



السيطرة على اهتزاز الحمولة في الرافعة الزراعية باستخدام مسيطر تناسبي تكاملي تفاضلي

فارس طلال عباس¹، توفيق المسعود^{2*}

¹ قسم هندسة التصميم والانتاج، كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية، جامعة البعث، حمص، سورية، fares.t.abbas@gmail.com

² قسم هندسة التصميم والانتاج، كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية، جامعة البعث، حمص، سورية، pmassoud63@gmail.com

* الباحث الممثل: فارس طلال عباس، fares.t.abbas@gmail.com

نشر في: 30 ايلول 2020

الخلاصة – الرافعة الزراعية نوع من الآلات تستخدم بشكل أساسي لرفع أو خفض المواد أو الأشياء الثقيلة ونقلها إلى أماكن أخرى، وتستخدم في أعمال البناء وفي تركيب الآلات الضخمة مثل العنفات الريحية وفي المرافئ، وتعتبر عنصراً أساسياً في العمليات الإنتاجية المتكاملة. وبسبب الحمولات الكبيرة التي تنقلها هذه الروافع أصبح من الضروري معرفة سلوكها قبل الإستثمار من خلال دراسة حركاتها ودراسة اهتزاز الحمولات والعمل على تخفيضها قدر الإمكان وبالتالي إطالة عمر مكونات الرافعة وزيادة مردودها. من هنا برزت الحاجة لتصميم نظام تحكم مهمته تخميد اهتزاز الحمولة للحد من تأثير القوى الديناميكية على أجزاء الرافعة. تم في هذا البحث إعداد النموذج الرياضي الممثل للنموذج الميكانيكي للرافعة، وحل النموذج باستخدام برنامج (MATLAB)، ثم تصميم متحكم تناسبي تكاملي تفاضلي للرافعة الزراعية.

الكلمات الرئيسية – الرافعة الزراعية، اهتزاز الحمولة، النموذج الرياضي، متحكم تناسبي تكاملي تفاضلي، ماتلاب.

1. المقدمة

وأجريت دراسة في عام (2016) لتخميد اهتزاز الحمل في الرافعة الزراعية تم فيها استخدام أسلوب تحكم من درجتي حرية، إذ قام الباحث بتصميم متحكم بطريقة التغذية الأمامية بحيث يتم الاستغناء عن الحساسات [7].

وفي عام (2016) قام الباحثون (Ilir Doçi, Beqir Hamidi and Shpetim Lajqi) باستخدام النمذجة والمحاكاة للتحكم بالرافعة الزراعية في حالة الحركة الشاقولية فقط للذراع [8].

وفي عام (2019) قام الباحثون (He Chen, Yongchun Fang and Ning Sun) باستخدام طريقة التحكم التتابعي لتخميد اهتزاز الحمل في الرافعة البرجية [5].

من خلال الدراسات السابقة نلاحظ بأنه تم استخدام التحكم التقليدي للتحكم في الرافعة واستخدام معادلات مبسطة لحركات الرافعة وعلى أساس هذا النموذج تم تصميم المتحكمات، في هذا البحث سنقوم باقتراح نموذج رياضي يكون ممثلاً للنموذج الميكانيكي للرافعة ومن ثم تصميم المتحكمات المناسبة.

3. منهجية البحث

تم في هذا البحث إجراء الدراسة على الرافعة الزراعية ذات المواصفات الموضحة في الجدول (1).

جدول 1: مواصفات الرافعة الزراعية المدروسة

الموصوفة	العنصر
50 m	طول الذراع
10000 Kg	كتلة الذراع
15000 Kg	كتلة الحمولة
81 KW	استطاعة محرك رفع الذراع
60 KW	استطاعة محرك دوران الذراع

سننظر بلمحة سريعة عن الرافعة الزراعية، وكيفية إيجاد النموذج الرياضي الممثل للنموذج الميكانيكي لها، ومن ثم تصميم نظام التحكم للرافعة المدروسة.

صممت الرافعة الزراعية لتلبية الاحتياجات الصناعية و أماكن العمل في ضوء الحاجة لرفع الأحمال الثقيلة. ومن هنا أصبحت دراسة الحمولات الديناميكية التي تظهر في الإنشاء المعدني للرافعة أثناء عمل الرافعة ذات أهمية كبيرة. فكان على الباحث إيجاد الحلول التصميمية المثلى للتخفيف من هذه الحمولات مما يضمن عمر أطول للرافعة وأداء أفضل.

تنشأ الحمولات الديناميكية التي تؤثر في عناصر آلية الرفع والإنشاء المعدني للرافعة أثناء عمل الرافعة وخاصة أثناء حركة الذراع سواء كانت الحركة الأفقية للذراع أو الحركة العمودية للذراع أو الحركة العمودية والأفقية معاً. ينتج عن هذه الحركات لذراع الرافعة اهتزاز الحمل أثناء عمل الرافعة ويعتبر هذا الاهتزاز هو المشكلة الكبرى التي نواجهها عند استثمار الرافعة [9].

فبعد استثمار الرافعة تكون الانتاجية العالية مطلوبة، ولكن الانتاجية العالية تتطلب العمل بأسرع ما يمكن أي تحريك الحمولة بسرعة عالية نسبياً مما يؤدي إلى اهتزاز الحمل أثناء الحركة وبالتالي الحصول على سلوك ديناميكي خطير قد يؤدي في بعض الحالات إلى انهيار أجزاء من آلية الرفع.

2. الدراسات السابقة

الكثير من الأبحاث خلال السنوات الماضية ركزت على نمذجة ومحاكاة عمل الروافع وتصميم المتحكمات لها وذلك نتيجة لاستخداماتها الواسعة في أماكن العمل المختلفة، كما أن عملية النمذجة والمحاكاة تكون مفيدة في معرفة أداء الرافعة وموفرة للتكلفة قبل عملية التصميم النهائي للرافعة وتصنيعها. لدى الرجوع إلى الأبحاث المنشورة في هذا المجال نجد أنه في البحث [11] قام الباحث باقتراح نموذج رياضي للرافعة وتصميم متحكم من أجل تخميد الاهتزازات الناتجة عن الحركة الأفقية فقط للذراع الرافعة، واستخدم الباحث طريقة تحكم الحلقة المفتوحة.

