

النمذجة الديناميكية والتحكم لنظم الرافعات الصلبة

*رمضان السنوسي¹, *وليد محمد²

¹قسم الهندسة الميكانيكية - كلية الهندسة - جامعة درنه - ليبيا - r.zakri@uod.edu.ly

²قسم الهندسة الميكانيكية - كلية الهندسة - جامعة درنه - ليبيا - waledbosalh@gmail.com

الملخص

في هذه الورقة تم التطرق للنماذج الرياضية التي تُحاكي بها المنظومات الديناميكية، وتصنيفها، وشرح تطبيقاتها وكفاءة كل طريقة وحدود استخدامها، كما تم عمل صياغة عامة لنموذج رياضي يستخدم لأكثر الروافع انتشاراً في المصانع وهو الونش القنطري. وتم التأكد من صحة هذا النموذج بطريقتين، وتم التحقق أن كل من الطريقتين تصل إلى نفس النموذج الرياضي، بتبسيطه إلى مجموعة من المعادلات الخطية عن طريق متغيرات الحالة. وقد استخدم طريقة تحريك الجذور مع إضافة متحكم تكاملي لتحريك الونش من موضع بداية رفع الحمل حتى موضع اسقاطه مع الاحتفاظ بأقل اهتزاز للحمل، وتم محاكاة حركة الونش باستخدام برنامج MatLab

الكلمات المفتاحية: النمذجة، الونش، المحاكاة، اهتزازات ميكانيكية، متغيرات الحالة

المقدمة

النمذجة الديناميكية والتحكم لنظم الروافع الجاسئة هو من الموضوعات التي مازال يتم تطويرها حتى الوقت الحالي نظراً لما لها من أهمية كبيرة في العمليات الصناعية، حيث تستخدم في نقل البضائع في الموانئ وكذلك في خطوط الإنتاج الطويلة، ولها استخدامات متعددة، كما أن أي مصنع لا بد أن يوجد فيه نوع من أنواع الونش [2].

ولدراسة هذا الموضوع لا بد من الإلمام بمجموعة من المقررات الدراسية التي تم دراستها سابقاً مثل ديناميكا الأجسام الجاسئة والاهتزازات ونظرية الماكينات والتحكم الأوتوماتيكي، ويتطور التكنولوجيا يمكننا التحكم في حركة الونش والحصول على أعلى كفاءة بأقل زمن ممكن.

علم التحكم الأوتوماتيكي والذي يعتبر عصب الصناعات الحديثة والتكنولوجية المتقدمة الموجودة في الوقت الحالي من العلوم المهمة، حيث يمكن التصميم بإحدى الطريقتين

طريقة التحليل وفيها يكون هيكل النظام محدداً مسبقاً ويتم تحديد بارامتراته بواسطة النماذج الرياضية أو المحاكاة.

طريقة التخليق وفيها يجري اختيار أفضل هيكل النظام وبارامتراته تبعاً لشروط الأداء المطلوبة، وقد انتشر استخدام هاتين الطريقتين في الحياة العملية انتشاراً واسعاً، ويتكون نظام التحكم الأوتوماتيكي

من الوحدة المتحكم فيها وعناصر التحكم التي تؤثر على هذه الوحدة عند تغيير أحد أو بعض المتغيرات المتحكم فيها، وتتغير المتغيرات المتحكم فيها تحت تأثير إشارات الدخل (الإشارات المتحكممة أو إشارات التشويش)، ويتلخص هدف التحكم في تشكيل القوانين بحيث لا تختلف متغيرات الخرج المتحكم فيها عن قيمتها المطلوبة إلا في حدود المسموح به، ويصعب حل هذه المسألة في الكثير من الحالات بسبب وجود التشويشات العشوائية أو الضوضاء، وعند ذلك لا بد من اختيار قانون التحكم بحيث تمر إشارات التحكم عبر النظام بأقل تشويش ممكن، أما إشارات الضوضاء فيجب ألا تمر عملياً [3-10].

ويجري في الوقت الحالي تطوير طرق تحليل نظم التحكم الأوتوماتيكي اللاخطية، ويتعدّد تحليل نظم التحكم اللاخطية نتيجة للإخلال بمبدأ التراكب فيها، ولوجود عدد كبير من حالات الحركة المستقرة وغير المستقرة والذبذبات الذاتية تتعاقب تبعاً لتغير التأثير، ويصطدم المصممون بصعوبات أكبر عند حساب نظم التحكم الطرفية والنظم ذاتية الانضباط. ينتمي تحديد بارامترات النظام إلى مسألة التخليق، عندما يكون تركيب دائرته ومتطلبات أدائه ككل معروفة، ويمكن الحصول على حل لهذه المسألة عندما تكون الوحدة المتحكم فيها خطية باستخدام الطرق الترددية أو طريقة المحل الهندسي للجذور أو بدراسة مسارات جذور المعادلة المميزة للنظام المغلق، ويمكن اختيار نبيطة التصحيح بطريقة التخليق في طائفة الدوال الكسرية الجذرية لمتغير المركب بواسطة الطرق التحليلية البيانية. وتسمح نفس هذه الطرق بتخليق نباط تصحيح تكبت الذبذبات الذاتية والحالات الدورية غير المستقرة في النظم اللاخطية [1-7].

