المعادلة (12)، كما هو مبين في الشكل (7).



الشكل (7) مخطط عمل المتحكم

2.1.1. المعادلة المحددة لسلوك المتحكم

$$V_{motor} = \begin{cases} 0 & \text{if } x < |Q_{out} - Q_{sampled}| < deadband \\ 5 * sign(Q_{out} - Q_{sampled}) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (12)$$

حيث أن: V_{motor} جهد التحكم بمحرك التيار المستمر، Q_{out} زاوية الخرج، $Q_{sampled}$ العينة المأخوذة من زاوية الخرج، $deadband$ المجال الميت لقياس الزاوية من قبل المتحكم. إن وجود المجال الميت في المتحكم رغم ما يسببه من انخفاض لدقة محرك السيرفو إلا أنه يساهم في استقرار عمله فينقل مفهوم نقطة الهدف إلى مفهوم مجال الهدف المقبول الذي يتوقف عنده المحرك.

2.1.2. مواصفات محرك (SG90 9g Micro Servo) المستخدم في المحاكاة:

قمنا بأخذ مواصفات المحرك الاسمية من ملف التعريف الخاص به [8] وبقية المواصفات الضرورية بطرق التجريبية

$$R_a = 8.4[\Omega], L_a = 0.001[H], K_e = 0.00125[V/s] \\ K_m = 0.0017465[Nm/A], Q_m = 2e - 8[Kg * m^2];$$

$$\text{sample_time} = 0.003$$

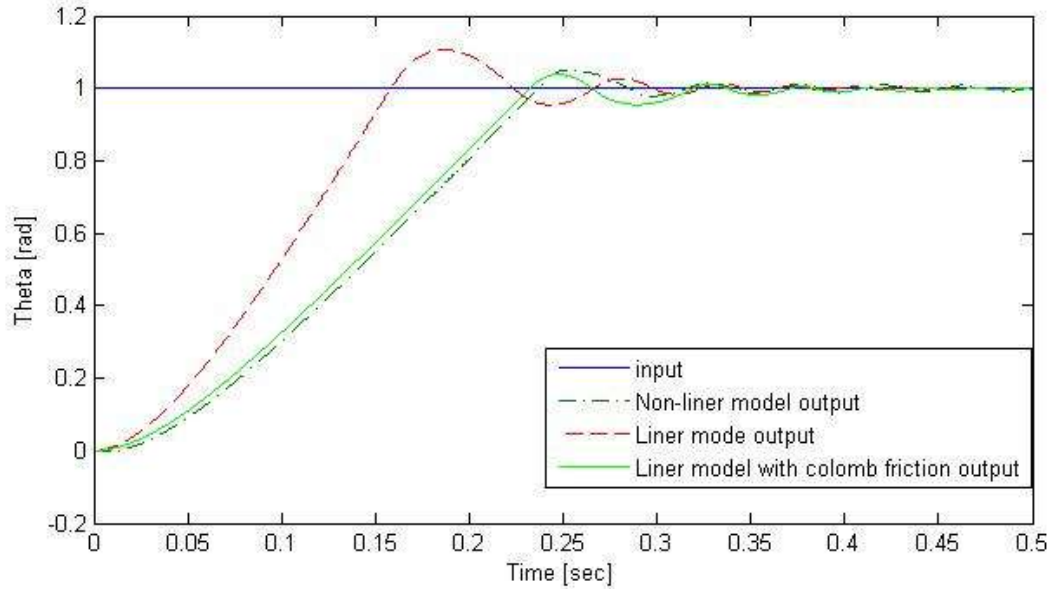
عدد المسننات 4، نسبة التضخيم في كل تعشيق 0.25، عزم عطالة كل مسنن $1e-9$ ، خلوص التعشيقات بين المسننات $0.034[\text{rad}]$ ، المجال الميت للمتحكم $0.00628[\text{rad}]$ ، زمن أخذ عينات اشارة الدخل $0.003[\text{sec}]$.

النتائج والمناقشة:

1. مقارنة نموذج محرك السيرفو الخطي واللاخطي

1.1. مقارنة النموذجين عند العمل على فراغ من أجل دخل نبضة واحدة

عند محاكاة النموذج الخطي (مع وبدون مراعاة عزم احتكاك كولومب [1]) والنموذج اللاخطي المقترح في هذه الورقة البحثية تظهر الاستجابة كما هو مبين في الشكل (8) وذلك من أجل دخل نبضة واحدة. في مرحلة صعود اشارة الخرج نلاحظ انطباق اشارتي النموذج الخطي مع مراعاة عزم احتكاك كولومب مع النموذج اللاخطي الجديد المقترح في هذا البحث، وذلك بسبب انعدام الخواص اللاخطية في مسننات النموذج اللاخطي أثناء العمل باتجاه واحد، ولكن تبدأ الاختلافات عند تغيير اتجاه دوران المحرك بعد تجاوز الهدف الأعظمي حيث يبرز الدور اللاخطي لخلوص المسننات حيث تختلف اشارة خرج النموذج الخطي الذي لا يراعي عزم احتكاك كولومب بشكل كبير عن النموذج الذي يراعي عزم كولومب والنموذج اللاخطي.