وفي البحث [4] فقد قام الباحث بتصميم متحكم تناسبي تكاملي للتحكم بالرافعة (P-PI Controller) مستخدماً نظريات التحكم ذات التغذية العكسية لتنظيم الخطأ بوجود الاضطرابات الخارجية.

m: الكتلة ، v: السرعة
(U) الطاقة الكامنة وتعطى بالعلاقة:

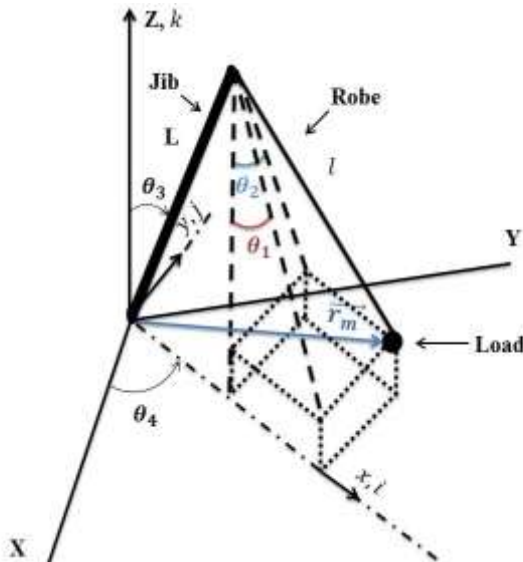
$$U = -W \quad (3)$$

W: العمل المبذول

(Q_i): القوى و العزوم العاملة ، i : عدد درجات حرية النظام
q_i: إحداثيات النظام المدروس.

3.2.2 إحداثيات كتلة الحمل:

إن الرافعة المدروسة لديها أربع درجات حرية، إذ يتحرك الذراع بزاوية θ_3 عن المحور z مسبباً انتقال الحمولة ضمن المستوي (x, y)، ويدور الذراع أيضاً بزاوية θ_4 حول المحور z ، وتتأرجح الحمولة المعلقة بحبل طوله l في الفراغ ليشكل زاويتي تأرجح مع الوضع الشاقولي للحبل، وهما θ_1 زاوية تأرجح الحبل مع المحور x ، والزاوية θ_2 زاوية تأرجح الحبل مع الحمولة على المحور y ، كما هو مبين في الشكل(2).



شكل 2: نموذج تخطيطي لحركة الرافعة
المصدر: إعداد الباحث

من الشكل (2) يمكن كتابة شعاع الموضع للحمولة كالتالي:

$$\vec{r}_m = (L \cdot \sin\theta_3 + l \cdot \cos\theta_2 \cdot \sin\theta_1)\vec{i} + (l \cdot \sin\theta_2)\vec{j} + (l - l \cdot \cos\theta_1 \cdot \cos\theta_2)\vec{k} \quad (4)$$

3.2.3 سرعة الحمولة:

سرعة الحمولة تحسب وفق العلاقة التالية [1]:

$$\vec{v}_m = \frac{d\vec{r}_m}{dt} + \vec{\omega} \times \vec{r}_m \quad (5)$$

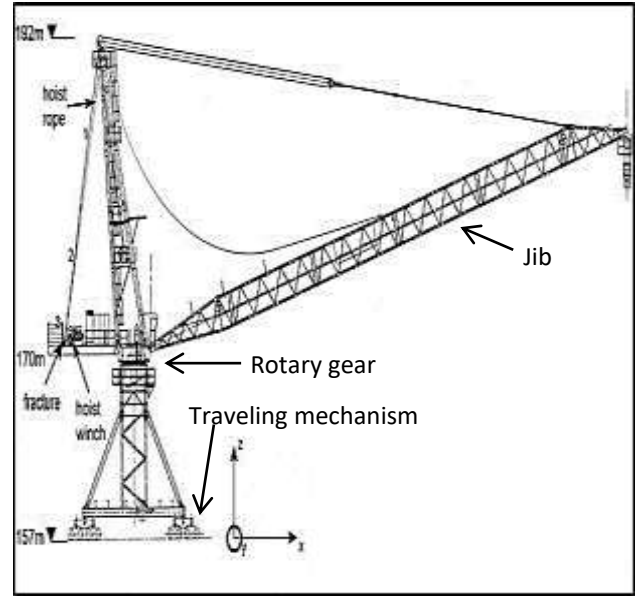
حيث $\vec{\omega} = \theta_4 \vec{k}$ هي السرعة الزاوية لدوران الذراع .

ومنه نجد:

تم بناء النموذج باستخدام برنامج MATLAB وفق بيئة SIMULINK والحصول على مخططات تصف لنا ديناميك الرافعة من خلال مخططات الانتقال والسرعة و اهتزاز الحمولة.

3.1 الرافعة الذراعية

تتألف الرافعة الذراعية من الهيكل المعدني للرافعة ومنظومة مسير الرافعة و وحدة الرفع المسؤولة عن رفع الحمولة بالاتجاه الشاقولي و وحدة الانتقال الأفقي المسؤولة عن حركة الذراع الأفقية و وحدة الانتقال الشاقولي المسؤولة عن حركة الذراع الشاقولية كما هو موضح بالشكل (1).



شكل 1: رسم توضيحي للرافعة الذراعية
[2]

ولدراسة السلوك الديناميكي لنظام الرافعة تم استخدام النمذجة الرياضية لحل المشاكل الهندسية الناتجة أثناء عملها بهدف تحسين أداء الرافعة.

3.2 النموذج الرياضي للرافعة الذراعية:

من خلال بناء النموذج الرياضي نستطيع تمثيل النموذج الميكانيكي الواقعي، و يوجد عدة طرق لايجاد النموذج الرياضي من هذه الطرق طريقة معادلات لاغرانج.

3.2.1 طريقة معادلات لاغرانج:

تستخدم طريقة معادلات لاغرانج لمعالجة الأنظمة الديناميكية وإيجاد المعادلات الرياضية المنظمة لحركتها. وتعتمد في أساسها على حساب الطاقة الحركية والطاقة الكامنة والعمل المبذول وتمثيل هذه الكميات بواسطة كميات سلمية. وإيجاد هذه المعادلات نحتاج إلى عدد من الإحداثيات العامة والمساوية لعدد درجات الحرية للنظام المدروس، وتعطى معادلات لاغرانج بالعلاقة التالية [13]:

$$\frac{d}{dt} \frac{dT}{dq_i} - \frac{dT}{dq_i} + \frac{dU}{dq_i} = Q_i \quad (1)$$

حيث أن:

(T) الطاقة الحركية الخطية وتعطى بالعلاقة:

$$T = \frac{1}{2} m \cdot v^2 \quad (2)$$

3.2.5 الطاقة الكامنة للنظام:

تعطى الطاقة الكامنة للنظام المدروس بالعلاقة [6]:

$$U = m \cdot g[l - l \cdot \cos\theta_1 \cdot \cos\theta_2] \quad (14)$$

g : تسارع الجاذبية الأرضية.