مما سبق نرى أن المرحلة الرئيسية في تصميم النظام، والتي تحدد طبيعته، هي الطرق التحليلية لتحليل وتخليق نظم التحكم، وبالتالي لكي نصمم نظام تحكم لأي منظومة يجب التقيد بوضع النموذج الرياضي للنظام على أساس الفروض المقترحة، وتبعاً لنوع النموذج (خطي أو لا خطي) يتم اختيار الطريقة الحسابية لتحديد البارامترات التي تحقق دلائل الاستقرار والدقة والجودة المطلوبة، ثم يجري بعد ذلك تدقيق النموذج الرياضي، ويتم تحديد العمليات الديناميكية في النظام باستخدام معدات المحاكاة الرياضية (حزم البرمجيات)، وتحديد المميزات (المنحنيات الخصائصية) الترددية عند تأثير إشارات الدخل مختلفة ثم تقارن مع المميزات (المنحنيات) الحسابية، بعد ذلك نعين احتياطي الاستقرار من الطور والكسب للنظام نهائياً، وتعين دلائل الجودة الرئيسية، يلي ذلك تحديد مميزات الدقة عند التأثير على النموذج بإشارات دخل (نمطية)، وعلى أساس هذه المحاكاة الرياضية توضع المتطلبات التكنيكية الخاصة بأجهزة النظام، ويجمع الأفضل من الأجهزة المصنوعة ويرسل لإجراء محاكاة طبيعية، ويتخذ القرار الخاص بصلاحية المضبط للعمل مع الوحدة الحقيقية الخاضعة للتحكم بناءً على

المميزات الناتجة من المحاكاة الطبيعية، ويجري الاختيار النهائي لبارامترات الضبط ومعدات ضبطه في الظروف الطبيعية عند التشغيل التجريبي لنظام التحكم [4].

الهدف من الورقة هو تصميم كنترول تحكم أوتوماتيكي لنقل الحمل من نقطة إلى أخرى مع أقل زاوية مرجحة للحمل، أي يجب أن تكون زاوية المرجحة قريبة من الصفر وكذلك التغير فيها يساوي صفر، وذلك حتى يكون الونش آمن ولا يحدث أي إضرار بالمتغيرات التي توجد في حيز الشغل وكذلك حتى لا يحدث أي إهدار للمواد المحملة وخصوصاً إذا كانت مواد حارقة.

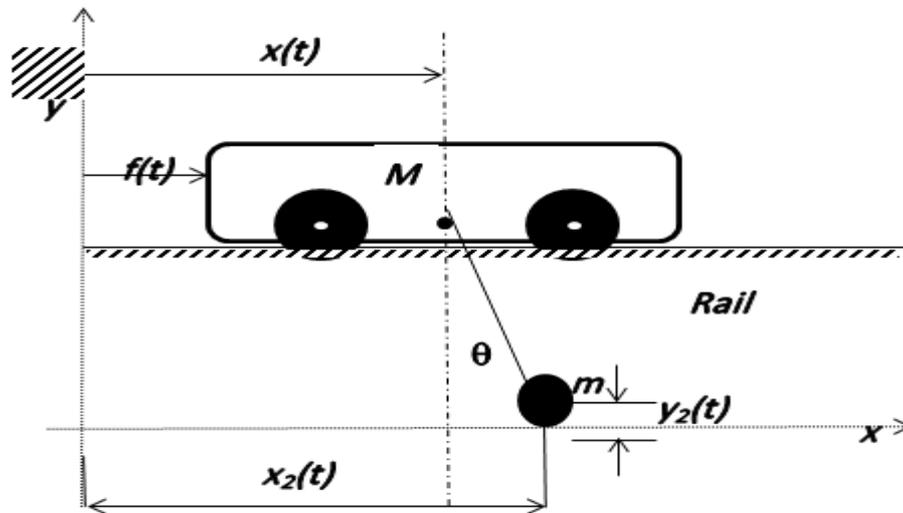
النمذجة الديناميكية للونش

طريقة نيوتن (Newton Method): وفيها نجد العلاقة بين القوى المسببة للحركة وشكل حركة الونش باستخدام قانون نيوتن الثاني: "معدل تغير كمية الحركة الخطية لجسم تساوي مجموع كل القوى المؤثرة عليه"، مع الأخذ في الاعتبار أن هذه العلاقة اتجاهية وتكون النمذجة بطريقة (Vector mechanics).

طريقة لاجرانج (Lagrange): وفيها نتعامل مع كميات قياسية لكل من طاقة الوضع وطاقة الحركة وعلاقة التغير فيهما بالنسبة للقوى المسببة للحركة، الهدف من استخدام الطريقتين هو الفهم الكامل لمواصفات الونش والتأكد من صحة النموذج الرياضي.

التحليل الكينماتيكي للمنظومة (kinematics):

تتحرك العربة في خط مستقيم اما الحمل يتحرك حركة مزدوجة كما موضح بالشكل (1)



الشكل (1) مخطط الرسم الحر للعربة والحمل

المسافة والسرعة والعجلة للعربة هم على الترتيب $x(t), \dot{x}(t), \ddot{x}(t)$ حيث $x(t)$ مقاسه من محاور

$$X_2(t) = X(t) + L\sin\theta \dots\dots\dots (1)$$

$$\dots\dots\dots(2)Y_2(t) = L(1 - \cos\theta)$$

$$\dots\dots\dots(3)a_x = \ddot{X} + L\ddot{\theta}\cos\theta - L\dot{\theta}\sin\theta$$

$$\dots\dots\dots(4)a_y = L\dot{\theta}^2\cos\theta - L\ddot{\theta}\sin\theta$$

المعادلة الاولى لحركة الونش

$$\left[M + m \left(1 - \frac{\mu}{\tan\theta} \right) \right] \ddot{X} + \left[m \left(1 - \frac{\mu}{\tan\theta} \right) L\cos\theta \right] \ddot{\theta}$$

$$\dots\dots\dots(5) - m \left(1 - \frac{\mu}{\tan\theta} \right) L\sin\theta \cdot \dot{\theta}^2 + \mu Mg = F(t)$$

المعادلة الثانية لحركة الونش

$$\dots\dots\dots(6) [M + m]\ddot{X} + mL\cos\theta\ddot{\theta} - mL\sin\theta \cdot \dot{\theta}^2 = F(t)$$

$$\dots\dots\dots(7) m\ddot{X} + \frac{mL}{\cos\theta} \ddot{\theta} + mg \tan\theta = 0$$