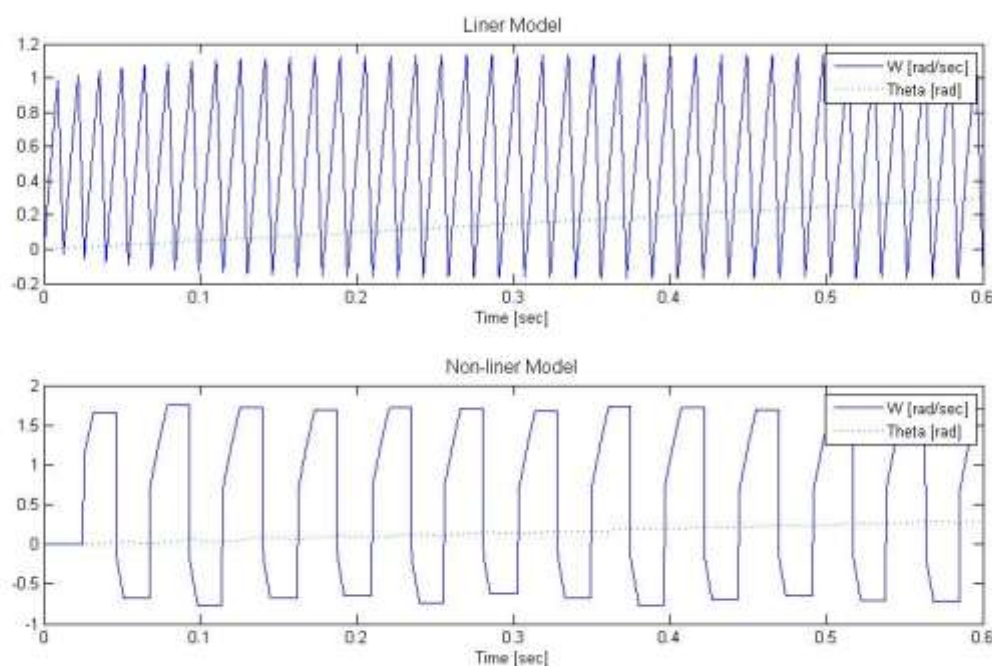


الشكل (8) استجابة النموذجين الخطي واللاخطي لدخل النبضة الواحدة عند العمل على فراغ

1.2. مقارنة النموذجين عند العمل على فراغ من أجل دخل سرعة ثابتة

عند مقارنة نموذجي محرك السيرفو الخطي واللاخطي عند العمل على فراغ من أجل دخل سرعة ثابتة الشكل (9) يظهر فرق في الاستجابة يتمثل بنقصان تردد اهتزاز خرج المحرك مع زيادة مطال هذا الاهتزاز في النموذج اللاخطي مقارنة بالنموذج الخطي، وذلك بسبب المنطقة الميتة في متحكم السيرفو وخلوص المسننات. يبين مقارنة بين

النموذجين الخطي واللاخطي المدروس سابقا واللاخطي الموضوع في هذا البحث من حيث خرج (الزاوية والسرعة الزاوية) وذلك من أجل سرعة دخل ثابتة $w=0.5$ [rad/sec].



الشكل (9) استجابة النموذجين الخطي واللاخطي لدخل النبضة الواحدة عند العمل على فراغ

2. تغيير البارامترات الداخلية لنموذج محرك السيرفو اللاخطي عند العمل على فراغ من أجل دخل نبضة واحدة

قمنا بمحاكاة محرك السيرفو الموضوع في هذا البحث من أجل نبضة دخل واحدة عند عمله على فراغ حيث أبدا الاستجابة الموضحة بالجدول (1) ورصدنا تغيير البارامترات الداخلية من جهد تحكم V ، وسرعة المحرك المشغل W وعزم التحريك الكهربائي الشكل (10) بالإضافة لتوضيح السرعة المنتقلة عبر مسننات علبة السرعة

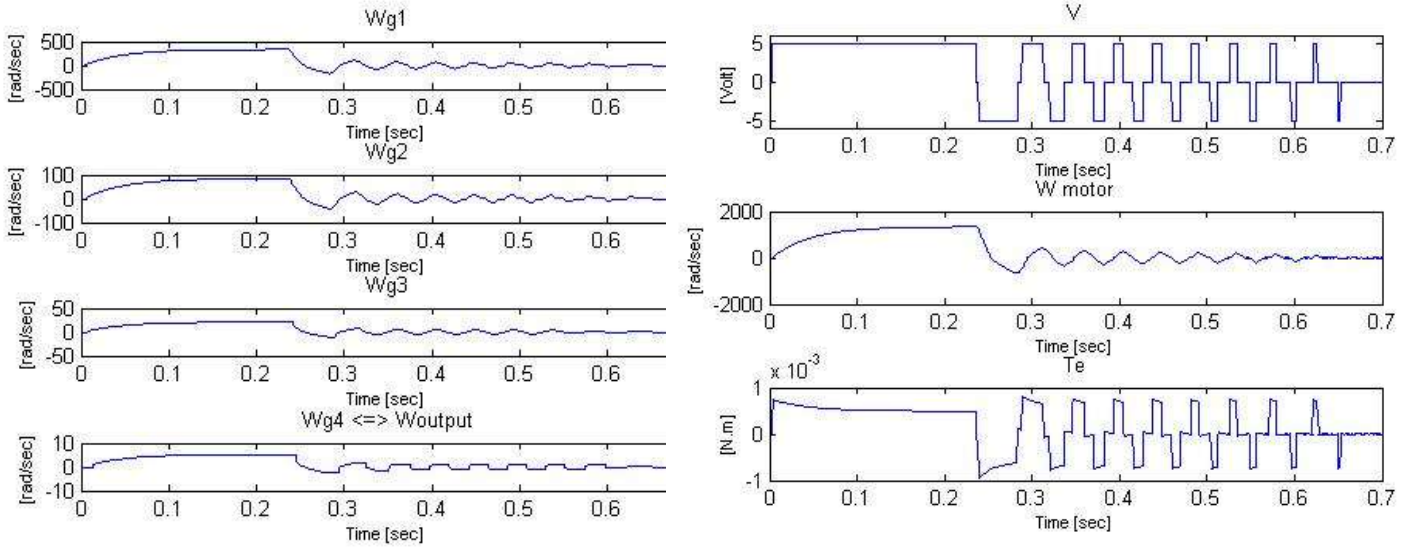
$$W_{g1}, W_{g2}, W_{g3}, W_{g4} = W_{output}$$

نلاحظ اهتزاز بارامترات محرك السيرفو وزاوية خرجه حتى الاستقرار عند القيمة المطلوبة، كما يظهر في الشكل (11) أثر التشوه اللاخطي في السرعة الزاوية المنتقلة عبر المسننات حيث يقترب شكلها من النبضات المربعة عند كل انتقال.