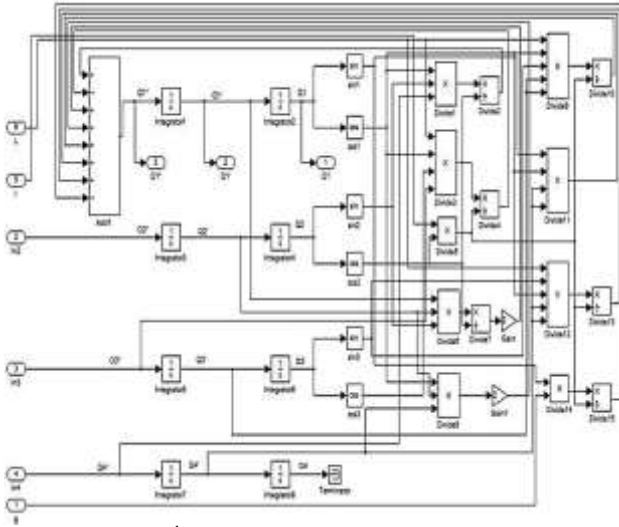
3.2.6 المعادلات الناظمة لحركة الرافعة و اهتزاز الحمولة:

بتطبيق معادلة لاغرانج (1) وتعويض ما سبق نحصل على المعادلات الممثلة للنظام:

المعادلة الأولى بدلالة المتحولين: θ_1, θ_2

$$\begin{aligned} & m \cdot l^2 \cdot \ddot{\theta}_1 \cdot \cos\theta_2^2 \\ & = 2m \cdot l^2 \cdot \dot{\theta}_1 \cdot \dot{\theta}_2 \cdot \sin\theta_2 \cdot \cos\theta_2 \\ & + m \cdot l^2 \cdot \ddot{\theta}_4 \cdot \cos\theta_1 \cdot \sin\theta_2 \cdot \cos\theta_2 \\ & + 2m \cdot l^2 \cdot \dot{\theta}_2 \cdot \dot{\theta}_4 \cdot \cos\theta_1 \cdot \cos\theta_2^2 \\ & - m \cdot L \cdot l \cdot \ddot{\theta}_3 \cdot \cos\theta_3 \cdot \cos\theta_1 \cdot \cos\theta_2 \\ & + m \cdot L \cdot l \cdot \dot{\theta}_3^2 \cdot \sin\theta_3 \cdot \cos\theta_1 \cdot \cos\theta_2 \\ & + m \cdot l^2 \cdot \dot{\theta}_4^2 \cdot \cos\theta_2^2 \cdot \sin\theta_1 \cdot \cos\theta_1 \\ & + m \cdot L \cdot l \cdot \dot{\theta}_4^2 \cdot \sin\theta_3 \cdot \cos\theta_1 \cdot \cos\theta_2 \\ & - m \cdot g \cdot l \cdot \sin\theta_1 \cdot \cos\theta_2 \end{aligned} \quad (15)$$

باستخدام برنامج (MATLAB/Simulink) تم تمثيل هذه المعادلة، والنموذج الرياضي الموضح لها مبين بالشكل الآتي:



شكل 3: النموذج الرياضي للمعادلة الأولى
المصدر: إعداد الباحث

المعادلة الثانية بدلالة المتحولين: θ_2, θ_3

$$\begin{aligned} & m \cdot l^2 \cdot \ddot{\theta}_2 \\ & = m \cdot L \cdot l \cdot \ddot{\theta}_3 \cdot \cos\theta_3 \cdot \sin\theta_1 \cdot \sin\theta_2 \\ & - m \cdot L \cdot l \cdot \dot{\theta}_3^2 \cdot \sin\theta_3 \cdot \sin\theta_1 \cdot \sin\theta_2 - m \cdot l^2 \cdot \ddot{\theta}_4 \cdot \sin\theta_1 \\ & - 2m \cdot l^2 \cdot \dot{\theta}_1 \cdot \dot{\theta}_4 \cdot \cos\theta_1 \cdot \cos\theta_2^2 - m \cdot L \cdot l \cdot \ddot{\theta}_4 \cdot \cos\theta_2 \cdot \sin\theta_3 \\ & - 2m \cdot L \cdot l \cdot \dot{\theta}_3 \cdot \dot{\theta}_4 \cdot \cos\theta_2 \cdot \cos\theta_3 - m \cdot l^2 \cdot \dot{\theta}_1^2 \cdot \sin\theta_2 \cdot \cos\theta_2 \\ & + m \cdot l^2 \cdot \dot{\theta}_4^2 \cdot \sin\theta_2 \cdot \cos\theta_2 \cdot \cos\theta_1^2 \\ & - m \cdot L \cdot l \cdot \dot{\theta}_4^2 \cdot \sin\theta_3 \cdot \sin\theta_1 \cdot \sin\theta_2 \\ & - m \cdot g \cdot l \cdot \cos\theta_1 \cdot \sin\theta_2 \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} & \frac{d\vec{r}_m}{dt} \\ & = (L \cdot \dot{\theta}_3 \cdot \cos\theta_3 - l \cdot \dot{\theta}_2 \cdot \sin\theta_2 \cdot \sin\theta_1 \\ & + l \cdot \dot{\theta}_1 \cdot \cos\theta_2 \cdot \cos\theta_1)\vec{i} + (l \cdot \dot{\theta}_2 \cdot \cos\theta_2)\vec{j} \\ & + (l \cdot \dot{\theta}_1 \cdot \sin\theta_1 \cdot \cos\theta_2 \\ & + l \cdot \dot{\theta}_2 \cdot \cos\theta_1 \cdot \sin\theta_2)\vec{k} \end{aligned} \quad (6)$$

وأيضاً:

$$\vec{\omega} \times \vec{r}_m = (-\dot{\theta}_4 \cdot l \cdot \sin\theta_2)\vec{i} + (\dot{\theta}_4 \cdot L \cdot \sin\theta_3 + \dot{\theta}_4 \cdot l \cdot \cos\theta_2 \cdot \sin\theta_1)\vec{j} + 0\vec{k} \quad (7)$$

