# Control of Quadratic Active Suspended System Using LQR and Sliding Mode Control and Comparison at Different Conditions

**Khansaa Esmaeel Ali***

**(Received 24 / 3 / 2026. Accepted 8 / 6 / 2026)**

## □ ABSTRACT □

Vehicle suspension system is considered one of the systems most exposed to unknown disturbances. Therefore, it requires the design of a control system capable of reducing the disturbances impact. Hence, we used the Linear Quadratic Regulator (LQR) as an optimal control algorithm and sliding mode control as a robust control algorithm to find the best algorithm. The simulation was carried out using MATLAB after representing the system in the state space and then integrated each controller with it.

We then compared the performance of the controllers under different disturbances by comparing the chair displacement, settling time, the amount of oscillation in the control signal, and its maximum value. The comparison showed the superiority of sliding control in terms of robustness against disturbances, while it exhibited significant oscillation in the control signal, whereas the linear quadratic regulator with a weighted performance matrix showed good performance with smoothness in the control signal.

It was eventually concluded that the sliding control is necessary in heavy disturbances systems, while it is preferable to use and experiment with other reaching modes to reduce the oscillations.

**Keywords:** Suspended Systems, Optimal Control, Linear Quadratic Regulator, Robust Control, Sliding Mode Control.

**Copyright** **:**Latakia University journal (formerly Tishreen) -Syria, The authors retain the copyright under a CC BY-NC-SA 04

* **Academic Assistant, Manufacturing & Production Department, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Latakia University (formerly Tishreen), Latakia, Syria. Email: Khansaa.esmaeel.ali@Latakia-univ.edu.sy**

# استخدام المنظم التربيعي الخطي والتحكم الانزلاقي للتحكم بنظام تعليق ربعي نشط والمقارنة بينهما عند التعرض لاضطرابات مختلفة

**خنساء اسماعيل علي***

**(تاريخ الإيداع 24 / 3 / 2026. قُبِل للنشر في 8/ 6 / 2026)**

## □ ملخّص □

يعتبر نظام تعليق السيارة من أكثر الأنظمة التي تتعرض للاضطرابات ،وتكون هذه الاضطرابات دوماً غير معروفة. ولذلك فهو يتطلب نظام تحكم قادر على مواجهة هذه الاضطرابات والحد من تأثيرها على بقية أجزاء السيارة. لذلك تم خلال هذه الدراسة استخدام المنظم التربيعي الخطي كخوارزمية تحكم أمثل واستخدام التحكم الانزلاقي كخوارزمية تحكم متين بهدف تحديد الخوارزمية الأفضل بينهما. تمت المحاكاة باستخدام MATLAB بعد أن تم تمثيل النظام مع المتحكم في فراغ الحالة.

إن المقارنة بين أداء المتحكمات باختلاف الاضطرابات التي يخضع لها النظام تمت على أساس مقارنة إشارة الإزاحة الشاقولية لمقعد الراكب، بين إزاحة الكرسي وزمن الاستقرار ومقدار التذبذب في إشارة التحكم وأكبر قيمة لها، حيث أظهرت المقارنة تفوق نظام التحكم الانزلاقي من حيث المتانة ضد الاضطرابات مع وجود تذبذب حاد في إشارة التحكم، بينما أظهر المنظم التربيعي الخطي أداءً جيداً عند تثقيل مصفوفة الأداء نعومة في إشارة التحكم.

نوصي في النهاية بضرورة استخدام نظام التحكم الانزلاقي في الأنظمة الثقيلة المعرضة بشكل دائم للاضطرابات والتي لا تشكل الاهتزازات مشكلة كبيرة فيها بينما يفضل استخدام وتجريب أنماط أخرى للوصول الخاصة بالمتحكم الانزلاقي بهدف التخفيف أو التخلص من مشكلة التذبذب.

**الكلمات المفتاحية:** أنظمة التعليق، التحكم الأمثل، المنظم التربيعي الخطي، التحكم المتين، التحكم الانزلاقي.

**حقوق النشر** : مجلة جامعة اللاذقية (تشرين سابقاً)- سورية، يحتفظ المؤلفون بحقوق النشر بموجب الترخيص CC BY-NC-SA 04

* **قائم بالأعمال _قسم التصميم والإنتاج _كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية_ جامعة اللاذقية (تشرين سابقاً)_ اللاذقية_سورية.**
**ايميل: Khansaa.esmaeel.ali@Latakia-univ.edu.sy**

## 1.مقدمة:

تعد أنظمة التعليق في المركبات أحد أهم العناصر المؤثرة في راحة الركاب و ثبات السيارة و قدرتها على التعامل مع ظروف الطريق المختلفة .فمع تطور صناعة السيارات وازدياد متطلبات الأمان والراحة، أصبح من الضروري تطوير أنظمة تعليق أكثر ذكاءً وقدرة على التكيف مع الاضطرابات الناتجة عن الطريق. يعتمد نظام التعليق التقليدي (السلبي) على عناصر ميكانيكية ذات خصائص ثابتة مثل النوابض والمخمدات، والتي تعمل دون أي تدخل تحكمي، مما يجعله محدود الأداء عند مواجهة ظروف طريق قاسية أو متغيرة[1].

في المقابل، ظهرت أنظمة التعليق النشطة كحل متقدم قادر على توليد قوى تحكم إضافية لتحسين استجابة المركبة وتقليل الاهتزازات. تعتمد هذه الأنظمة على مشغلات تتحكم في حركة العجلات والهيكل بشكل لحظي، مما يسمح بتحقيق مستوى أعلى من الراحة والثبات مقارنة بنظام التعليق السلبي. ومع ذلك، فإن أداء النظام النشط يعتمد بشكل كبير على خوارزمية التحكم المستخدمة لتوليد القوة المناسبة في كل لحظة[2].

من بين خوارزميات التحكم الحديثة، يبرز المنظم التربيعي الخطي كأحد أكثر الأساليب فعالية في تحقيق توازن مثالي بين أداء النظام واستهلاك الطاقة. إذ يتيح هذا المتحكم تصميم قوة تحكم مثالية تقلل من اهتزازات الهيكل وتحسن ثبات المركبة، مع مراعاة قيود النظام وخصائصه الديناميكية[3]،[4]، ومن جهة أخرى تبرز خوارزمية التحكم الانزلاقي التي تعتبر من بين خوارزميات التحكم المتين التي يتم استخدامها في الأنظمة التي تتعرض لاضطرابات كثيرة دون الحاجة لوجود نموذج رياضي دقيق للنظام[5],[6].

## 2.أهمية البحث وأهدافه:

تنبع أهمية هذا البحث من الدور الحيوي الذي يلعبه نظام التعليق النشط في تحسين جودة القيادة، وتعزيز ثبات المركبة، ورفع مستوى الأمان في مختلف ظروف الطريق. فمع تزايد الاعتماد على الأنظمة الذكية في المركبات الحديثة، أصبح من الضروري تطوير خوارزميات تحكم قادرة على التعامل مع الاضطرابات الخارجية وعدم اليقين في النموذج الديناميكي للسيارة، مع الحفاظ على أداء مستقر وفعّال.