الجدول (1) استجابة نموذج محرك السيرفو لنبضة الدخل الواحدة عند العمل على

is	ett	et	ett	v	e	e
e	lin	tli	lin	er	a	a
Ti	gT	n	g	s	k	k
m	im	g	M	h		Ti
e	e	Mi	ax	o		m

		n		ot		e
.1	.3	.9	.0	.4	.	.2
6	06	0	4	4	0	5
6	9	4	9	2	4	4
3		9	8		9	9
					8	



الشكل (10) البارامترات الداخلية لمحرك التيار المستمر المدمج بمحرك السيرفو

الشكل (11) السرعات الزاوية في كل من المسننات الأربعة

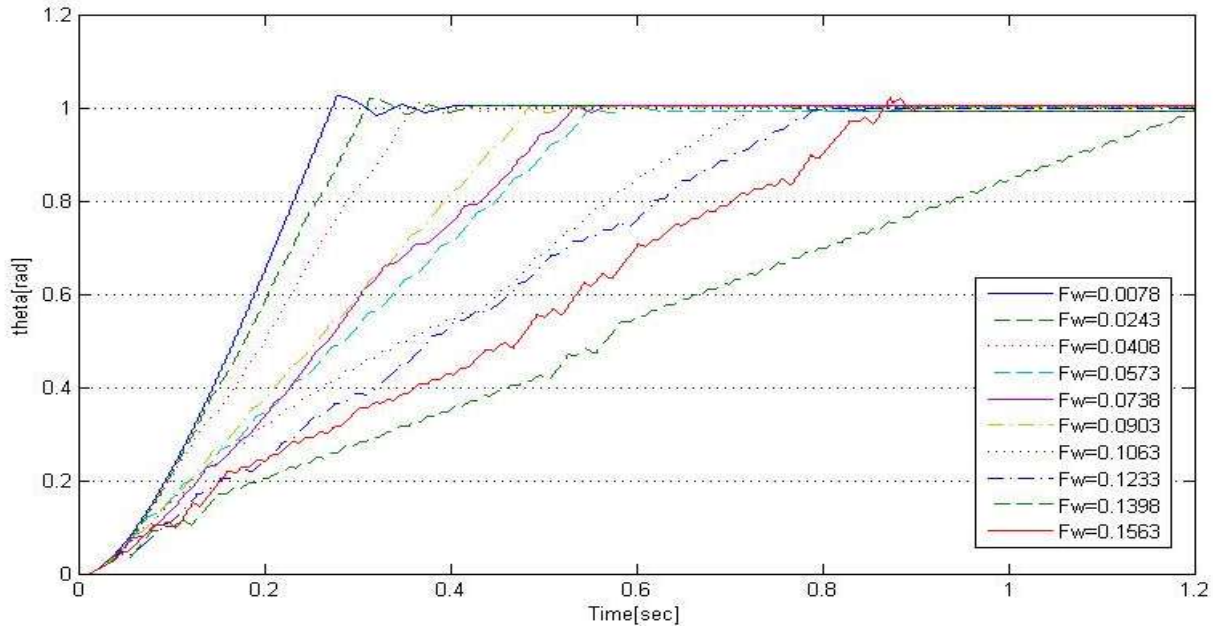
نلاحظ في الشكل (10) ازدياد لاهطية منحنى سرعة مسننات علبة السرعة كلما زاد البعد عن المحرك بسبب تراكم تأثير الخلوصات وتكون استجابة المسنن الأول هي الأقرب للصفات الخطية واستجابة المسنن الرابع أقرب للاهطية. أما في الشكل (11) نلاحظ التحكم اللاهطي بجهد دخل المحرك حيث يأخذ شكل نبضات متعكسة -5، 5 فولط بينها فترات زمنية قصيرة ذات جهد 0 فولط ناتجة عن المنطقة الميتة في المتحكم، إن عرض نبضات التحكم المتعكسة يتناقص تدريجياً على حساب زيادة زمن جهد 0 فولط حتى الوصول إلى الزاوية المطلوبة وتوقف المتحكم عن إعطاء أوامر التصحيح. نلاحظ أيضاً استجابة عزم المحرك لنبضات التحكم بشكل دقيق زمنياً إلا أنه غير دقيق بالمطال نظراً لتأثير تيار المحرك المحدد لهذا العزم بذاتية المحرك نفسه