معادلات الحركة باستخدام لاجرانج (Lagrange):

$$\dots\dots\dots(8) \frac{d}{dt} \frac{\partial K.E}{\partial \dot{q}_1} - \frac{\partial K.E}{\partial q_1} + \frac{\partial D.E}{\partial \dot{q}_1} + \frac{\partial P.E}{\partial q_1} = Q_1$$

$$\dots\dots\dots(9) K.E = \frac{1}{2} M\dot{X}^2 + \frac{1}{2} m v^2$$

$$\dots\dots\dots(10) K.E = \frac{1}{2} [M + m]\dot{X}^2 + \frac{1}{2} mL^2\dot{\theta}^2 + mL\cos\theta \cdot \dot{X}\dot{\theta}$$

طاقة الوضع (potential energy):

$$\dots\dots\dots(11) P.E = mgh$$

$$\dots\dots\dots(12) \frac{d}{dt} \frac{\partial K.E}{\partial \dot{X}_1} - \frac{\partial K.E}{\partial X_1} + \frac{\partial P.E}{\partial X_1} = F$$

$$\dots\dots\dots(13) M\ddot{X} + \frac{mL}{\cos\theta} \ddot{\theta} + mg \tan\theta = 0$$

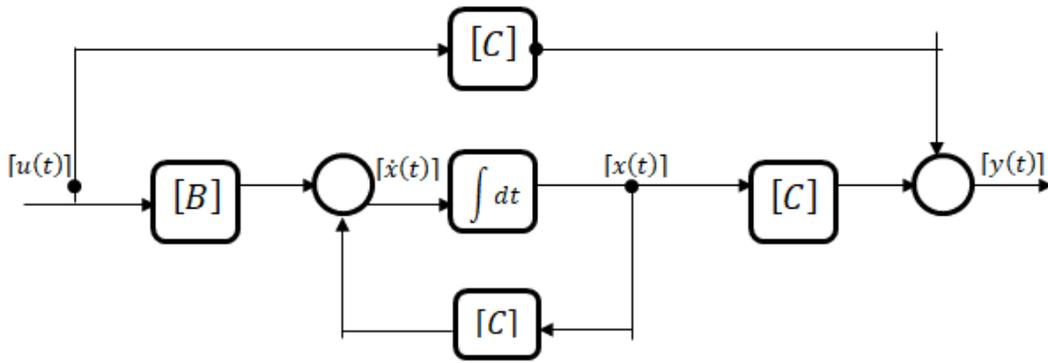
بمقارنة الطريقتين نجد أن المعادلتين (7,13) التي تم استنتاجهما عن طريق قانون نيوتن هما نفس المعادلتين

$$(M + m)\ddot{X}_1 + mL\ddot{\theta} - mL\theta \cdot \dot{\theta}^2 = F(t)$$

النمذجة بدلالة معادلات متغيرات الحالة:

عند التحليل باستخدام متغيرات الحالة نحن معنيين بثلاث أنواع من المتغيرات متغيرات الدخل ومتغيرات الخرج ومتغيرات الحالة ونقصد بحالة المنظومة هي أصغر مجموعة من المتغيرات بحيث عند معرفة هذه المتغيرات عند الزمن $t = t_0$ مع معرفة قيم الدخل عند $t \geq t_0$ يمكن تماماً معرفة التصرف الديناميكي للمنظومة عند أي زمن $t \geq t_0$. [9].

والشكل (2) يبين المخطط الصندوقي للمعادلات



الشكل (2) المخطط الصندوقي لمنظومة خطية ممثلة بمتغيرات الحالة

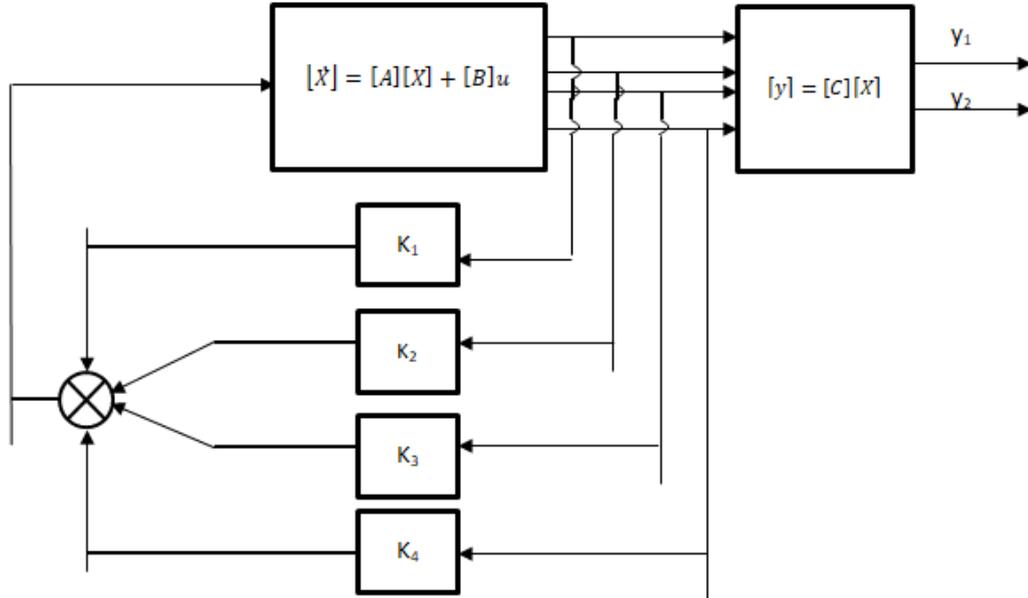
وبالتالي كل المتغيرات يسهل قياسها ويمكن وضع المعادلات في شكل متجه مصفوفه [5]

$$\dots\dots\dots(a) \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{(M+m)}{mL} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -\frac{m}{M}g & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{mL} \\ 0 \\ \frac{1}{M} \end{bmatrix} F(t)$$

$$\dots\dots\dots(b) \begin{bmatrix} \dot{X}_1 \\ \dot{X}_2 \\ \dot{X}_3 \\ \dot{X}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{M+m}{Ml} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -\frac{m}{M} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{-1}{Ml} \\ 0 \\ \frac{1}{m} \end{bmatrix}$$