يهدف هذا البحث إلى:

1. بناء نموذج رياضي مناسب لنظام تعليق ربعي نشط في السيارة ونموذج رياضي لنظام تعليق سلبي.
2. دراسة وتحليل خوارزمية المنظم التربيعي الخطي كأحد أبرز أساليب التحكم الأمثل واستخدامها للتحكم في نظام التعليق.
3. دراسة وتحليل خوارزمية التحكم الانزلاقي كأحد أبرز خوارزميات التحكم المتين.
4. تقييم قدرة كل من الخوارزميتين على تقليل تأثير المطبات والاهتزازات، وتحقيق توازن مثالي بين راحة الركاب وثبات المركبة واستهلاك الطاقة.

## 3.طرائق البحث ومواده:

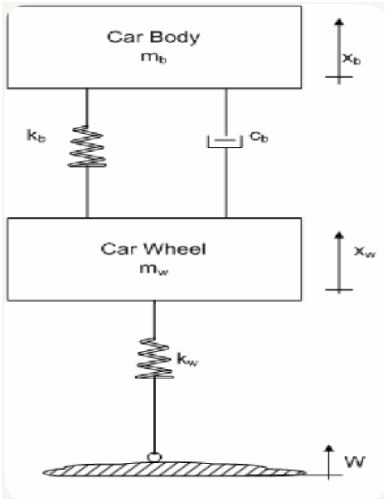
### 1.3 نظام التعليق السلبي وتمثيله في فراغ الحالة:

يعد نظام التعليق السلبي من أقدم أنظمة التعليق المستخدمة في السيارات، وقد بدأ اعتماده منذ بدايات صناعة المركبات في أوائل القرن العشرين. صُمّم هذا النظام ليكون وسيلة بسيطة وموثوقة لامتصاص صدمات الطريق وتقليل الاهتزازات التي تنتقل من العجلات إلى هيكل السيارة والركاب. وبسبب بساطته وانخفاض تكلفته وسهولة صيانته، ما يزال النظام السلبي مستخدماً على نطاق واسع في معظم السيارات التقليدية حتى اليوم[7].

يتكوّن نظام التعليق السلبي من عناصر ميكانيكية ثابتة لا تتغير خصائصها أثناء القيادة[8]، وأهمها:

1. النابض: حيث يقوم بامتصاص الطاقة الناتجة عن المطبات والحفر ويسمح للعجلة بالحركة العمودية دون نقل كامل الاهتزاز إلى الهيكل.
2. المخمِّد: حيث يسيطر على حركة النابض ويمنع الارتداد السريع. ويقلل الاهتزازات ويمنع المقعد من الارتفاع المفرط بعد الصدمة، كما أنه يمتلك قيمة تخميد ثابتة لا يمكن تغييرها أثناء القيادة[8].

يمثل الشكل (1) نظام تعليق ربعي سلبي ولتمثيله في فراغ الحالة يلزمنا تطبيق قانون نيوتن الثاني على كل من كتلة السيارة ($m_b$) وكتلة العجلة ($m_w$)




**الشكل (1)نظام تعليق سلبي لنموذج ربع السيارة**

$$m_b * x_b^{"} = k_b * (x_b - x_w) + c_b(x_w' - x_b') \quad (1)$$

$$m_w * x_w^{"} = -k_b * (x_w - x_b) + c_b(x_b' - x_w') - k_w(x_w - w) \quad (2)$$

وباعتبار متغيرات الحالة هي:

$X_b$(m) الإزاحة الشاقولية للكتلة $m_b$ الممثلة لكتلة ربع السيارة.

$X_b'$(m/sec) سرعة الكتلة $m_b$.

$X_w$(m) إزاحة الكتلة $m_w$ الممثلة لكتلة العجلة.

$X_w'$(m/sec) سرعة الكتلة $m_w$.

$K_b$(N/m) ثابت صلابة نابض التعليق.

$C_b$(N*s/m) معامل التخميد لنظام التعليق.

$K_w$(N/m) ثابت صلابة العجلة.

وباعتبار الخرج هو ($X_b$) الممثِّل للإزاحة الشاقولية للكتلة ($m_b$).

($w(m)$) الاضطراب المطبق على العجلة من الطريق ويمثل دخل النظام.

ومنه نحصل على تمثيل نظام التعليق السلبي في فراغ الحالة كما هو مبين في المعادلتين (3)،(4).

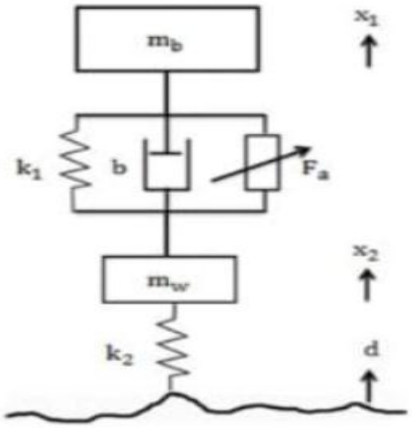
$$\begin{bmatrix} x_b' \\ x_b'' \\ x_w' \\ x_w'' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{k_b}{m_b} & \frac{-b}{m_b} & -\frac{k_b}{m_b} & \frac{b}{m_b} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{k_b}{m_w} & \frac{b}{m_w} & -\frac{k_b + k_w}{m_w} & -\frac{b}{m_w} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} x_b \\ x_b' \\ x_w \\ x_w' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{k_w}{m_w} \end{bmatrix} w \qquad (3)$$

$$y = [1 \quad 0 \quad 0 \quad 0] * \begin{bmatrix} x_b \\ x_b' \\ x_w \\ x_w' \end{bmatrix} \qquad (4)$$

### 2.3 نظام التعليق النشط وتمثيله في فراغ الحالة:

يعد نظام التعليق النشط أحد أهم التطورات الحديثة في ديناميكا المركبات، إذ يعتمد على مشغلات قادرة على توليد قوى خارجية تتحكم بحركة الهيكل والعجلات في الزمن الحقيقي، مما يحقق مستوى أعلى من الراحة والثبات مقارنة بأنظمة التعليق السلبية. يتكوّن النظام عادةً من حساسات لقياس إزاحة العجلات وتسارع الهيكل، ووحدة تحكم إلكترونية تطبق خوارزميات متقدمة، إضافة إلى مشغلات هيدروليكية أو كهربائية تولد القوة المطلوبة لتحسين استجابة المركبة لاضطرابات الطريق. وقد أظهرت الدراسات الحديثة أن أنظمة التعليق النشطة توفر تحسناً ملحوظاً في راحة الركاب والتحكم الديناميكي، خصوصاً مع تطور تقنيات التحكم والكهرباء في المركبات الحديثة[9] .

يمثل الشكل (2) نظام تعليق ربعي نشط لسيارة، حيث لتمثيله في فراغ الحالة يلزمنا تطبيق قانون نيوتن الثاني على كل من كتلة العجلة ($m_w$) وكتلة السيارة ($m_b$).




**الشكل (2) نظام التعليق الربعي النشط [1]**

حيث:

$K_1(N/m)$ ثابت صلابة نابض التعليق.

$b(N*s/m)$ معامل التخميد لنظام التعليق.

$K_2(N/m)$ ثابت صلابة الإطار.