3. استجابة خرج محرك السيرفو عند نبضة دخل واحدة من أجل أحمال مختلفة

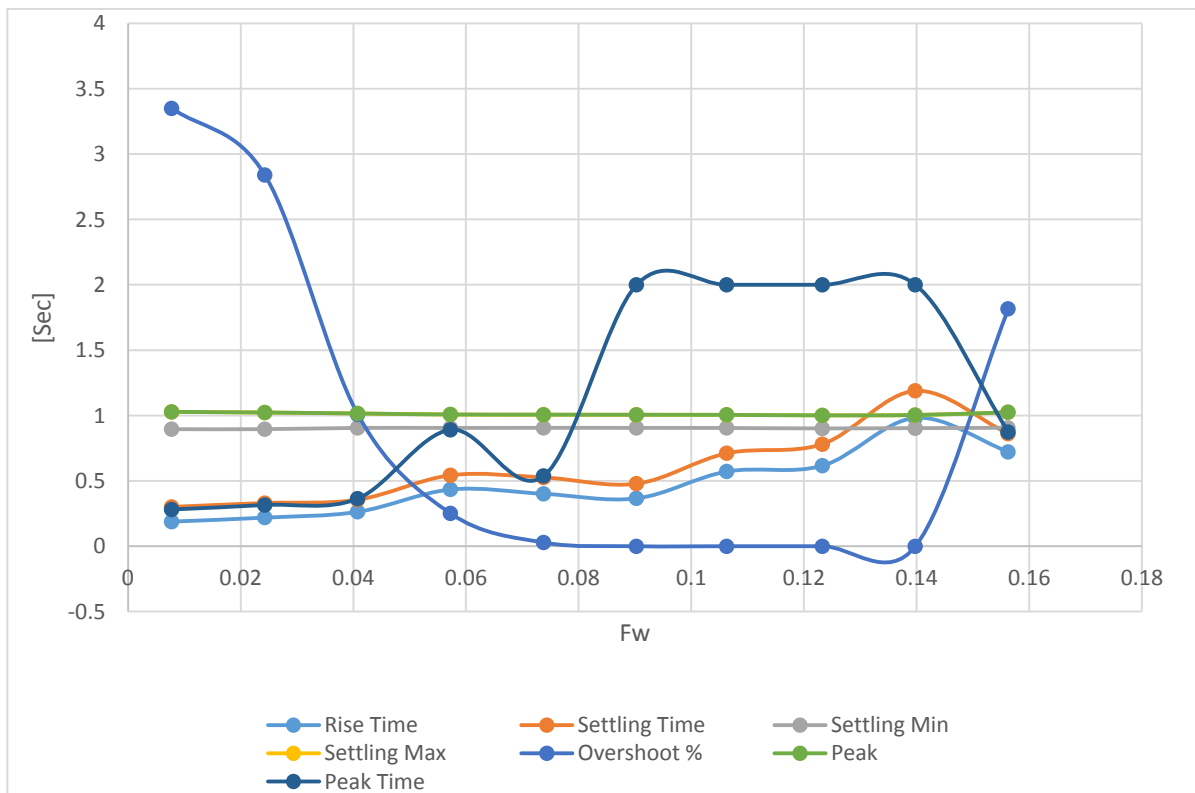
3.1. استجابة خرج محرك السيرفو عند نبضة دخل واحدة من أجل حمل احتكاك

قمنا بمحاكاة نموذج محرك السيرفو مع أحمال خاضعة لعزم احتكاك من نمط فيرسكوس المعطى بالقانون حيث: $T_{friction}$ عزم الاحتكاك، F_w معامل الاحتكاك.

في هذه الحالة ندرس الاحمال ذات معاملات الاحتكاك في المجال $[0.0078, 0.1563]$ [N.m/ rad/sec] حيث يظهر خرج النموذج بالشكل (12) تباطؤ استجابة المحرك وتشوهها مع ازدياد معامل الاحتكاك. عند تقييم الاستجابات السابقة رقميا تظهر بارامترات الاستجابة الزمنية لنبضة الدخل الوحدية الموافقة لكل معامل احتكاك بالشكل (13).



الشكل (12) خرج نموذج محرك السيرفو من أجل معاملات احتكاك مختلفة



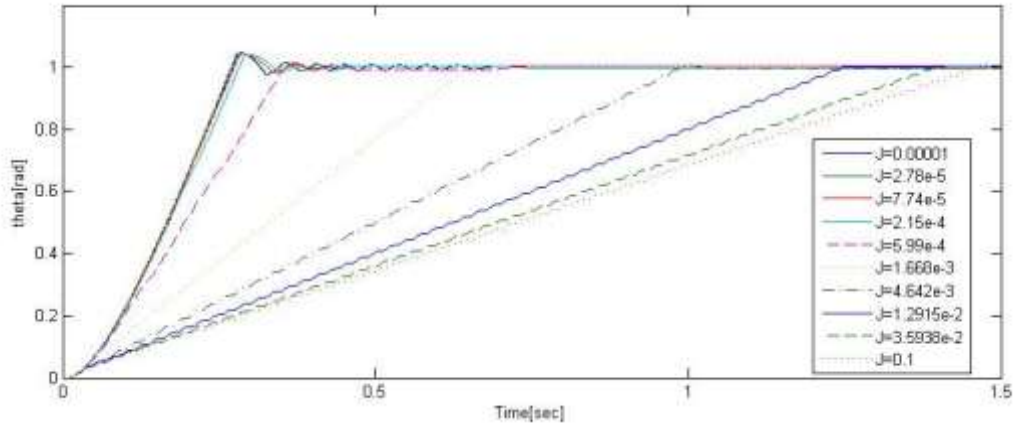
الشكل (13) مواصفات استجابة نموذج محرك السيرفو لدخل النبضة الوحدية من أجل حمولات احتكاك مختلفة

الشكل (13) يوضح الاحصائيات الستاتيكية لمميزات استجابة النبضة الواحدة نلاحظ ازدياد ملحوظ في زمن الصعود من 0.1884 إلى 0.7222 ثانية وزمن الاستقرار من 0.301 إلى 0.8612 ثانية بعلاقة غير متناسبة خطيا مع معامل الاحتكاك، كما نلاحظ انخفاض في التجاوز الأعظمي للهدف عند زيادة معامل الاحتكاك.