وبالتالي:

$$\begin{aligned} & \vec{r}_m \\ & = (L \cdot \dot{\theta}_3 \cdot \cos\theta_3 - l \cdot \dot{\theta}_2 \cdot \sin\theta_2 \cdot \sin\theta_1 + l \cdot \dot{\theta}_1 \cdot \cos\theta_2 \cdot \cos\theta_1 \\ & - \dot{\theta}_4 \cdot l \cdot \sin\theta_2)\vec{i} \\ & + (l \cdot \dot{\theta}_2 \cdot \cos\theta_2 + \dot{\theta}_4 \cdot L \cdot \sin\theta_3 + \dot{\theta}_4 \cdot l \cdot \cos\theta_2 \cdot \sin\theta_1)\vec{j} \\ & + (l \cdot \dot{\theta}_1 \cdot \sin\theta_1 \cdot \cos\theta_2 \\ & + l \cdot \dot{\theta}_2 \cdot \cos\theta_1 \cdot \sin\theta_2)\vec{k} \end{aligned} \quad (8)$$

3.2.4 الطاقة الحركية للنظام:

إن الطاقة الحركية للنظام ككل تساوي مجموع الطاقات الحركية لمكوناته [7]:

$$T = \sum T_i \quad (9)$$

$$T = T_j + T_m \quad (10)$$

الطاقة الحركية للذراع:

$$T_j = \frac{1}{2} \cdot J_z \cdot \dot{\theta}_4^2 + \frac{1}{2} \cdot J_{xz} \cdot \dot{\theta}_3^2 \quad (11)$$

حيث أن J_z : عزم عطالة الذراع حول المحور z .

J_{xz} : عزم عطالة الذراع في المستوى xz .

الطاقة الحركية للحمل:

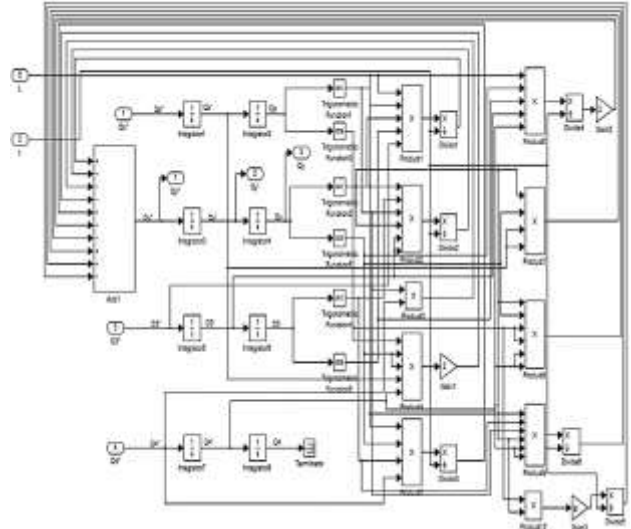
$$T_m = \frac{1}{2} \cdot m \cdot (\vec{r}_m)^2 \quad (12)$$

$$\begin{aligned} T & = \frac{1}{2} m \cdot L^2 \cdot \dot{\theta}_3^2 \cdot \cos\theta_3^2 + \frac{1}{2} m \cdot l^2 \cdot \dot{\theta}_2^2 \\ & - m \cdot L \cdot l \cdot \dot{\theta}_3 \cdot \dot{\theta}_2 \cdot \cos\theta_3 \cdot \sin\theta_2 \cdot \sin\theta_1 \\ & + \frac{1}{2} m \cdot l^2 \cdot \dot{\theta}_1^2 \cdot \cos\theta_2^2 + \frac{1}{2} m \cdot l^2 \cdot \dot{\theta}_4^2 \cdot \sin\theta_2^2 \\ & + \frac{1}{2} m \cdot l^2 \cdot \dot{\theta}_4^2 \cdot \sin\theta_1^2 \cdot \cos\theta_2^2 \\ & - m \cdot l^2 \cdot \dot{\theta}_1 \cdot \dot{\theta}_4 \cdot \cos\theta_1 \cdot \sin\theta_2 \cdot \cos\theta_2 \\ & + m \cdot L \cdot l \cdot \dot{\theta}_3 \cdot \dot{\theta}_1 \cdot \cos\theta_3 \cdot \cos\theta_2 \cdot \cos\theta_1 \\ & - m \cdot L \cdot l \cdot \dot{\theta}_3 \cdot \dot{\theta}_4 \cdot \cos\theta_3 \cdot \sin\theta_2 + m \cdot l^2 \cdot \dot{\theta}_2 \cdot \dot{\theta}_4 \cdot \sin\theta_1 \\ & + \frac{1}{2} m \cdot L^2 \cdot \dot{\theta}_4^2 \cdot \sin\theta_3^2 + m \cdot L \cdot l \cdot \dot{\theta}_2 \cdot \dot{\theta}_4 \cdot \cos\theta_2 \cdot \sin\theta_3 \\ & + m \cdot L \cdot l \cdot \dot{\theta}_4^2 \cdot \sin\theta_3 \cdot \sin\theta_1 \cdot \cos\theta_2 + \frac{1}{2} J_z \cdot \dot{\theta}_4^2 \\ & + \frac{1}{2} J_{xz} \cdot \dot{\theta}_3^2 \end{aligned} \quad (13)$$