وباعتبار متغيرات الحالة هي:

$X_1$(m) إزاحة الكتلة $m_b$ الممثلة لكتلة ربع السيارة.

$X_1'$(m/sec) سرعة الكتلة $m_b$.

$X_2$(m) إزاحة الكتلة $m_w$ الممثلة لكتلة العجلة.

$X_2'$(m/sec) سرعة الكتلة $m_w$.

وباعتبار الخرج هو ($X_1$) إزاحة الكتلة ($m_b$).

($F_a$(N)) القوة المطبقة من المشغل وهي تمثل دخل النظام.

(d) الاضطراب الذي تتعرض له العجلة من الطريق وهو يمثل دخل ثاني للنظام.

وبتطبيق قانون نيوتن على كل من الكتلتين ($m_b$)،($m_w$ ) ينتج لدينا[1]:

$$m_b * x_1^{"} = -k_1 * (x_1 - x_2) - b(x_1' - x_2') + F_a \quad (5)$$

$$m_w * x_2^{"} = -k_1 * (x_1 - x_2) + b(x_1' - x_2') - k_2(x_2 - d) - F_a \quad (6)$$

وبالتالي نحصل على معادلات نظام التعليق الربعي النشط في فراغ الحالة كما هو موضح في المعادلات (7)،(8)،(9)،(10) [1].

$$x_1' = x_2 \quad (7)$$

$$x_1^{"} = \frac{-k_1}{m_b}x_1 + \frac{k_1}{m_b}x_2 - \frac{b}{m_b}x_1' + \frac{b}{m_b}x_2' + \frac{1}{m_b}f_a \quad (8)$$

$$x_2' = x_4 \quad (9)$$

$$x_2^{"} = \frac{-k_1}{m_w}x_1 - \left(\frac{k_1 + k_2}{m_w}\right)x_2 + \frac{b}{m_w}x_1' - \frac{b}{m_w}x_2' - \frac{1}{m_w}f_a + \frac{k_2}{m_w}d \quad (10)$$

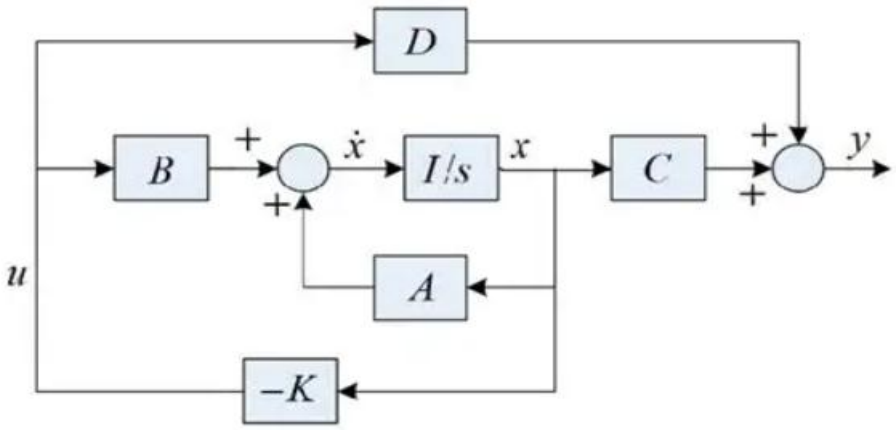
ومنه يكون تمثيل النظام في فراغ الحالة كما هو موضح في المعادلتين (11)،(12) [1].

$$\begin{bmatrix} x_1' \\ x_1^{"} \\ x_2' \\ x_2^{"} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{-k_1}{m_b} & \frac{-b}{m_b} & \frac{k_1}{m_b} & \frac{b}{m_b} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{k_1}{m_w} & \frac{b}{m_w} & -\frac{k_1 + k_2}{m_w} & -\frac{b}{m_w} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} x_1 \\ x_1' \\ x_2 \\ x_2' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{m_b} \\ 0 \\ -\frac{1}{m_w} \end{bmatrix} f_a + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{k_2}{m_w} \end{bmatrix} d \quad (11)$$

$$y = [1 \quad 0 \quad 0 \quad 0] * \begin{bmatrix} x_1 \\ x_1' \\ x_2 \\ x_2' \end{bmatrix} \quad (12)$$

**2.3 خوارزمية التحكم الأمثل (المنظم التربيعي الخطي) وتطبيقها على نظام التعليق النشط:**

تعد خوارزمية المنظم التربيعي الخطي أحد خوارزميات التحكم الأمثل والذي يعتمد أولاً وبشكل أساسي على اشتقاق نموذج رياضي خطي للنظام وتمثيله في فراغ الحالة وهو كبنية مطابق تماماً للتغذية العكسية بمتغيرات الحالة وذلك كما هو موضح في الشكل (3)،حيث يمكن إنجازه بسهولة باستخدام متحكمات تناسبية فقط[10],[11],




**الشكل (3) التغذية العكسية بمتغيرات الحالة بهدف التنظيم [11]**

بفرض لدينا نظام ممثل في فراغ الحالة كما هو مبين في المعادلتين(13)،(14) [11].

$$[\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t)] \quad (13)$$
$$[y(t) = Cx(t) + Du(t)] \quad (14)$$
$$[u(t) = -Kx(t)] \quad (15)$$

حيث:

- $(x(t))$ متجه الحالة
- $(u(t))$ إشارة التحكم
- $(K)$ مصفوفة التغذية العكسية
- $(A, B, C, D)$مصفوفات النظام

بإدخال قانون التغذية العكسية المبين في المعادلة (15)، نحصل على المعادلة (16) وهي توضح كيف تؤثر التغذية العكسية على ديناميكة النظام[11].

$$[\dot{x}(t) = (A - BK)x(t)] \quad (16)$$

كما يتضح لدينا من المعادلة (16) أنه عن طريق ضبط ثوابت مصفوفة التغذية العكسية بمتغيرات الحالة (K) تتغير مصفوفة المعاملات الخاصة بالنظام (A) وبالاختيار المناسب لهذه القيم تم الحصول على الأقطاب المرغوبة للنظام وبالتالي مواصفات الاستجابة الزمنية المرغوبة . ولكنه يختلف عن نظرية توقيع الأقطاب في اختيار قيم الربح (K)، حيث يتم في هذه الخوارزمية اختيار قيم الربح الأمثل التي تحقق توافقاً ما بين الطاقة والأداء بحيث نحصل على أصغر كلفة ممكنة، حيث يعطي تابع الكلفة(J) وفق المعادلة (17)[11].

$$J = \int_0^\infty (X^T QX + U^T RU)\, dt \quad 17$$

حيث:

$X$.شعاع متغيرات الحالة.

$X^T$منقول شعاع متغيرات الحالة

U إشارة التحكم.

$U^T$ منقول إشارة التحكم.

Qمصفوفة الأداء وتكون دوماً موجبة التحديد.

R مصفوفة الطاقة.