3.2. في حالة أحمال ذات عزوم عطالة مختلفة

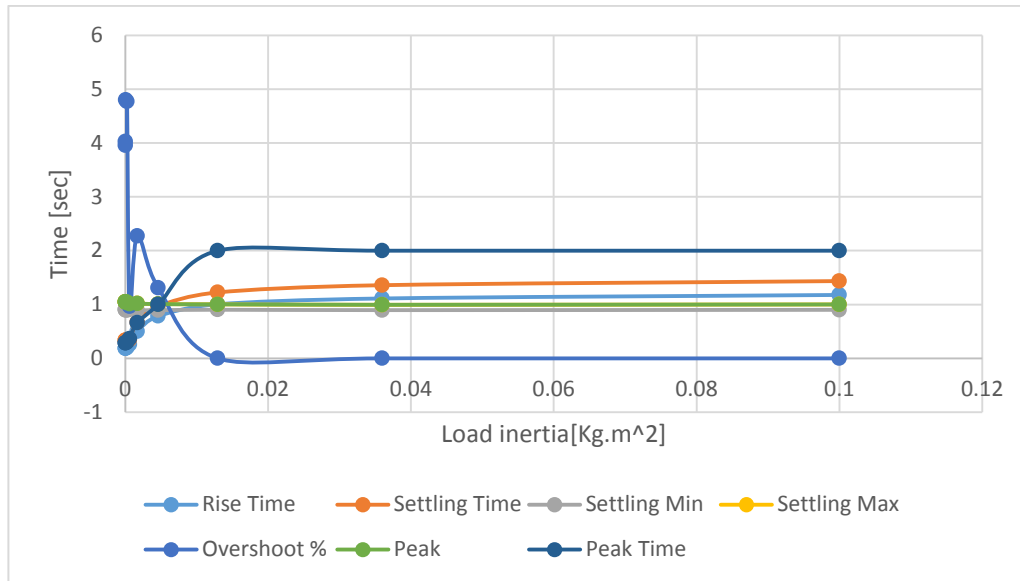
عند محاكاة نموذج محرك السيرفو عند دخل النبضة الواحدة من أجل أحمال ذات عزوم عطالة مختلفة تتراوح ضمن المجال $J=[1e-5 \ 0.1] [Kg.m^2]$ ظهرت تغيرات موافقة لإشارة الخرج تتمثل في الشكل (14).

الشكل (14) استجابة نموذج محرك السيرفو لنبضة دخل واحدة من أجل أحمال ذات عزوم عطالة مختلفة



نلاحظ تباطؤ استجابة نموذج المحرك مع ارتفاع عطالة الحمل دون أن يؤثر على تشوه شكل هذه الاستجابة بالإضافة لانعدام التجاوز الأعظمي أيضا.

بتقييم اشارات خرج المحاكاة السابقة ينتج لدينا الشكل الموضح لخصائص الاستجابة الزمنية لنموذج محرك السيرفو مع تغير عزوم عطالة الاحمال الموصولة إليها الشكل (15).



الشكل (15) مواصفات استجابة نموذج محرك السيرفو لنبضة الدخل الواحدة من أجل حمولات ذات عزوم عطالة مختلفة. نلاحظ ازدياد زمني الصعود والاستقرار بعلاقة غير طردية مع ازدياد عزم عطالة الحمل حيث أن زيادة عزم عطالة الحمل من $1e-5$ إلى 0.1 أدت إلى ازدياد زمن الصعود بعلاقة غير طردية من 0.188 إلى 1.178 ثانية وازدياد زمن الاستقرار من 0.338 ثانية إلى 1.435 كما أثر ازدياد الحمل على تجاوز الهدف الأعظمي فأصبح أقل مطالاً.

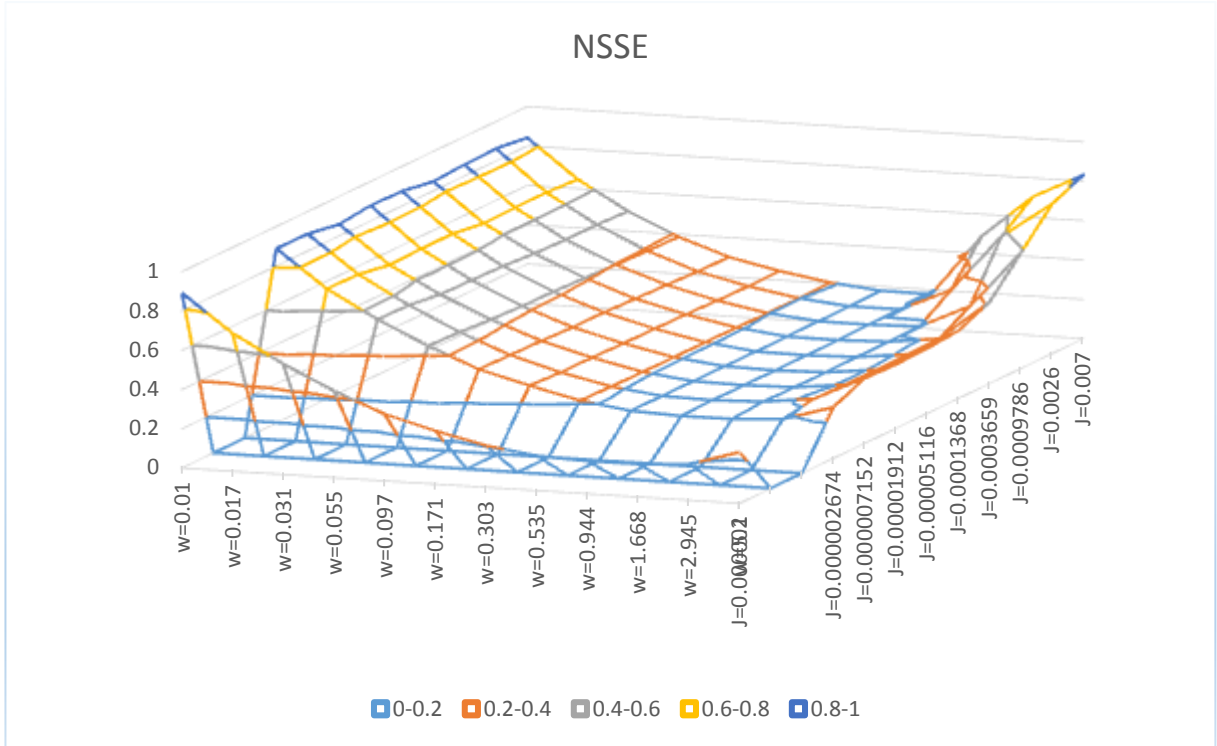
4. تقييم الخطأ في خرج المحرك عند دخل سرعات ثابتة