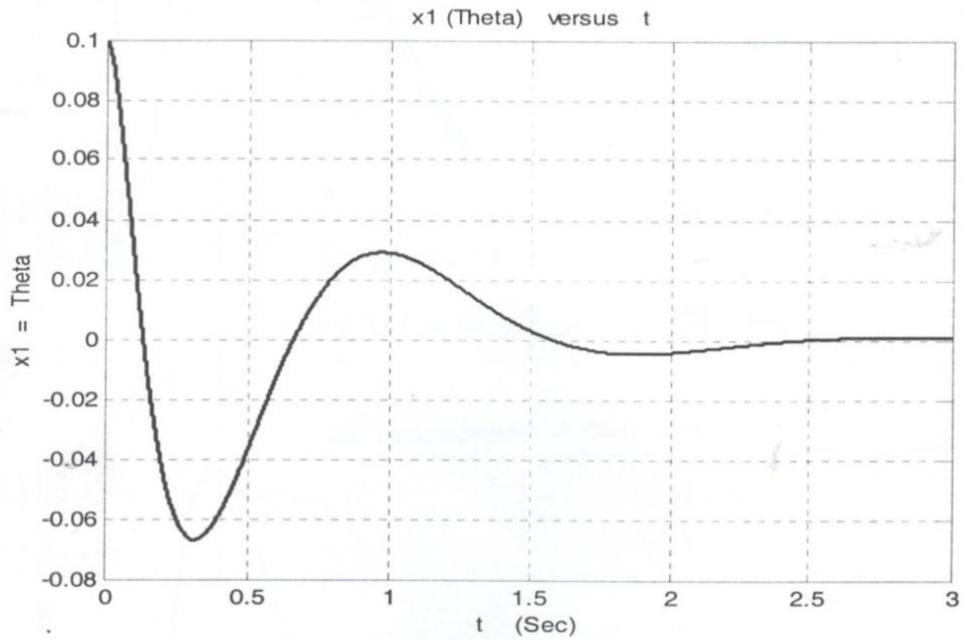
$$\dots\dots\dots \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \end{bmatrix}$$

ومن ثم يمكن تمثيلها بالمخطط الصندوقي الآتي

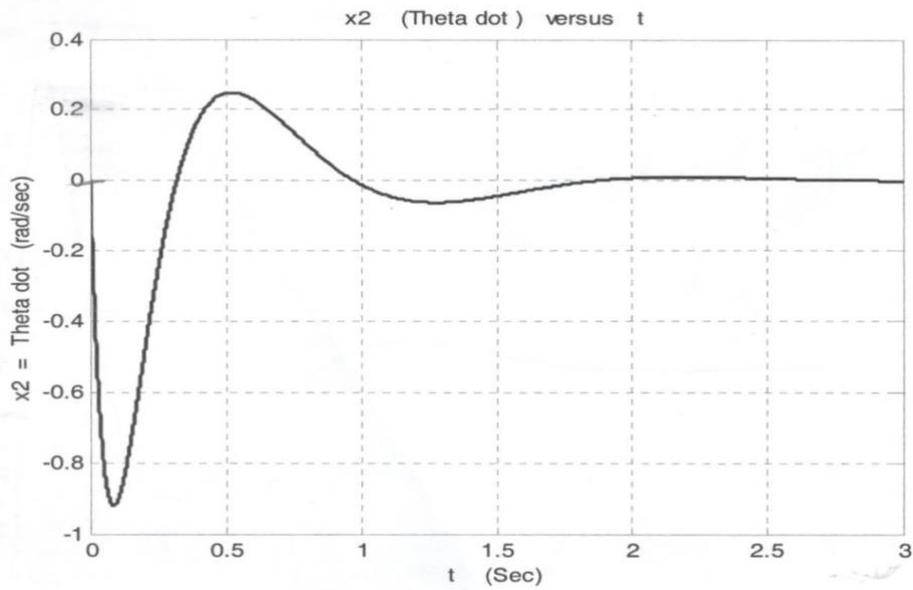


الشكل (3) المخطط الصندوقي للونش ذات تغذية خلفية مرتدة

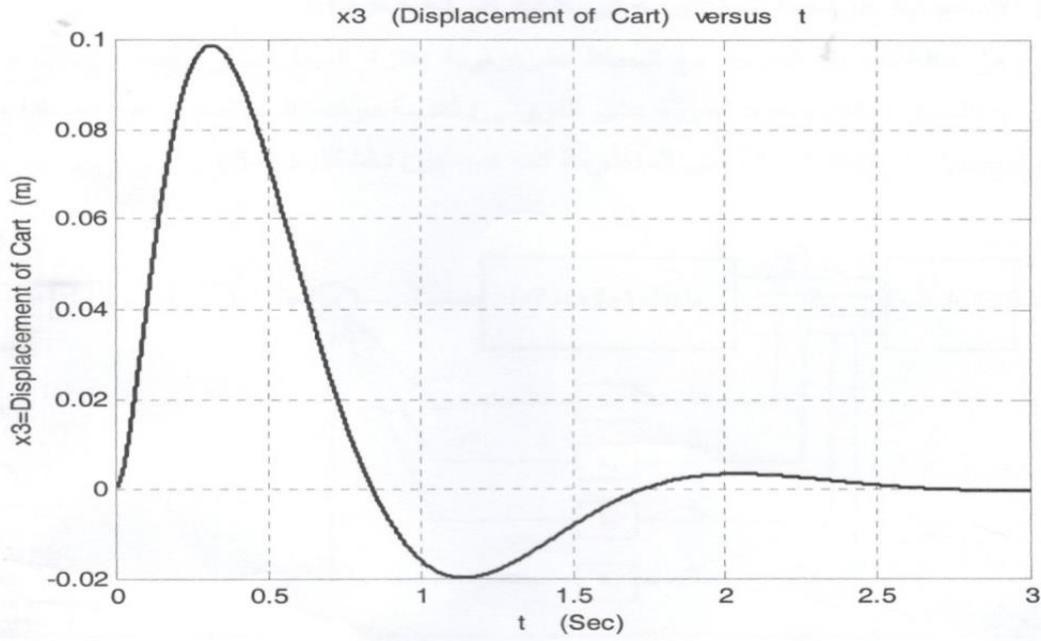
وبالتالي يمكن الحصول على منحنيات مقبولة وتعتمد على المعادلة المميزة للونش باستخدام Matlab نحصل على منحنيات مختلفة لنفس الشروط اذا تغيرت قيمه المعادلة المميزة وهي موضحة بالأشكال (7-6-5-4)