يتم اختيار قيم مصفوفتي الأداء والطاقة حسب ما يهم في النظام، فإذا كان المطلوب هو الحصول على أداء ممتاز بغض النظر عن الطاقة التي سيبذلها المشغل يتم زيادة قيم مصفوفة الأداء، بينما لو كانت الطاقة المستهلكة أهم من الأداء يتم بتثقيل مصفوفة الطاقة، وبناءً عليه عندما تم تثقيل مصفوفة الأداء وضعنا مصفوفة الأداء (Q)،(R) كما هو مبين في المعادلة (18)، حيث تم تثقيل المتغير الأكثر أهمية وهو انزياح الكرسي بينما أعطيت باقي المتغيرات أوزاناً أقل حسب أهميتها.

$$Q = \begin{bmatrix} 1*10^6 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1*10^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1*10^4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1*10^4 \end{bmatrix} \qquad 18$$

$$R = 1*10^{-3}$$

أما عندما تم تثقيل مصفوفة الطاقة مقابل مصفوفة الأداء تم اختيار القيم للمصفوفتين كما هو مبين في المعادلة (19).

$$Q = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \qquad (20)$$

$$R = 1*10^3$$

بينما تختار قيم (K) الأمثل للموازنة بين الطاقة والأداء باستخدام المعادلة (18)[11].

$$k = R^{-1}B^TP \qquad (21)$$

حيث:

$R^{-1}$ مقلوب مصفوفة الطاقة التي تم اختيارها.

$B^T$ منقول المصفوفة B.

P مصفوفة موجبة التحديد يتم تحديدها باستخدام معادلة ريكاتي المبينة في المعادلة (19).

$$A^TP + PA + Q - PBR^{-1}B^TP = 0 \qquad (22)$$

وانطلاقاً من المعادلة (18) تم تحديد قيم مصفوفة التغذية العكسية بالحالة عندما تم تثقيل مصفوفة الأداء.

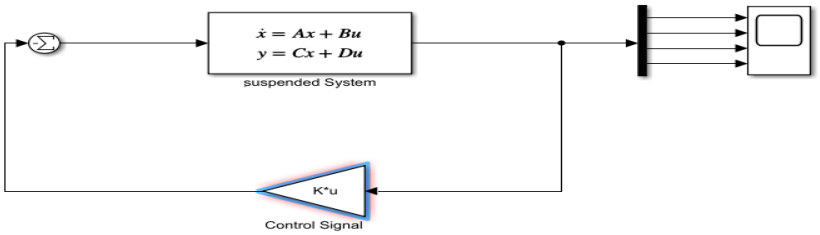
$$k = [1.944 \quad 0.2716 \quad -1.0279 \quad -0.004]$$

بينما أخذت القيم التالية عندما تم تثقيل مصفوفة الطاقة.

$$k = [0.031 \quad 0.0469 \quad -0.3371 \quad -0.0407]$$

وبالتالي نستطيع توليد إشارة التحكم المبينة سابقاً في المعادلة (15)[11].

ولاختبار أداء المنظم التربيعي الخطي قمنا ببناء النموذج المبين في الشكل (4) في بيئة النمذجة (Matlab\Simulink).




**الشكل (4) نظام التعليق النشط بعد إضافة المنظم التربيعي الخطي**

### 3.3 التحكم الانزلاقي وتصميمه من أجل نظام التعليق النشط:

يُعدّ التحكم الانزلاقي أحد أكثر أساليب التحكم غير الخطي قوة ومرونة، إذ يعتمد على مبدأ توجيه النظام نحو سطح ديناميكي مصمم مسبقاً يعرف بسطح الانزلاق، ثم إجبار النظام على الانزلاق عليه حتى يصل إلى السلوك المطلوب. ما يميّز هذا الأسلوب هو قدرته العالية على مقاومة الاضطرابات ، إلا أن مشكلته الأساسية هي ظهور اهتزاز في إشارة التحكم. يقسم تصميم المتحكم الانزلاقي إلى جزأين، حيث يتضمن الجزء الأول تصميم سطح انزلاقي يلبي المطلوب أما الجزء الثاني فيهتم باختيار قانون تحكم يجعل السطح المنزلق جاذباً لحالة النظام.[12]

بفرض لدينا نظام لا خطي معطى وفق المعادلتين (20)،(21).

$$x = x_1 \tag{23}$$

$$x' = x_1^{"} = x_2' = f(x, x', u, t) \tag{24}$$

يتم التصميم باختيار سطح انزلاق يوافق نقطة التوازن المطلوبة كما هو موضح في المعادلة (22).

$$s = ax_1 + x_2 = 0 \tag{25}$$

ولتأمين الوصول إلى سطح الانزلاق هذا يلزمنا تحديد نمط وصول ولذلك نقوم باشتقاق المعادلة (22) فنحصل على المعادلة (23) التي تحدد تغيرات السطح[13].

$$s' = ax_1' + x_2' \tag{26}$$

ومنه ينتج لدينا المعادلة (24).

$$s' = ax_2 + f(x, x', u, t) \tag{27}$$

وباختيار نمط الوصول التقليدي ذو المعدل الثابت المبين في المعادلة (25) نحصل على قانون التحكم (u)[13].

$$s' = -k * sgn(s) \tag{28}$$

ولتصميم المتحكم الانزلاقي لنظام التعليق سنقوم بتعريف سطح الانزلاق كما هو مبين في المعادلة (26)، حيث يتضح منها أن اهتمامنا هنا بإزاحة الكرسي لأن سطح الانزلاقي الذي تم اختياره يتعلق بإزاحة الكرسي وسرعته.

$$s = a * x_1 + x_1' \tag{29}$$

وبالاشتقاق نحصل على المعادلة (27) التي توضح تغيرات سطح الانزلاق.

$$s' = a * x_1' + x_1^{"} \tag{30}$$

وبتعويض المعادلة(8) نحصل عل المعادلة(28) التي يتم منها استخراج قانون التحكم.

$$-k * sgn(s) = a * x_1' + \frac{-k_1}{m_b} x_1 + \frac{k_1}{m_b} x_2 - \frac{b}{m_b} x_1' + \frac{b}{m_b} x_2' + \frac{1}{m_b} f_a \tag{31}$$

ومنه ينتج لدينا القوة المطبقة $(f_a)$ كما هو مبين في المعادلة (29).

$$f_a = -k * sgn(s) - \left(a * x_1' + \frac{-k_1}{m_b} x_1 + \frac{k_1}{m_b} x_2 - \frac{b}{m_b} x_1' + \frac{b}{m_b} x_2'\right) \quad (32)$$

وذلك بعد أخذ قيمة معامل الربح في قانون التحكم الانزلاقي $k = 900$ عن طريق المحاكاة والتجربة حيث أعطت هذه القيمة أقل انزياح للكرسي.

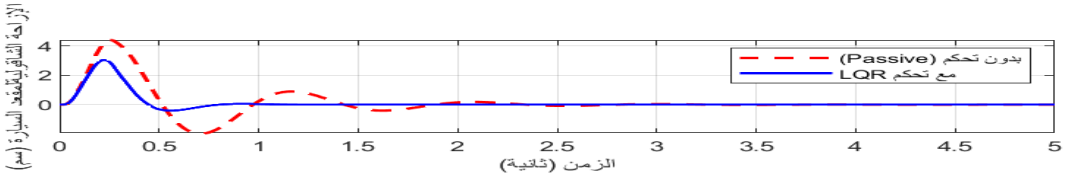
## 4.النتائج والمناقشة:

تم اعتماد نظام تعليق نشط بالبارامترات الموضحة في الجدول (1).