4.1. تقييم الخطأ في خرج المحرك عند دخل سرعات ثابتة من أجل عزم عطالة متغير

لتقييم عمل نموذج محرك السيرفو الموضوع عند نمط دخل سرعة ثابتة ramp من أجل سرعات ضمن المجال $[0.01, 5.2]$ [rad/sec] وأحمال ذات عزوم عطالة ضمن المجال $[1e-6, 1e-4]$ [Kg.m²] قمنا بمحاكاة عمل محرك السيرفو ذو المقاومة المتغيرة من أجل 120 نقطة في فضاء (سرعة زاوية، عزم عطالة) البعض منها موضح في الشكل (16) وقمنا بتقييم الخطأ لكل نقطة عمل في الشكل (16).

يقبول معامل خطأ أقل من 0.25 نجد أن التأثير الأكبر على دقة محرك السيرفو هي السرعة، حيث يزداد الخطأ بانخفاض السرعة تحت 0.17 [rad/sec] كما هو موضح في الشكل (17)، كما يزداد أيضاً عند العمل بسرعات تقترب من السرعة القصوى للمحرك [5.2rad/sec]، أما تأثير عزم عطالة الحمل فتأثيره أقل، حيث يزداد الخطأ بزيادة عزم العطالة بتناسب غير طردي، مهما كانت السرعة.

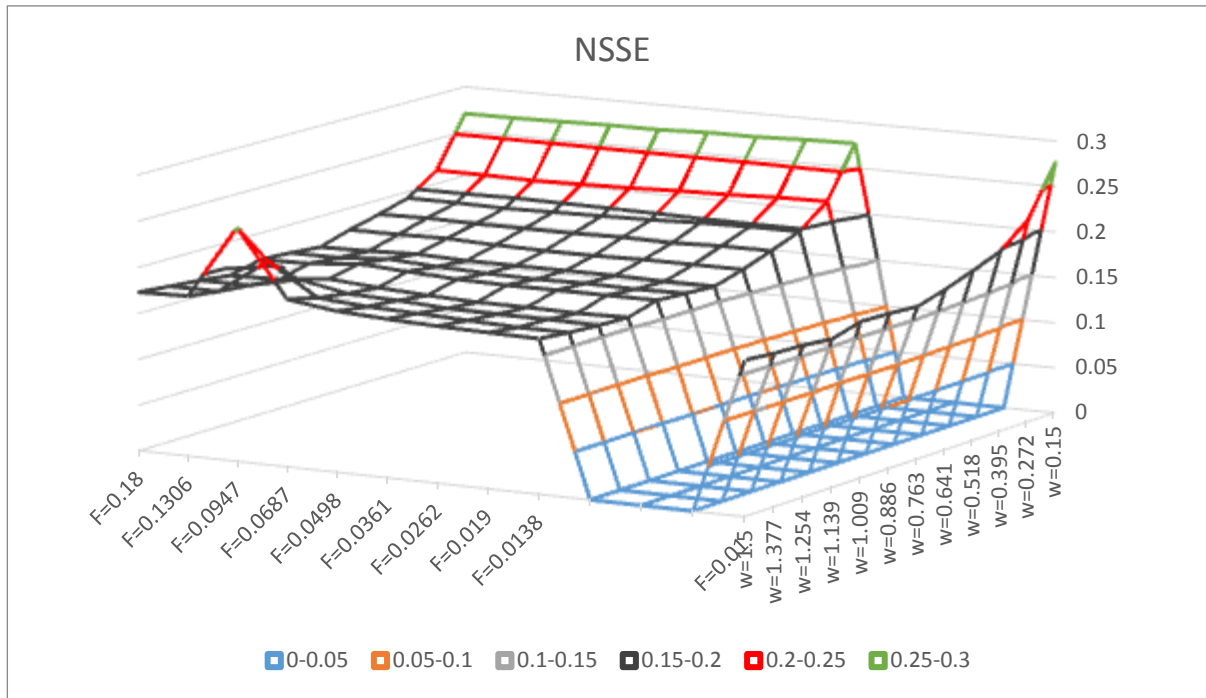
الشكل (16) تقييم خطأ خرج نموذج محرك السيرفو عند أحمال ذات عزوم عطالة مختلفة عند عدة سرعات ثابتة



نلاحظ من الشكل (17) أن الخطأ عند السرعات المنخفضة ناتج عن عدم خطية حركة محرك السيرفو أما عند السرعات العالية فهو بسبب عدم قدرة المحرك على تحريك الحمل بالسرعة المطلوبة، حيث يتناسب الخطأ عند السرعات المرتفعة مع عزم عطالة الحمل.