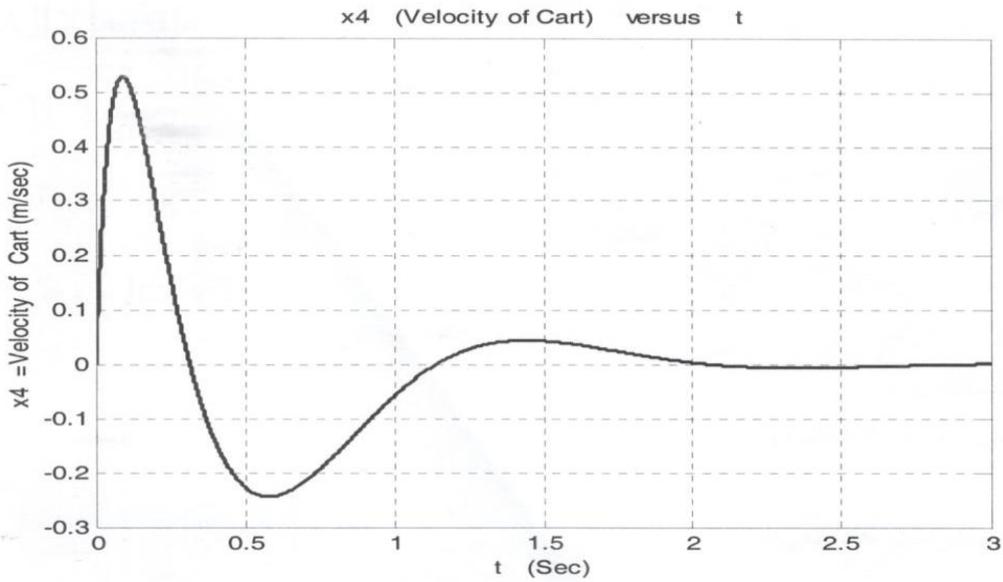
الشكل (4) يبين منحنى زاوية الاهتزاز للحمل