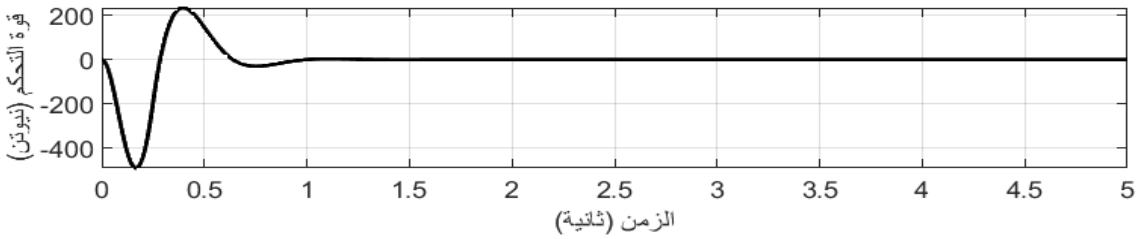
**الجدول (1) بارامترات النموذج المستخدم**

| كتلة العجلة ($m_w$) | كتلة ربع الهيكل ($m_b$) | ثابت صلابة نابض التعليق ($k_1$) | ثابت صلابة الإطار ($k_2$) | معامل التخميد (b) |
|---|---|---|---|---|
| 40 $k_g$ | 300 $k_g$ | 16000(N/m) | 190000(N/m) | 1200 |

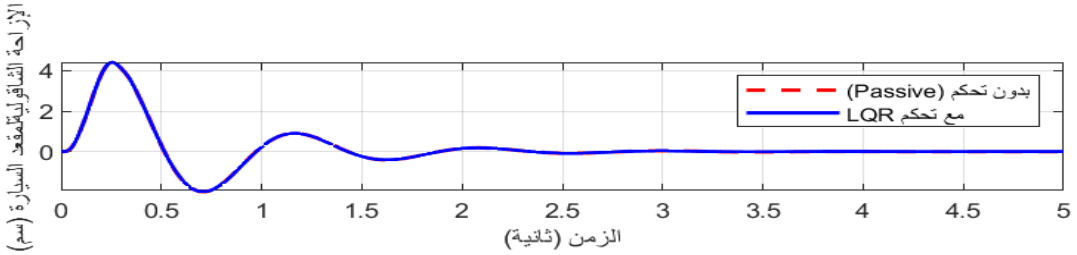
### 1.4اضطراب نصف جيبي بمطال (5cm) وزمن (0.25sec) (استخدام المنظم التربيعي الخطي):



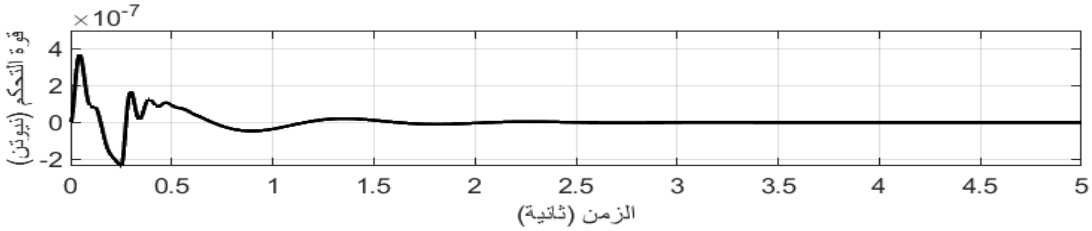

**الشكل (6) الإشارة المعبرة عن الإزاحة الشاقولية لمقعد السيارة عند استخدام المنظم الخطي التربيعي (تثقيل مصفوفة الأداء) وفي حالة نظام التعليق السلبي**