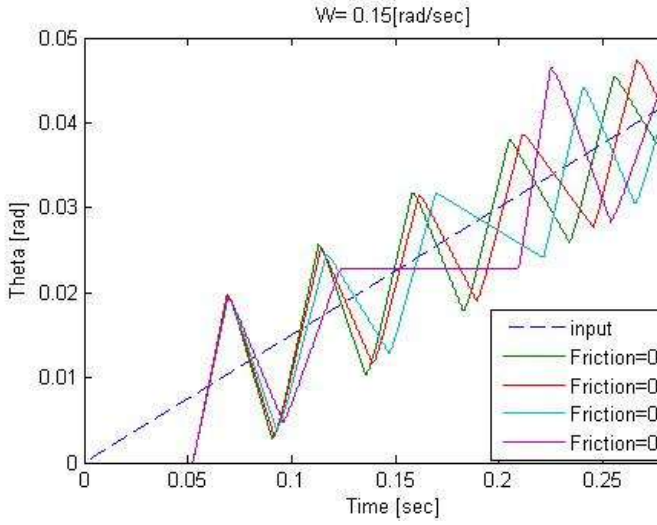
4.2 تقييم الخطأ في خرج المحرك عند دخل سرعات ثابتة من أجل معاملات احتكاك مختلفة

عند محاكاة نموذج محرك السيرفو من أجل 10 معاملات احتكاك مختلفة ضمن المجال [0.01 , 0.18] [N.m/ (rad/sec)] و 12 سرعة مختلفة (مع مراعاة ملاحظات الفقرة 3.1 حول مجالات السرعة المناسبة) ضمن المجال [0.15 , 1.5] [rad/sec] كما هو مبين من أجل عدة حالات في الشكل (19) ينتج لدينا تقييم الأخطاء (NSSE) لكل عمليه محاكاة عند كل نقطة (سرعة ، معامل احتكاك) الشكل(18).

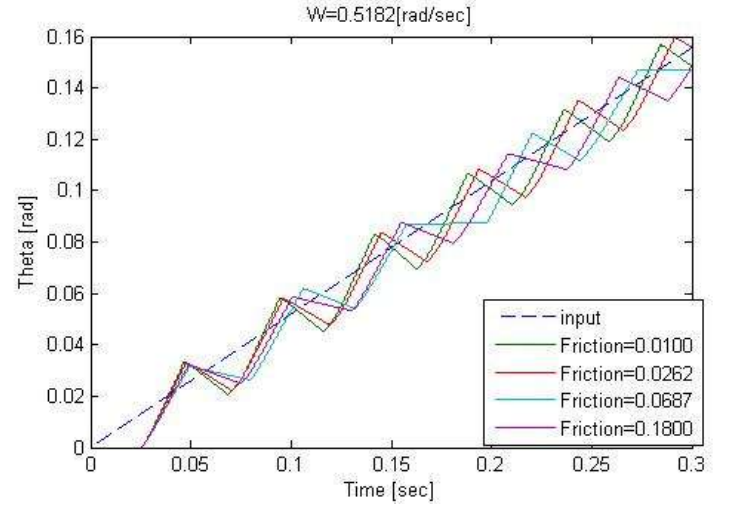


الشكل (18) تقييم خطأ خرج نموذج محرك السيرفو عند أحمال ذات معاملات احتكاك مختلفة عند عدة سرعات ثابتة.

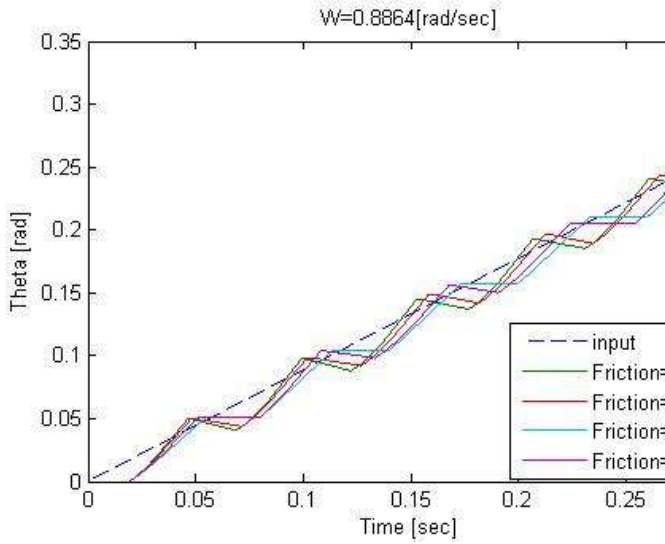
من الملاحظ التأثير الأكبر للسرعة على دقة عمل النموذج، أما تأثير معامل الاحتكاك فهو تأثير طفيف ومتعلق بالسرعة ففي السرعات أعلى من القيمة $w=0.641[\text{rad}/\text{sec}]$ يزداد الخطأ مع ازدياد معامل الاحتكاك أما السرعات الأدنى منها فينقص الخطأ مع ازدياد معامل الاحتكاك.



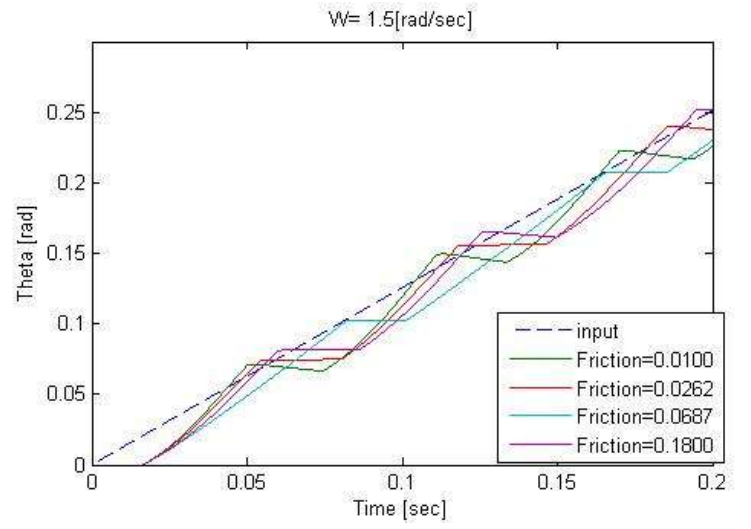
الشكل (19) a



الشكل (19) b



الشكل (19) c



الشكل (19) d

الشكل (19) خرج محرك السيرفو من أجل عدة سرعات عند أحمال ذات معاملات احتكاك مختلفة

a: $W=0.15$ [rad/sec]

b: $W=0.5128$ [rad/sec]

c: $W=0.8864$ [rad/sec]

d: $W=1.545$ [rad/sec]

نلاحظ تشوه شكل إشارة الخرج عند السرعة المنخفضة الشكل (19.a) لاسيما مع القيم المرتفعة لمعامل

الاحتكاك أما في السرعات الأعلى يبقى خرج المحرك على شكل قفزات بالرغم من ازدياد خطأ إشارة الخرج.