الشكل (5) يبين منحنى السرعة الزاوية لاهتزاز الحمل

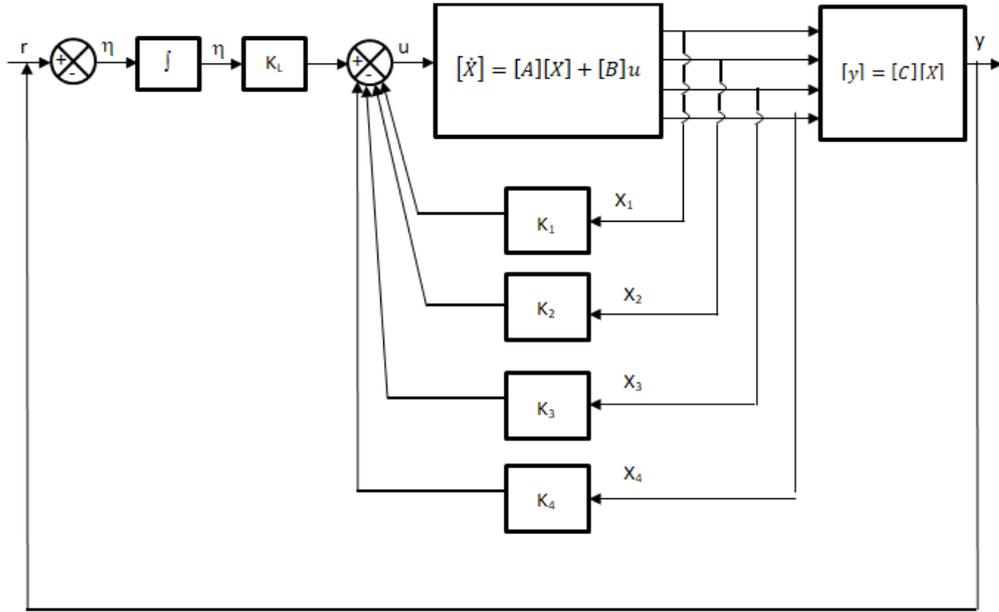


الشكل (6) يبين منحنى الازاحة للعربة



الشكل (7) يبين منحنى السرعة للعربة

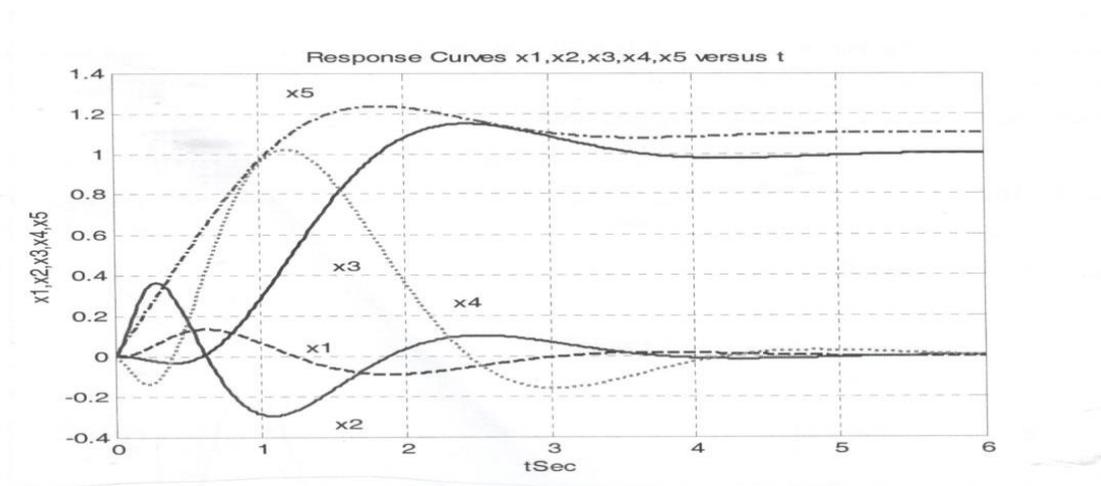
وفي حاله تحريك العربة مع الحفاظ على زاوية اهتزاز الحمل تساوي صفر مع اضافة متحكم تكاملي في المسار الامامي للمنظومة كما هو مبين في الشكل (8)



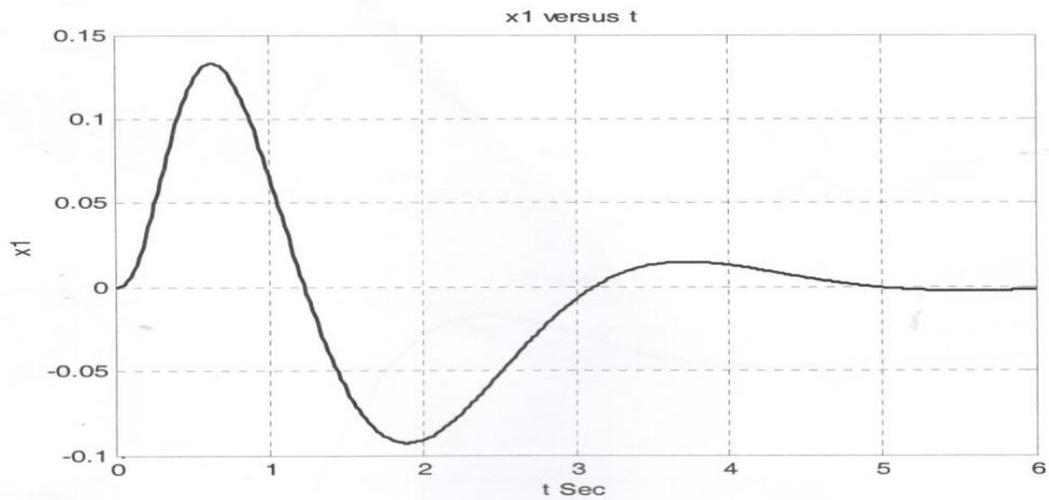
الشكل (8) ايبين لمخطط الصندوقي للونش عند إضافة مكامل

وبمجرد معرفه مصفوفة الكسب وثابت الكسب التكاملي يمكن الحصول على منحنى الاستجابة للونش
نتيجة دخل دالة الخطوة (Unit Step Input):

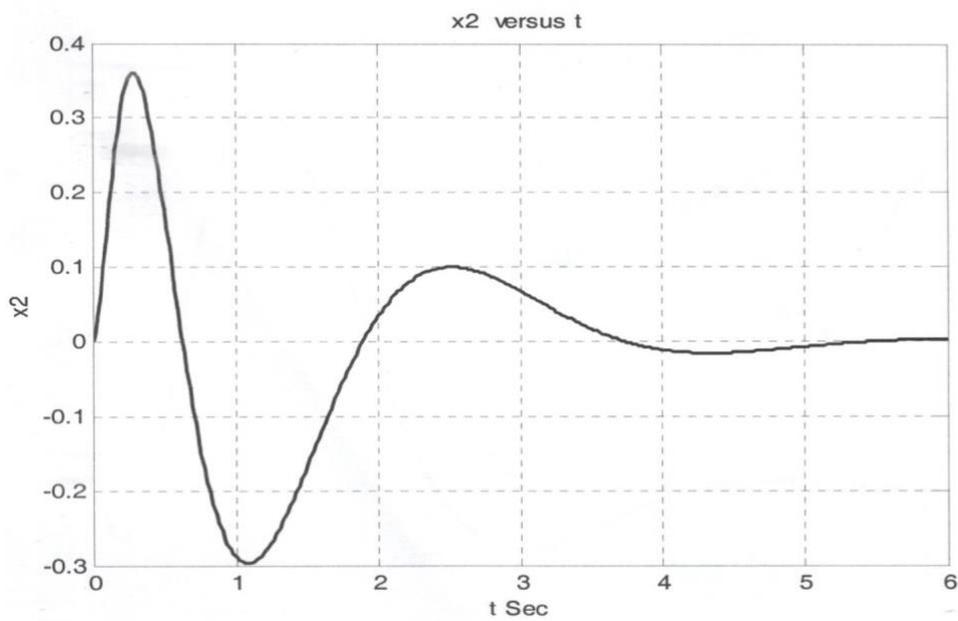
$$\begin{bmatrix} \dot{X}_1 \\ \dot{X}_2 \\ \dot{X}_3 \\ \dot{X}_4 \\ \dot{\eta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -137.0326 & -35.3733 & -56.0652 & -36.7466 & 50.9684 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 78.3263 & 17.6867 & 28.0326 & 18.3733 & -254842 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \\ \eta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} r$$