**الشكل (7) إشارة التحكم عند استخدام LQR(تثقيل مصفوفة الأداء)**

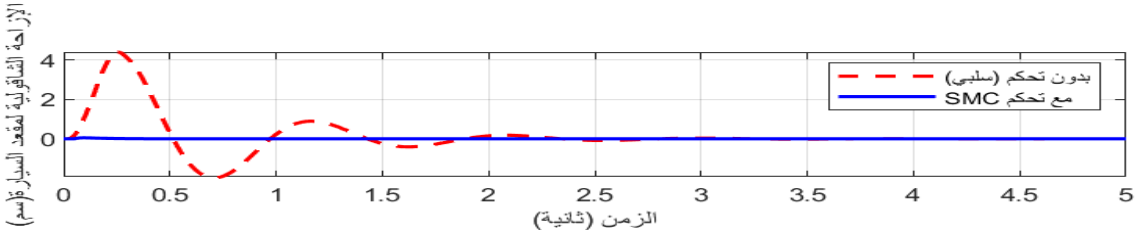



**الشكل (8) انزياح مقعد السيارة عند استخدام LQR(تثقيل مصفوفة الطاقة) ومقارنتها مع نظام التعليق السلبي**

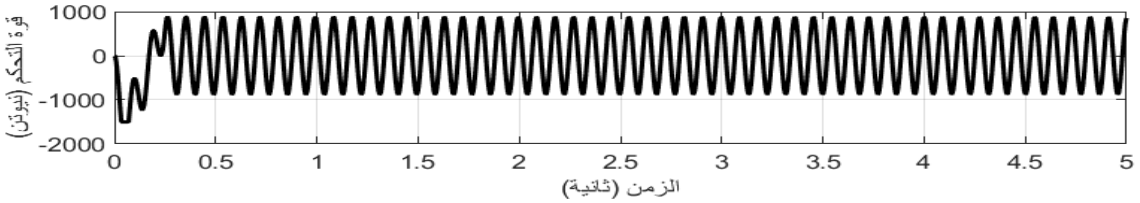



**الشكل (9) إشارة التحكم عند استخدام LQR(تثقيل مصفوفة الطاقة) ومقارنتها**

**2.4التحكم الانزلاقي (اضطراب نصف جيبي بمطال (5cm) وزمن (0.25sec)):**

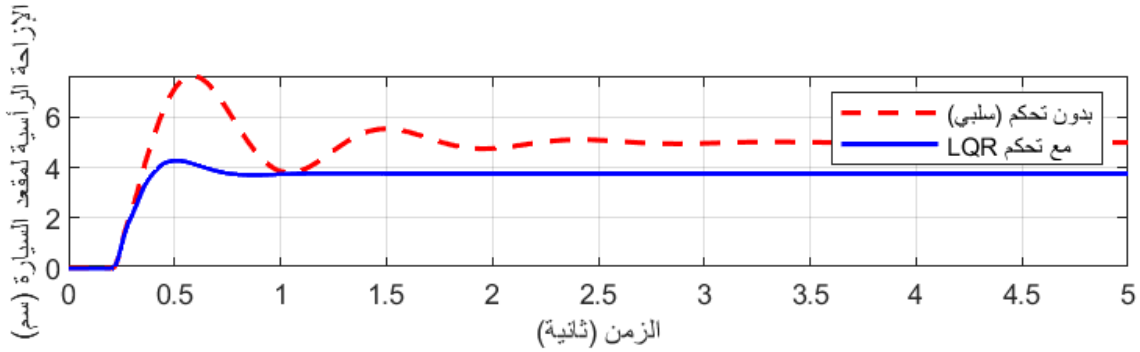



**الشكل (10) انزياح مقعد السيارة عند استخدام التحكم الانزلاقي ومقارنتها مع نظام التعليق السلبي**



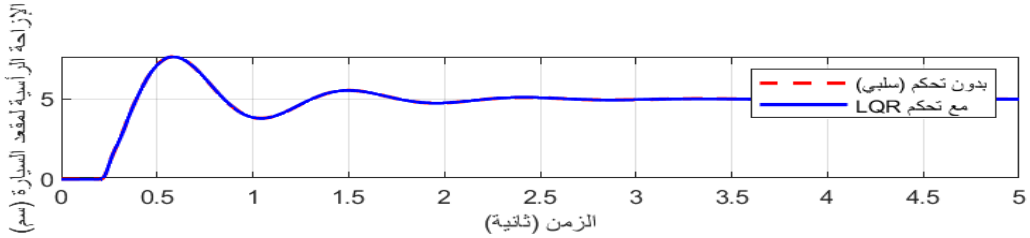

**الشكل (11) إشارة التحكم عند استخدام التحكم الانزلاقي**

**3.4 اضطراب خطوي مطاله (5 cm) واستخدام المنظم التربيعي الخطي (LQR):**

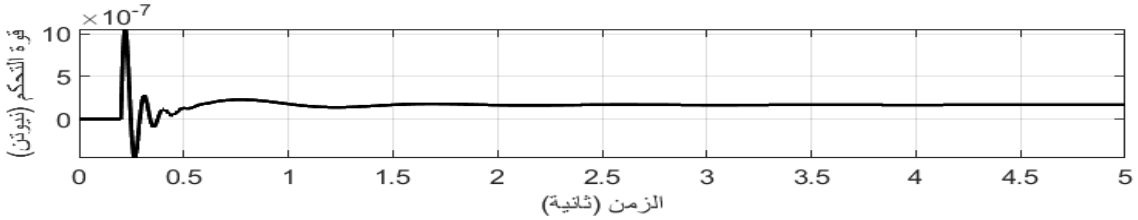



**الشكل (12) انزياح مقعد السيارة عند استخدام المنظم التربيعي الخطي(تثقيل مصفوفة الأداء) عند حدوث اضطراب خطوي ومقارنتها مع نظام التعليق السلبي**

**الشكل (13) إشارة التحكم عند استخدام المنظم التربيعي الخطي (تثقيل مصفوفة الأداء)عند حدوث اضطراب خطوي**

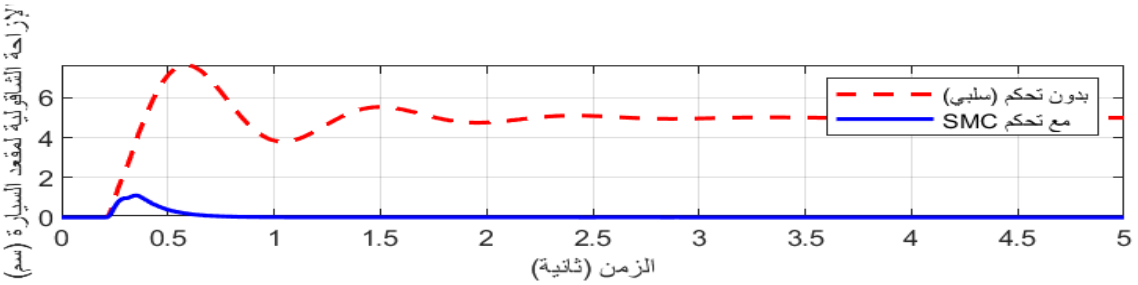



**الشكل (14) انزياح مقعد السيارة عند استخدام المنظم التربيعي الخطي (تثقيل مصفوفة الطاقة) عند حدوث اضطراب خطوي ومقارنتها مع نظام التعليق السلبي**

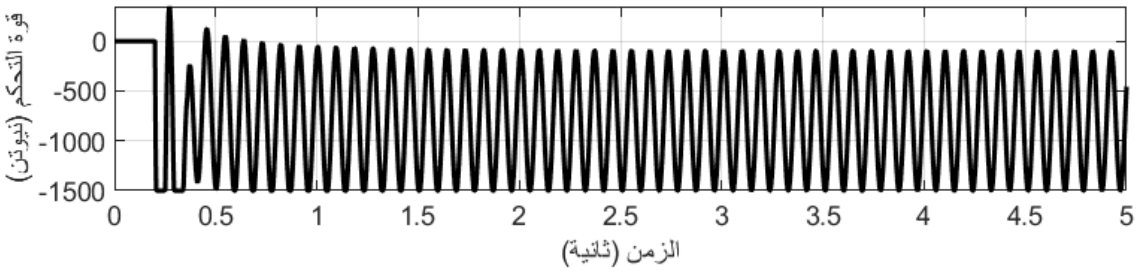



**الشكل (15) إشارة التحكم عند استخدام المنظم التربيعي الخطي(تثقيل مصفوفة الطاقة) عند حدوث اضطراب خطوي ومقارنتها مع نظام التعليق السلبي**