المعادلة الرابعة بدلالة المتحولين : $\theta_4, \dot{\theta}_4$

$$\begin{aligned}
 & m \cdot l^2 \cdot \ddot{\theta}_4 \cdot \sin^2 \theta_2 + m \cdot l^2 \cdot \ddot{\theta}_4 \cdot \cos^2 \theta_2 \cdot \sin^2 \theta_1 \\
 & + m \cdot L^2 \cdot \ddot{\theta}_4 \cdot \sin^2 \theta_3 + 2m \cdot L \cdot l \cdot \ddot{\theta}_4 \cdot \sin \theta_3 \cdot \sin \theta_1 \cdot \cos \theta_2 \\
 & + J_z \cdot \ddot{\theta}_4 \\
 & = T_4 - 2m \cdot l^2 \cdot \dot{\theta}_4 \cdot \dot{\theta}_2 \cdot \sin \theta_2 \cdot \cos \theta_2 \cdot \cos^2 \theta_1 \\
 & - 2m \cdot l^2 \cdot \dot{\theta}_4 \cdot \dot{\theta}_1 \cdot \cos^2 \theta_2 \cdot \sin \theta_1 \cdot \cos \theta_1 \\
 & + m \cdot l^2 \cdot \dot{\theta}_1 \cdot \cos \theta_1 \cdot \sin \theta_2 \cdot \cos \theta_2 \\
 & - m \cdot l^2 \cdot \dot{\theta}_1^2 \cdot \sin \theta_1 \cdot \sin \theta_2 \cdot \cos \theta_2 \\
 & - 2m \cdot l^2 \cdot \dot{\theta}_1 \cdot \dot{\theta}_2 \cdot \cos \theta_1 \cdot \sin \theta_2^2 + m \cdot L \cdot l \cdot \ddot{\theta}_3 \cdot \cos \theta_3 \cdot \sin \theta_2 \\
 & - m \cdot L \cdot l \cdot \dot{\theta}_3^2 \cdot \sin \theta_3 \cdot \sin \theta_2 - m \cdot l^2 \cdot \dot{\theta}_2^2 \cdot \sin \theta_1 \\
 & - 2m \cdot L^2 \cdot \dot{\theta}_4 \cdot \dot{\theta}_3 \cdot \sin \theta_3 \cdot \cos \theta_3 + m \cdot L \cdot l \cdot \dot{\theta}_2 \cdot \cos \theta_2 \cdot \sin \theta_3 \\
 & + m \cdot L \cdot l \cdot \dot{\theta}_2^2 \cdot \sin \theta_2 \cdot \sin \theta_3 \\
 & - 2m \cdot L \cdot l \cdot \dot{\theta}_4 \cdot \dot{\theta}_3 \cdot \cos \theta_3 \cdot \sin \theta_1 \cdot \cos \theta_2 \\
 & - 2m \cdot L \cdot l \cdot \dot{\theta}_4 \cdot \dot{\theta}_1 \cdot \sin \theta_3 \cdot \cos \theta_1 \cdot \cos \theta_2 \\
 & + 2m \cdot L \cdot l \cdot \dot{\theta}_4 \cdot \dot{\theta}_2 \cdot \sin \theta_3 \cdot \sin \theta_1 \cdot \sin \theta_2
 \end{aligned} \quad (18)$$

باستخدام برنامج (MATLAB/Simulink) تم تمثيل هذه المعادلة، والنموذج الرياضي الموضح لها مبين بالشكل الآتي:

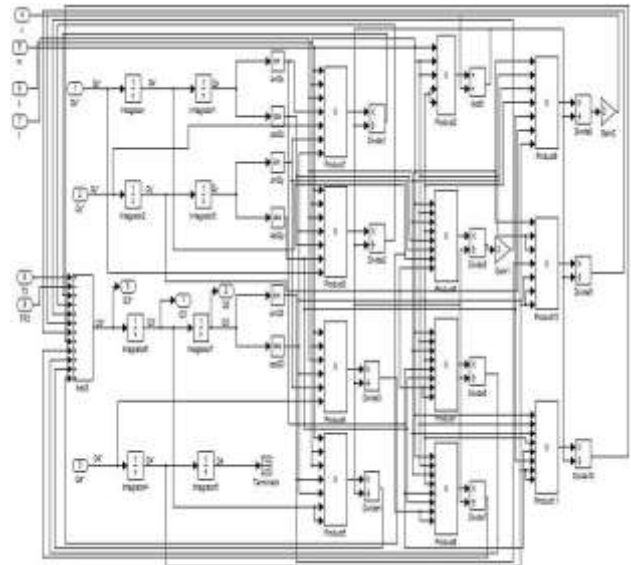


شكل 4: النموذج الرياضي للمعادلة الثانية المصدر: إعداد الباحث

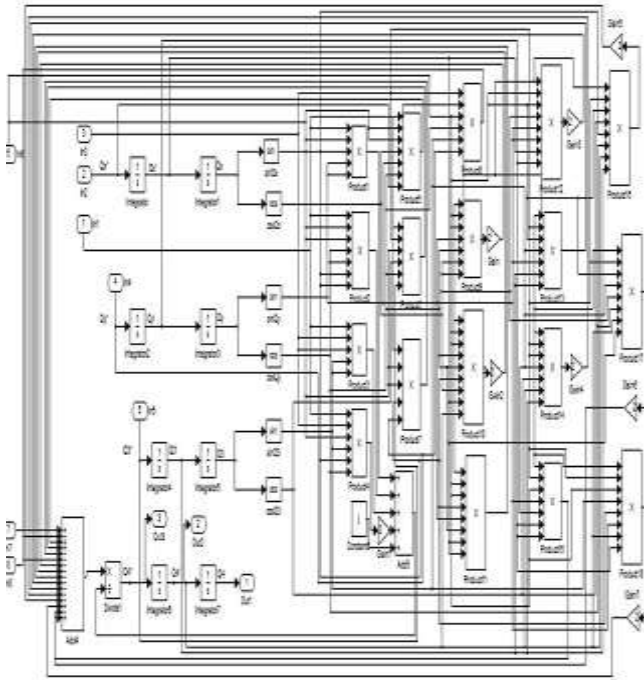
المعادلة الثالثة بدلالة المتحولين : $\theta_3, \dot{\theta}_3$

$$\begin{aligned}
 & m \cdot L^2 \cdot \ddot{\theta}_3 \cdot \cos^2 \theta_3 + J_{xz} \cdot \ddot{\theta}_3 \\
 & = T_3 + m \cdot L^2 \cdot \dot{\theta}_3^2 \cdot \sin \theta_3 \cdot \cos \theta_3 \\
 & + m \cdot L \cdot l \cdot \dot{\theta}_2 \cdot \cos \theta_3 \cdot \sin \theta_1 \cdot \sin \theta_2 \\
 & + 2m \cdot L \cdot l \cdot \dot{\theta}_2 \cdot \dot{\theta}_1 \cdot \cos \theta_3 \cdot \cos \theta_1 \cdot \sin \theta_2 \\
 & + m \cdot L \cdot l \cdot \dot{\theta}_2^2 \cdot \cos \theta_3 \cdot \sin \theta_1 \cdot \cos \theta_2 \\
 & - m \cdot L \cdot l \cdot \dot{\theta}_1^2 \cdot \cos \theta_3 \cdot \cos \theta_1 \cdot \cos \theta_2 \\
 & + m \cdot L \cdot l \cdot \dot{\theta}_1^2 \cdot \cos \theta_3 \cdot \sin \theta_1 \cdot \cos \theta_2 \\
 & + m \cdot L \cdot l \cdot \dot{\theta}_4 \cdot \cos \theta_3 \cdot \sin \theta_2 + 2m \cdot L \cdot l \cdot \dot{\theta}_4 \cdot \dot{\theta}_2 \cdot \cos \theta_3 \cdot \cos \theta_2 \\
 & + m \cdot L^2 \cdot \dot{\theta}_4^2 \cdot \sin \theta_3 \cdot \cos \theta_3 \\
 & + m \cdot L \cdot l \cdot \dot{\theta}_4^2 \cdot \cos \theta_3 \cdot \sin \theta_1 \cdot \cos \theta_2
 \end{aligned} \quad (17)$$