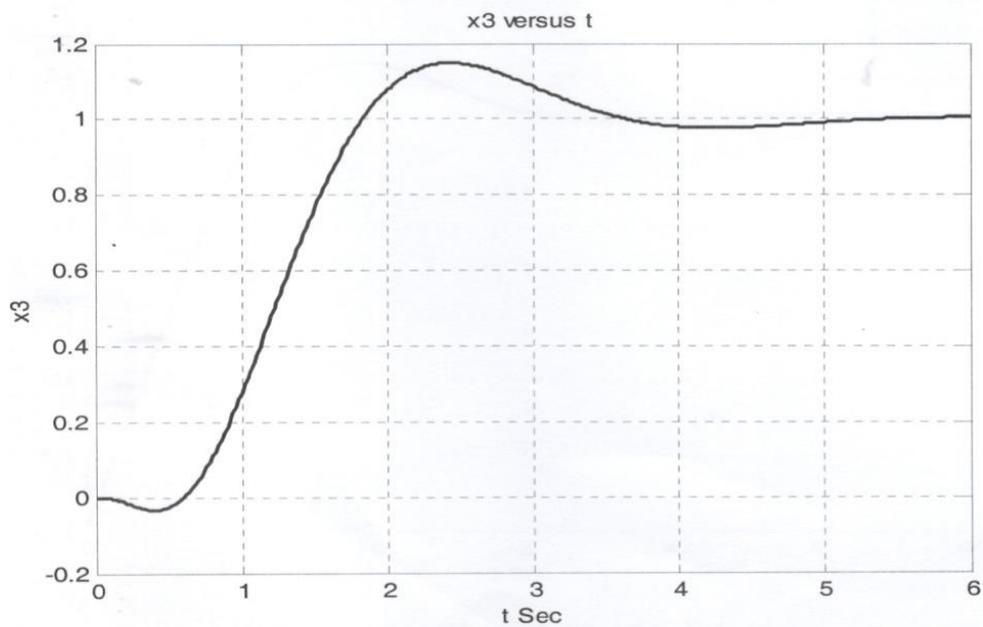
الشكل (9) يبين منحنى الاستجابة الزمنية للونش



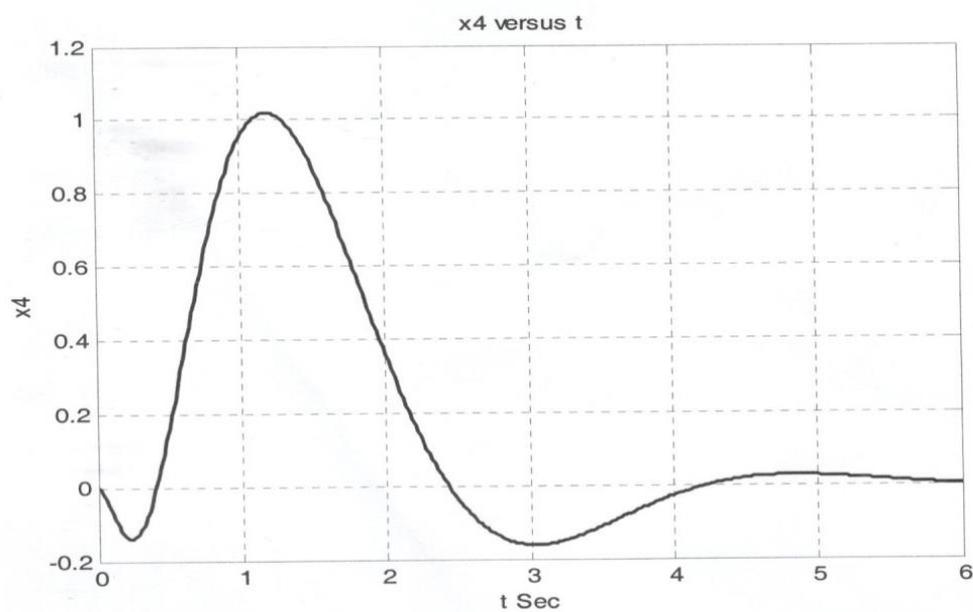
الشكل (10) يبين منحنى زاوية اهتزاز الحمل اثناء حركة العربة



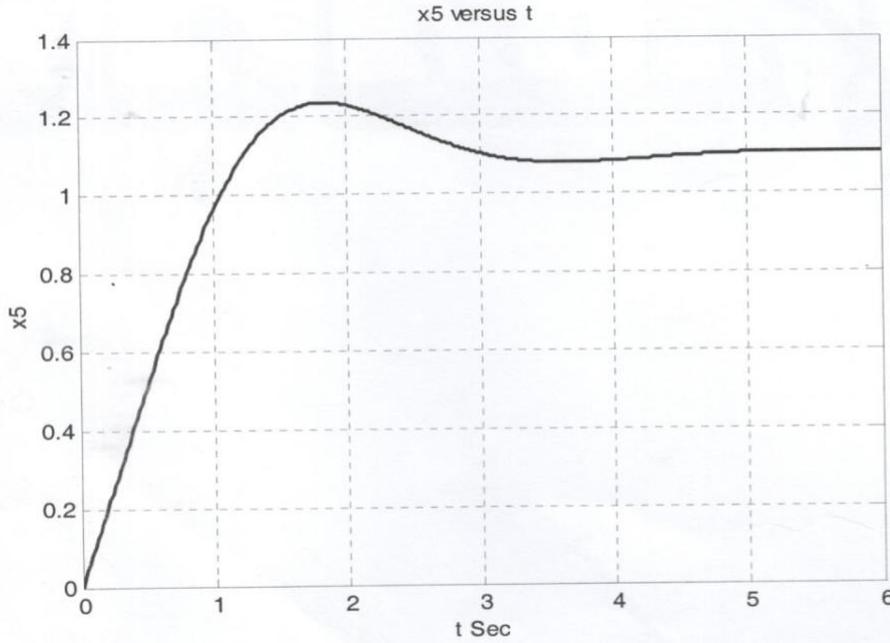
الشكل (11) يبين منحنى السرعة الزاوية لاهتزاز الحمل اثناء حركة العربة