**4.4اضطراب خطوي مطاله (5 cm) واستخدام التحكم الانزلاقي:**

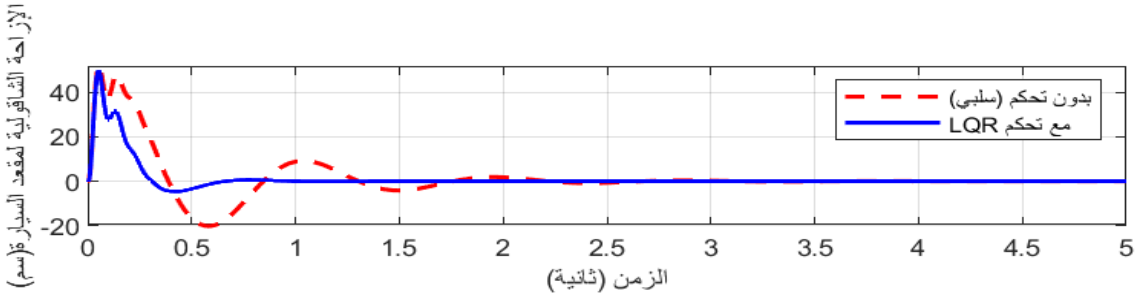



**الشكل (16) انزياح مقعد السيارة عند حدوث اضطراب خطوي واستخدام التحكم الانزلاقي**

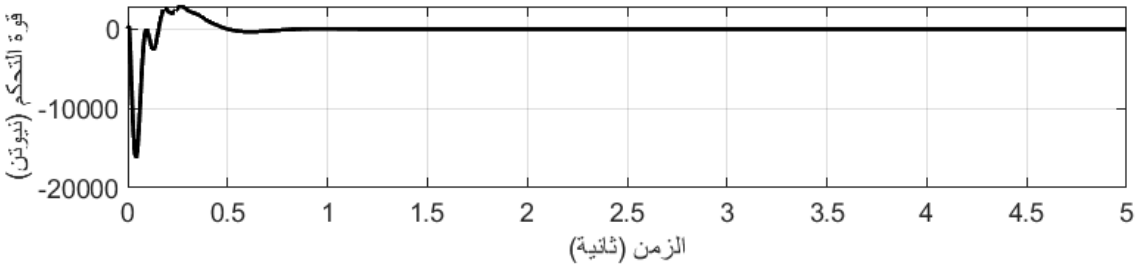



**الشكل (17) إشارة التحكم عند حدوث اضطراب خطوي واستخدام التحكم الانزلاقي**

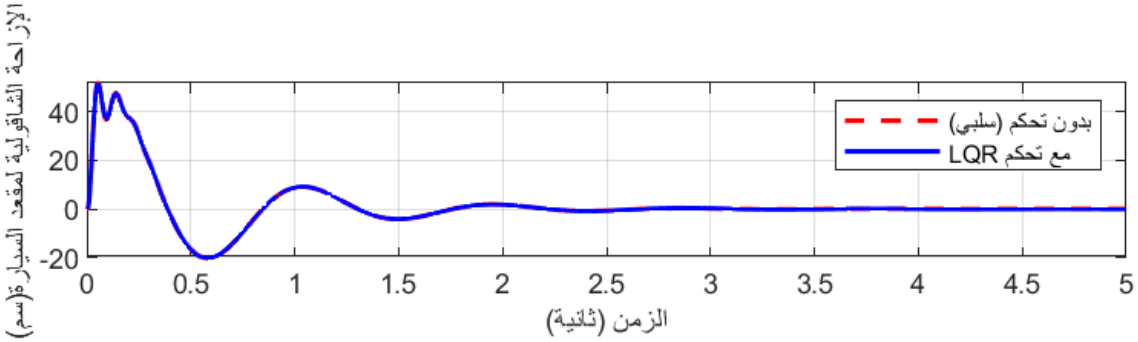
**5.4 اضطراب نبضي مطاله (5 cm) مدته (0.005 sec) واستخدام المنظم التربيعي الخطي (LQR):**



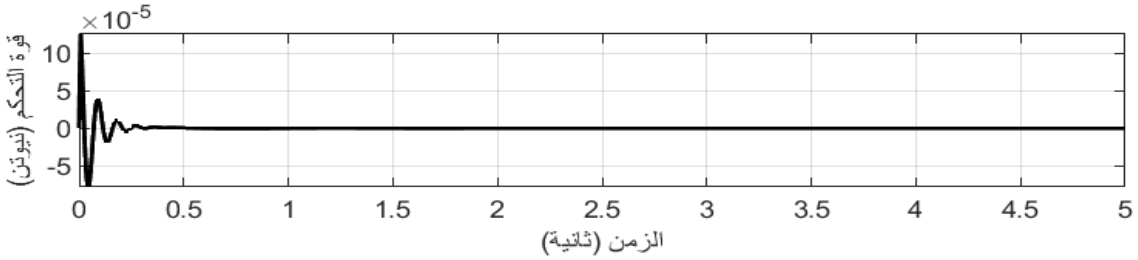

**الشكل (18) انزياح مقعد السيارة عند حدوث اضطراب نبضي واستخدام المنظم التربيعي الخطي (تثقيل مصفوفة الأداء)**




**الشكل (19) إشارة التحكم عند حدوث اضطراب نبضي واستخدام المنظم التربيعي الخطي (تثقيل مصفوفة الأداء)**

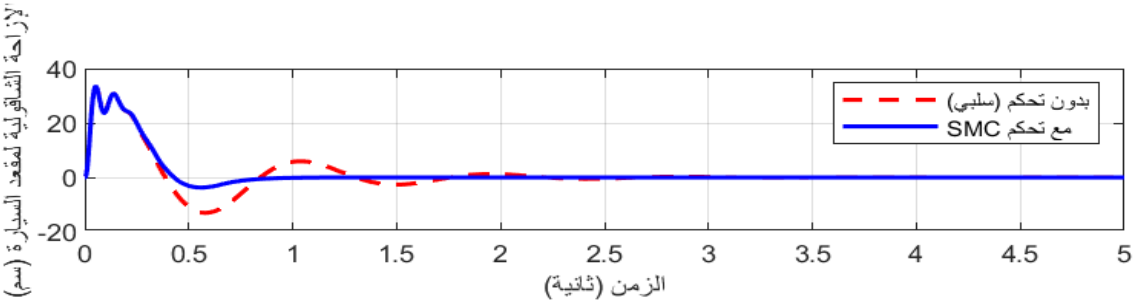



**الشكل (20) انزياح كرسي السيارة عند حدوث اضطراب نبضي واستخدام المنظم التربيعي الخطي (تثقيل مصفوفة الطاقة)**

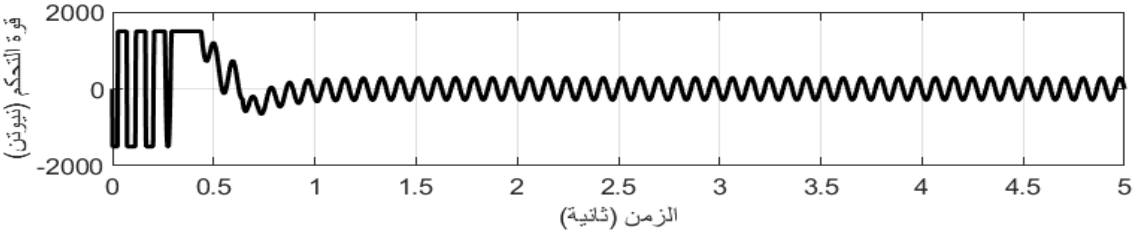



**الشكل (21) إشارة التحكم عند حدوث اضطراب نبضي واستخدام المنظم التربيعي الخطي (تثقيل مصفوفة الطاقة)**

### 6.4 اضطراب نبضي مطاله (5 cm) مدته (0.005 sec) (التحكم الانزلاقي):




**الشكل (22) انزياح مقعد السيارة عند حدوث اضطراب نبضي واستخدام التحكم الانزلاقي**




**الشكل (23) إشارة التحكم عند حدوث اضطراب نبضي واستخدام التحكم الانزلاقي**

## 7.4 المناقشة:

يبين الجدول (1) المقارنة بين مواصفات الأداء لأنماط التحكم المختلفة من أجل الاضطراب النصف الجيبي.

**الجدول (1): مقارنة مواصفات الأداء للمنظم التربيعي الخطي والمتحكم الانزلاقي والنظام السلبي عند تعرض السيارة لاضطراب نصف جيبي**

| | إزاحة الكرسي (cm) | زمن الاستقرار(sec) | أعظم قيمة لإشارة التحكم(N) |
|---|---|---|---|
| النظام السلبي | 4.415 | 2.277 | _ |
| LQR مع تثقيل مصفوفة الأداء | 3.101 | 0.795 | 496.6 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| LQRمع تثقيل مصفوفة الطاقة | 4.415 | 2.277 | $3.63*10^{-7}$ |
| التحكم الانزلاقي | 0.052 | 0.053 | 1500 |

يبين الجدول (2) المقارنة بين مواصفات الأداء لأنماط التحكم المختلفة من أجل الاضطراب الخطوي.