باستخدام برنامج (MATLAB/Simulink) تم تمثيل هذه المعادلة، والنموذج الرياضي الموضح لها مبين بالشكل الآتي:



شكل 5: النموذج الرياضي للمعادلة الثالثة المصدر: إعداد الباحث

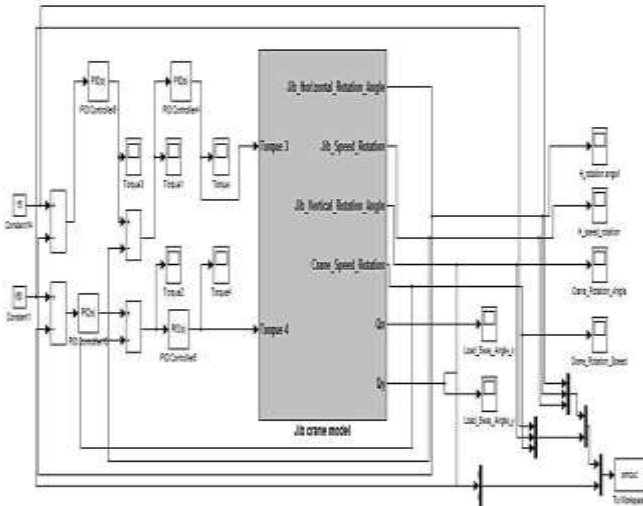


شكل 6: النموذج الرياضي للمعادلة الرابعة المصدر: إعداد الباحث

3.3 تصميم نظام التحكم بالرافعة باستخدام المتحكم التناسبي التكاملي التفاضلي:

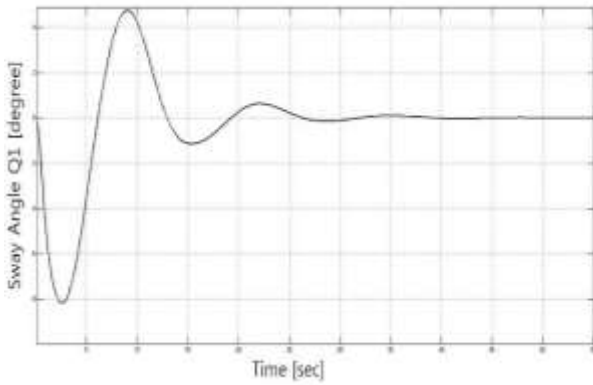
تستخدم المتحكمات التناسبية التكاملية التفاضلية بشكل واسع في التطبيقات الصناعية حيث أن أكثر من نصف المتحكمات الصناعية هي المتحكمات التناسبية التكاملية التفاضلية أو المتحكمات التناسبية التفاضلية المعدلة [12]. يمكن أن تكون هذه المتحكمات تشابهية (Analog PID controller) تعمل بإشارة هيدروليكية أو نيوماتيكية أو كهربائية أو إلكترونية، وحالياً تم العمل بالمتحكمات التناسبية التكاملية التفاضلية الرقمية (Analog PID controller) وذلك من خلال استخدام المايكروكنترولر [10].

يتألف الفعل التحكمي (Control action) للمتحكم التناسبي التكاملي التفاضلي من ثلاثة أفعال: الفعل التناسبي (Proportional action) الذي



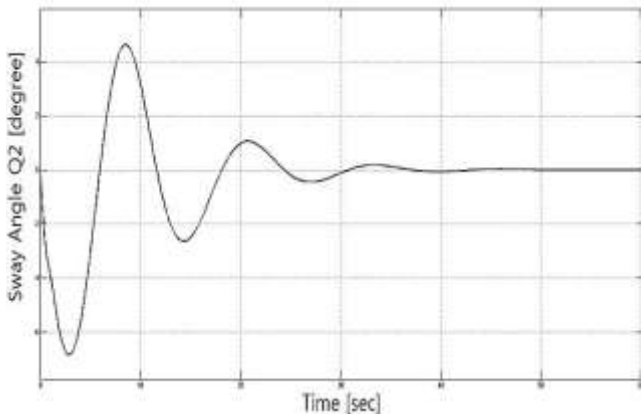
شكل 8: النموذج الرياضي للرافعة الذراعية مع نظام التحكم PID
المصدر: إعداد الباحث

يبين الشكل (9) تأرجح الحمولة في المستوي (x,z)، حيث نلاحظ تأرجح الحمل بحدود (5°) عند بدء الحركة، ثم تبدأ زاوية التأرجح بالتخامد مع الزمن لتستقر عند قيمة الصفر بعد زمن قدره (25 sec) عن طريق انقاص السرعة من خلال المتحكم.



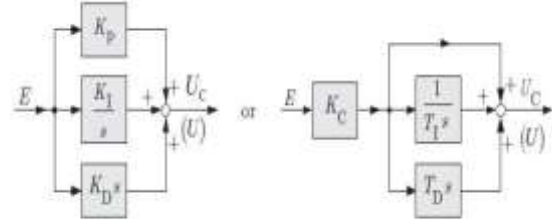
شكل 9: زاوية تأرجح الحمولة في المستوي (x,z)
المصدر: إعداد الباحث

يبين الشكل (10) تأرجح الحمولة في المستوي (y,z)، حيث نلاحظ تأرجح الحمل بحدود (4°) عند بدء الحركة، ثم تبدأ زاوية التأرجح بالتخامد مع الزمن لتستقر عند قيمة الصفر بعد زمن قدره (25 sec) عن طريق انقاص السرعة من خلال استخدام اثنان من متحكمات (PID-controller).