الشكل (12) يبين منحى ازاحة العربة



الشكل (13) يبين منحى سرعة العربة



الشكل (14) يبين منحنى التغير في خرج المكامل

الاستنتاجات والتوصيات

من الدراسة السابقة للونش القنطري تم التعرف على أن النمذجة الديناميكية لأي منظومة من الأهمية أن تكون دقيقة وصحيحة حيث تعتمد عليها عمليات التحكم في المنظومات، ووجد أن الاستنتاج الرياضي (Analytical) للنموذج عن طريق الديناميكا الحسابية والتي تعتمد على قيم عددية أسهل وأقل في خطوات الحل ويعطي معنى واقعي وإحساس للمهندس بالمتغيرات بعكس ذلك النوع الذي يعتمد على المتغيرات المتجهة، وهذا ما تم الإحساس به من طريقي لاجرائي الرياضية وطريقة نيوتن الاتجاهية التي تم تنفيذها على الونش القنطري ، وهذا يدعو إلى الاهتمام بالديناميكا المتقدمة للتعامل مع مختلف المنظومات الموجودة في الصناعة.

النموذج الديناميكي الذي يأخذ في اعتباره جميع قوى الإثارة الخارجية أو الداخلية، والزخم الداخلي أو الخارجي مثل قوى الرياح، قوى عدم توازن الأجسام المتحركة، القوى المتولدة عن مرونة الأجسام، قوى الاحتكاك، هذا النوع من النماذج يتعرض لعلاقات لاخطية بدورها تؤدي إلى نموذج رياضي معقد يصعب التعامل معه، وأحياناً يستحيل نمذجة هذه الأنواع المعقدة من القوى. صعوبة وتعقيد النموذج الرياضي اللاخطي يصطدم بطرق التحكم التقليدية التي تعتمد أساساً على نظريات خطية.

ولهذا اتجه الباحثين إلى تبسيط النموذج الرياضي اللاخطي إلى نموذج خطي يتناسب مع طرق التحكم التقليدية المختلفة، ولكن هذا النوع من النماذج يصطدم مع كفاءة المتحكمات الخطية؛

ولذلك اتجه بعض الباحثين إلى تصميم استراتيجيات للتحكم في الأوناش تعتمد أساساً على النماذج اللاخطية، وبعضهم بدأ يستغني عن النموذج الرياضي ويتحكم في الونش كما يتحكم فيه العامل بمناوراته للحصول على أقل اهتزاز وأقل زمن للوصول إلى الهدف المطلوب بطرق حديثة مثل التحكم بالفازي المنطقي (F.L.C) أو الشبكات العصبية (A.N.N).ومن خلال هذة الورقة نوصي بالتالي:

بما أنه تمت دراستنا على حركة الونش في مستوى حركة واحد فبالتالي عند وجود أي تشويش خارج هذا المستوى يفشل الونش في أداء وظيفته، ولهذا نوصي بدراسة الاهتزاز البندولي للحمل في أكثر من مستوى.

- ادخال مصادر اللاخطية إلى النموذج الديناميكي كقوى الاحتكاك وقوى مرونة الدعامات التي يتحرك عليها الونش، وكذلك نأخذ في الاعتبار استطالة الكبل الخاص برفع الحمل واسقاطه.
- تطبيق طرق التحكم التقليدية والحديثة وعقد مقارنات بينهم

قائمة المراجع

1. Patel, N .V. ; Tandon, N.; Pandey, K. R., Experimental Study for Vibration Behaviors of ocaly Defective Deep Groove Ball Bearings under Dynamic Radial Load , Hindawi Publishing Corporation , Volume 2014, 7.
2. d'Andrea-Novel, B. and Boustany, F., 1991b, "Control of an overhead crane: Feedback stabilization of an hybrid PDE-ODE system," in proceedings of the 1st European Control Conference ECC91, Grenoble, France, pp. 2244-2249.
3. d'Andrea-Novel, Boustany, F. and Conard, F., 1990, "Control of an overhead crane: Stabilization of flexibilities," in Boundary Control and Boundary Variation: Proceedings of the IFIP WG7.2 Conference, Sophia Antipolis, France, pp. 1-26.
4. d'Andrea-novel, B., Boustany, F., Conard, F., and Rao, B.P., 1994, "Feedback stabilization of a hybrid PDE-ODE system: Application to an overhead crane," Mathematics of Control, Signals system 7, 1-22.
5. Chin, C., Nayfeh, A.H., and Mook D.T., 1998, "Dynamics and control of ship mounted crane," in Proceedings of the 39th Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, Long Beach, CA, AIAA-98-1731.

6. Hubbell, J. T., Koch, B., and McCormik, D., 1992, "Modem crane control enhancements," in Ports 92m Seattle, WA, PP.757-767.
7. Beeston, W., 1969, "Closed-loop time optimal control of a suspended load: a design study in Proceedings of the IFAC 4th World Congress, Warsaw, Poland, Paper No 39.5, pp.85-99.
8. Field, J.A., 1961, "The optimization of the performance of an .ore bridge," Transactions of the Engineering Institute of Canada 5(3), 163-169.
9. Zinober, A.S.I. and Fuller, A. T., 1973, "The sensitivity of nominally time-optimal control of system to parameter variation," International Journal of Control 17, 673-703.
10. Yoon, J.S., Park, B.S., Lee, J.S., 1995, "Various control schemes for implementation of the anti-swing crane," in Proceedings of the ANS 6th Topical Meeting on Robotics and remote system, Monterey, CA, pp.472-479.
11. Ridout, A.J., 1987, "New feedback control system for overhead cranes," in proceeding of the Electric Energy Conference, Adelaide, Australia, Vol, pp.135-140.
12. Ridout, A.J., 1989, "Anti-swing control of the overhead crane using linear feedback," Journal of Electrical and Electronic Engineering, Australia 9 (1/2) 17-26.