الاستنتاجات والتوصيات:

الاستنتاجات:

- 1- سلوك النموذج اللاخطي لمحرك سيرفو ذو المقاومة المتغيرة يظهر بصورة أفضل سلوك المحرك اللاخطي ودقة عمله من أجل بارامترات خرج معينة (موقع محدد أو سرعة خرج محددة، عزم عطالة الحمل أو معامل احتكاكه) وذلك مقارنة بالنموذج الخطي كما يوضح كل من الشكلين (8,9).
- 2- تلعب سرعة خرج المحرك المطلوبة دوراً رئيسياً في انخفاض دقة عمله كما هو مبين في الأشكال (16,17,18,19).
- 3- يتأثر عمل محرك السيرفو بعزم عطالة الحمل، ويسبب عزم العطالة هذا تأخر في استجابة المحرك عند الوصول إلى هدف معين ونقصان الدقة في حركته عند العمل على سرعات محددة.
- 4- يؤثر معامل احتكاك الحمل على سرعة استجابة خرج محرك السيرفو عند الوصول إلى هدف معين، كما يؤثر عند قيم مرتفعة على شكل إشارة الخرج، أما تأثيره على دقة عمل المحرك أثناء الحركة بسرعة ثابتة فهو تأثير ضئيل ويتعلق بتزايد تأثيره أو تناقصه بالسرعة التي يعمل المحرك عندها.
- 5- تمت الدراسة بالنسبة للسرعة وعزم العطالة ومعامل الاحتكاك على مجال واسع نسبياً أما بالنسبة لمحرك السيرفو الشائع (SG90 9 g Micro Servo) تكون قيم التشغيل الأنسب عند خطأ نسبي مقبول (NSSE<0.25):

a. السرعة المناسبة $W = [0.15, 1.5] \left[\frac{rad}{sec} \right]$

b. عزم عطالة الحمل المناسب $J_{load} = [0, 0.007] [Nm^2]$

c. معامل احتكاك الحمل $F_v = [0, 0.18] [Nm / \left[\frac{rad}{sec} \right]]$

التوصيات:

- 1- عند استخدام محرك سيرفو ذو مقاومة متغيرة، يوصى بإجراء عمليه نمذجة له وفق النموذج اللاخطي المقترح في هذا البحث وإجراء محاكاة لسلوكه عند العمل على الأحمال المرغوبة وذلك لتوقع دقة أداءه، أو لاستنتاج مجالات العمل المناسبة له في فضاء (سرعة دوران، عزم عطالة، معامل احتكاك).
- 2- إن لخلوص المسننات في علبه سرعة محرك السيرفو المدمجة دور أساسي في سلوكه اللاخطي ونقصان دقة عمله لذا في حال تطلب العمل دقة عالية، يوصى باستخدام محركات سيرفو ذات علب سرعة خلوصات مسنناتها منخفضة، ويتعلق ذلك بعدة عوامل:
 - a. نوعية المسننات ممتازة.
 - b. استخدام مسننات ذات أسنان بحجم صغير.
 - c. استخدام مسننات كبيرة.

المراجع:

- [ATILA, L. BENCSIK. *Appropriate Mathematical Model of DC Servo Motors*
1] *Applied in SCARA Robots*. Acta Polytechnica Hungarica. Vol. 1, No. 2, 2004.
- [KNUDSEN,M. ; JENSEN,J.G. *Estimation Of Nonlinear Dc-Motor Models*
2] *Using A Sensitivity Approach*. Aalborg University, Fredrik Bajers Vej 7
DK-9220 Aalborg, Denmark
- [VIRGALA,I ;FRANKOVSKY,P ; KENDEROVA,M. *Friction Effect Analysis Of*
3] *A DC Motor*. American Journal Of Mechanical Engineering. Vol. 1, No. 1, 1-5,
2013
- [VRANCIC,D ; JURICIC,D ;HOFLING,T. *Measurements And Mathematical*
4] *Modeling*
Of A DC Motor For The Purpose Of Fault Diagnosis. J. Stefan Institute, Ljubljana,
Slovenia IJS – Report DP-7091. November, 1994
- [GEFFEN.V,V. *A Study Of Friction Models And Friction Compensation*.
5] Technische Universiteit Eindhoven,Department Mechanical Engineering,Dynamics
and Control Technology Group,Eindhoven, December, 2009,24.
- [IVAN VIRGALA ; PETER FRANKOVSKÝ; MÁRIA KENDEROVÁ. *Friction*
6] *Effect Analysis Of A DC Motor*. Department of applied mechanics and mechatronics,
Technical university of Košice / Faculty of mechanical engineering, Košice, Slovakia.
February 26, 2013
- [LIANG XUAN; LEI LEI; TIANMIN GUAN; JIANGBO LI. *The Transmission*
7] *Precision Test Research Of High Precision FA45-29 Prototype*. Applied Mechanics
and Materials ISSN: 1662-7482, Vol. 328, pp 376-381. Trans Tech Publications,
Switzerland. 2013-06-27
- [*SG90 9 G Micro Servo Datasheet*. 9/12/2015.
8] <<http://www.micropik.com/PDF/SG90Servo.pdf>>