شكل 10: زاوية تأرجح الحمولة في المستوي (y,z)
المصدر: إعداد الباحث

يقال من الخطأ ويمتاز بسرعة الاستجابة إلا أنه يملك خطأ في الحالة المستقرة، بإضافة الفعل التكاملي (*Integral action*) للتناسبي نستطيع أن نتخلص من خطأ الحالة المستقرة ولكنه يعمل على التقليل من زمن الوصول للاستقرار، وعند إضافة الفعل التفاضلي (*Derivative action*) يتم تخميد الاستجابة الديناميكية [3]، والشكل (7) يوضح بنية المتحكم التناسبي التكاملي التفاضلي.



شكل 7: المخطط الصندوقي للمتحكم التناسبي التكاملي التفاضلي [3]

معادلة عمل هذا المتحكم:

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (19)$$

التابع التحويلي للمتحكم:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left[1 + \frac{1}{K_i s} + K_d s \right] \quad (20)$$

نطلق اسم متغيرات المتحكم على البارامترات المراد ضبطها أو توليفها حتى نحصل على استقرار النظام الصناعي المراد التحكم به وتكون بارامترات التوليف بالنسبة للمتحكم هي:

$$K_c = K_p \quad \text{الكسب أو الريح}$$

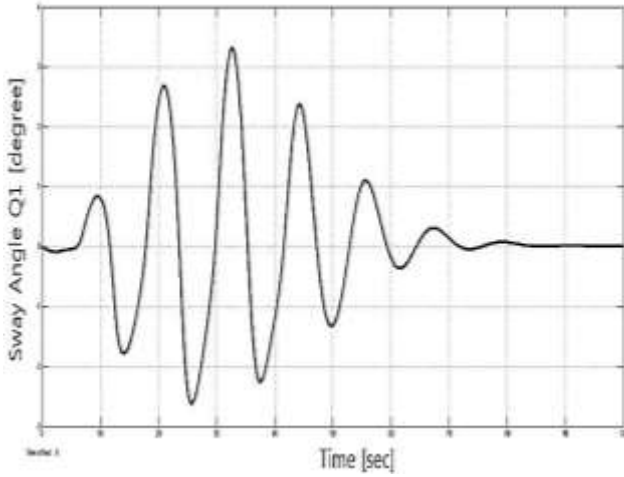
$$T_i = \frac{K_p}{K_i} \quad \text{زمن الفعل التكاملي}$$

$$T_D = \frac{K_D}{K_p} \quad \text{زمن الفعل التفاضلي}$$

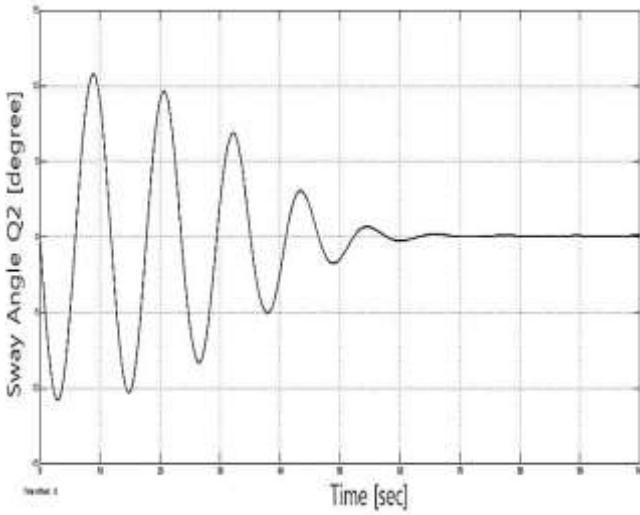
يوجد عدة طرق للتوليف نذكر منها طريقة زيغلر-نيكولس (*Ziegler-Nichols*)، وطريقة كوهين-كون (*COHEN-COON*)، وطريقة لوبيز (*LOPEZ IAE-ISE*) وتم في هذا البحث استخدام زيغلر في توليف المتحكمات [10].

إن المعادلات الرياضية (15,16,17,18) تمثل العلاقات الرياضية لحركة ذراع الرافعة وتأرجح الحمولة وفق المحاور (x,y,z)، لحل هذا النموذج من المعادلات سنقوم باستخدام برنامج (*MATLAB*) والذي يعد من البرامج المختصة بالتمثيل والحسابات العددية، كما أنه من لغات البرمجة القادرة على معالجة المسائل المعقدة ومجهز بكل الأدوات لذلك، ومن أهم الأدوات الملحقة والتي تعتبر من المميزات الهامة لبرنامج (*MATLAB*) هي أداة (*Simulink*) والتي تستخدم لنمذجة الانظمة الديناميكية الخطية و غير الخطية عن طريق رسم تمثيلي للنظام المراد نمذجته.

تم تمثيل النموذج الرياضي باستخدام برنامج (*MATLAB/Simulink*)، حيث تمت محاكاة عمل الرافعة خلال زمن قدره (100 sec) وذلك بتشغيل الرافعة بحمولة قدرها (15000 Kg) وتطبيق عزم دوران T_4 لتحريك الذراع في المستوي الأفقي، وعزم دوران T_3 لخفض الذراع كما هو مبين في الشكل التالي:



شكل 13: زاوية تآرجح الحمولة في المستوي (x,z) باستخدام متحكم (PI) المصدر: إعداد الباحث



شكل 14: زاوية تآرجح الحمولة في المستوي (y,z) باستخدام متحكم (PI) المصدر: إعداد الباحث

4. الاستنتاجات والتوصيات

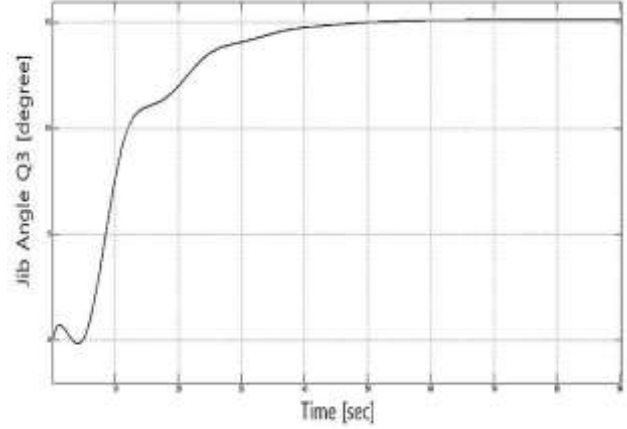
4.1 الاستنتاجات

1. تمت دراسة السلوك الديناميكي للرافعة الزراعية وإيجاد المعادلات الرياضية المنظمة لحركة الرافعة باستخدام طريقة معادلات لاغرانج، فتم بناء نموذج رياضي يمثل النموذج الميكانيكي الواقعي.
2. تم التحكم بعمل الرافعة من خلال تصميم متحكم تناسبي تكاملي تفاضلي للتحكم بحركة الذراع الأفقية و متحكم تناسبي تكاملي تفاضلي للتحكم بحركة الذراع الشاقولية، وقد تم تحسين استجابة النظام بعد استخدام المتحكمات التناسبية التكاملية التفاضلية بنسبة خمسين بالمئة تقريباً إذا ما تم مقارنتها مع أنظمة التحكم (PI-controller).