**الجدول (2) مقارنة مواصفات الأداء للمنظم التربيعي الخطي والمتحكم الانزلاقي والنظام السلبي عند تعرض السيارة لاضطراب خطوي**

| | إزاحة الكرسي (cm) | زمن الاستقرار(sec) | أعظم قيمة لإشارة التحكم(N) |
|---|---|---|---|
| النظام السلبي | 7.646 | 2 | _ |
| LQR مع تثقيل مصفوفة الأداء | 4.276 | 0.7 | 533.5 |
| LQRمع تثقيل مصفوفة الطاقة | 7.646 | 2 | $1.04*10^{-6}$ |
| التحكم الانزلاقي | 1.099 | 0.5 | 1500 |

يبين الجدول (3) المقارنة بين مواصفات الأداء لأنماط التحكم المختلفة من أجل الاضطراب النبضي.

**الجدول (3) مقارنة مواصفات الأداء للمنظم التربيعي الخطي والمتحكم الانزلاقي والنظام السلبي عند تعرض السيارة لاضطراب نبضي**

| | إزاحة الكرسي (cm) | زمن الاستقرار(sec) | أعظم قيمة لإشارة التحكم(N) |
|---|---|---|---|
| النظام السلبي | 51.783 | 2 | _ |
| LQR مع تثقيل مصفوفة الأداء | 48.63 | 0.32 | 15478.9 |
| LQRمع تثقيل مصفوفة الطاقة | 51.783 | 2 | $12.55*10^{-5}$ |
| التحكم الانزلاقي | 33.624 | 0.76 | 1500 |

يتبين لدينا من الجداول (1)،(2)،(3) ما يلي:

1. قدم التحكم الانزلاقي أفضل أداء من حيث تقليل الإزاحة وزمن الاستقرار من أجل جميع أنواع الاضطرابات بسبب متانته وقدرته العالية على رفض الاضطرابات.
2. ترافق الأداء العالي للتحكم الانزلاقي بتذبذب مستمر في إشارة التحكم وارتفاع كبير فيها وهذا يسبب جهداً كبيراً على المشغل لأن المتحكم الانزلاقي ذو قانون الوصول التقليدي يدفع النظام بقوة نحو سطح الانزلاق (s=0).
3. أعطى المنظم التربيعي الخطي عند تثقيل مصفوفة الأداء توازناً جيداً بين الطاقة والأداء.
4. أعطى المنظم التربيعي الخطي أداءً مطابقاً تماماً لأداء نظام التعليق السلبي عند تثقيل مصفوفة الطاقة بسبب اهتمامنا بتوفير الطاقة وبالتالي استهلاك قدرة قليلة من المشغل أي وجود إشارة تحكم ضعيفة.
5. كانت إشارة التحكم في المنظم التربيعي الخطي عند تثقيل مصفوفة الطاقة ذات قيمة صغيرة جدا وهذا ما جعلنا نحصل على أداء مماثل لنظام التعليق السلبي.

## 5.الاستنتاجات والتوصيات:

### 1.5 الاستنتاجات:

1. استخدام خوارزميات التحكم المتين كالتحكم الانزلاقي في أنظمة التعليق النشطة يعطي أداءً ممتازاً.
2. استخدام المنظم التربيعي الخطي مع تثقيل مصفوفة الأداء يعطي أداءً جيداً لكنه يترافق مع زيادة في الطاقة المبذولة للحصول على هذا الأداء إلا في حالة الاضطراب النبضي كانت كفاءته أقل بسبب أن الاضطراب النبضي يمد النظام بطاقة مركزة في زمن قصير جداً.
3. استخدام المنظم التربيعي الخطي مع تثقيل مصفوفة الطاقة يعطي أداءً مماثلاً لنظام التعليق السلبي بسبب التركيز على توفير الطاقة وبالتالي نحصل على إشارة تحكم ضعيفة.
4. الاضطراب النبضي هو أسوأ أنواع الاضطرابات التي يمكن أن تتعرض لها السيارات بينما كان الاضطراب نصف الجيبي أقلها تأثيراً لأن الاضطراب النبضي يمد النظام بطاقة مركزة في زمن قصير جداً، بينما الاضطراب النصف جيبي يوزع الطاقة على زمن أطول.

### 2.5 التوصيات:

1. استخدام خوارزميات التحكم المتين بأنماط مختلفة كنمط الوصول التشبعي أو نمط الوصول الأسي في الأنظمة شديدة اللاخطية والمشبعة بالاضطرابات كون استخدام القانون التقليدي سبب تذبذباً حاداً في إشارة التحكم.
2. تجريب خوارزميات تحكم متين أخرى على أنظمة التعليق.
3. استخدام المنظم التربيعي الخطي مع تثقيل مصفوفة الأداء عند القدرة على الحصول على نموذج رياضي خطي لنظام التعليق.
4. اختبار الأنظمة على أنواع أخرى مختلفة من الاضطرابات وأبرزها الاضطرابات العشوائية.

## References:

[1] R. Rajamani, *Vehicle dynamics and control*, 2th ed, USA: Springer, 2012.

[2] D. Hrovat, *Survey of advanced suspension developments and related optimal control applications*, 1th ed, USA: Springer, 2013.

[3] S. M. Savaresi, C. Poussot-Vassal, C. Spelta, O. Sename, and L. Dugard,* Semi-active suspension control design for vehicles*, 1th ed, London, UK: Elsevier, 2010.

[4] S. Rakheja & C. Subramanian,* Vehicle dynamics: Theory and application*, 2th ed, USA: CRC Press, 2015.

[5] A. S. I. Zinober,* Variable structure and sliding mode control*, 2th ed, London, UK: Springer, 2017.

[6] M. H. Korayem, A. Nikoobin, and S. H. Hashemi, "Robust sliding mode control for uncertain nonlinear systems with disturbances," *Journal of Control, Automation and Electrical Systems,* vol. 26, no. 5, pp. 540–552, 2015.

[7] A. G. Mamalis, D. E. Manolakos, and K. G. Nikolakopoulos, "Evolution of vehicle suspension systems: From passive to active and adaptive technologies," *International Journal of Vehicle Design,* vol. 79, no. 1, pp. 1–25, 2019.

[8] M. A. F. Al-Garni, A. M. Al-Shammari, and A. A. Al-Mutairi, "Analysis and characterization of passive suspension systems for road vehicles," *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research,* vol. 9, no. 3, pp. 345–352, 2020.

[9] Y. Wang, C. Wang, S. Zhao, and K. Guo, "Research on deep reinforcement learning control algorithm for active suspension considering uncertain time delay," *Sensors,* vol. 23, no. 18, pp. 1–20, 2023.

[10] M. A. Khan and M. I. Tiwana, "Optimal LQR-based state feedback control for linearized dynamic systems," *International Journal of Control, Automation and Systems,* vol. 18, no. 4, pp. 1021–1032, 2020.

[11] K. Ogata,* Modern control engineering,* 5th ed, USA: Prentice Hall, 2010.

[12] M. H. Khooban and T. Niknam, "Advanced sliding mode control strategies for nonlinear uncertain systems: A review," *ISA Transactions,* vol. 113, pp. 1–15, 2021.

[13] A. K. Mishra and S. Janardhanan, "Sliding mode control design for nonlinear second-order systems using classical and improved reaching laws," *ISA Transactions,* vol. 124, pp. 350–362, 2022.