4.2 التوصيات

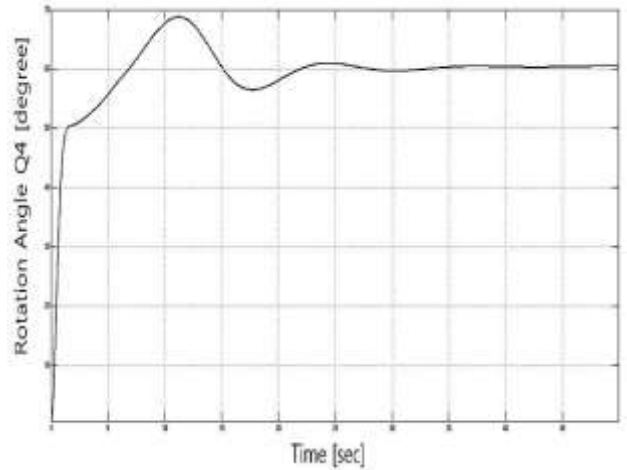
1. استثمار النتائج التي توصل إليها البحث والاستفادة منها على أصعدة مختلفة وتطبيقها على أنواع أخرى من الروافع.
2. السعي إلى تطوير نظام التحكم واستخدام أنظمة الذكاء الصناعي.

يبين الشكل (11) انخفاض الذراع بزوايا قدرها (15) خلال زمن (45 sec)، نلاحظ وجود ذبذبات في بداية حركة الذراع الشاقولية ناتجة عن تأثير الحمولة الديناميكية بسبب اهتزاز حبل الرافعة مع الحمولة، ولكن بعد مرور زمن (45 sec) يصل الذراع إلى القيمة المطلوبة ليستقر عندها من خلال استخدام اثنان من متحكمات (PID-controller).



شكل 11: انتقال الذراع بزوايا θ_3 المصدر: إعداد الباحث

يبين الشكل (12) حركة الذراع الأفقية حيث يصل للقيمة المطلوبة ليستقر عندها عن طريق المتحكم خلال زمن (30 sec).



شكل 12: انتقال الذراع بزوايا θ_4 المصدر: إعداد الباحث

أما في حال استخدام متحكم تناسبي تكاملي (PI-controller) نجد أن الحمل يحتاج إلى زمن أطول ليبدأ بالاستقرار، تقريباً ضعف الزمن اللازم لإستقرار الحمل في طريقة التحكم المتبعة في هذا البحث.

إذ يحتاج الحمل إلى (70) ثانية تقريباً لتبدأ زاوية التآرجح في المستوي (x,z) بالتخامد مع الزمن كما في الشكل (13) وحوالي (50) ثانية لتخامد زاوية التآرجح في المستوي (y,z) لتستقر عند قيمة الصفر كما في الشكل (14)، وذلك باستخدام اثنان من متحكمات (PI-controller) لكل زاوية من زوايا حركة الرافعة.

- Mechanical Engineering, vol. 8, no. 3, p. 1–11, 2016.
- [8] Doçi, B. Hamidi, and Sh. Lajqi, “Dynamic analysis and control of jib crane in case of jib luffing motion using modelling and simulations,” IFAC-Papers OnLine, vol. 49, p. 163-168, 2016.
- [9] ING. J. VERSCHOOF, “Cranes – Design, Practice, and Maintenance,” Professional Engineering Publishing Limited, Second Edition, London and Bury St Edmunds, UK, 328p, 2002.
- [10] K. OGATA, “Modern Control Engineering,” Prentice-Hall, Inc. Upper Saddle River, NJ, USA, 1997.
- [11] N. UCHIYAMA, H. OUYANG, and SH. SANO, “Simple rotary crane dynamics modeling and open-loop control for residual load sway suppression by only horizontal boom motion,” Mechatronics, vol. 23, p. 1223–1236, 2013.
- [12] T. ALMASSOUD, “Automatic Control,” ALBaath University Publications, Syria, 656p, 2009.
- [13] W. G. HOUSNER, and E. D. HUDSON, “APPLIED MECHANICS DYNAMICS,” California Institute of Technology, Second Edition, The United States of America, 392p, 1991.

References

- [1] AL-MOUSA, A. NAYFE, and P.KACHROO, “Control of rotary cranes using fuzzy logic,” Shock and Vibration, vol. 10, no. 2, pp. 81-95, 2003.
- [2] C. Klinger, “Failures of cranes due to wind induced vibrations,” Engineering Failure Analysis, vol. 43, p. 198–220, Aug. 2014.
- [3] CH. SCHMID, “System Control,” Ruhr-Universität Bochum, 264p, 2004.
- [4] H. ARAYA, M. KAKUZEN, H. KINUGAWA, and T. ARAI, “Level luffing control system for crawler cranes,” Automation in Construction, vol. 13, p. 689– 697, 2004.
- [5] H. CHEN, Y. FANG, and N. SUN, “An adaptive tracking control method with swing suppression for 4-DOF tower crane systems,” Mechanical Systems and Signal Processing, vol. 123, p. 426–442, 2019.
- [6] H. JOSEPHS, and L. R. HUSTON, “DYNAMICS of MECHANICAL SYSTEMS,” CRC PRESS, The United States of America, 757p, 2002.
- [7] H. OUYANG, G. ZHANG, L. MEI, X. DENG, and D. WANG, “Load vibration reduction in rotary cranes using robust two-degree-of-freedom control approach,” Advances in

Vibration Control of Load for Jib Crane by using PID Controller

Fares Abbas¹, and Tawfik Al Massoud^{2}*

¹ Department of Design and Production, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, ALBaath University, Homs, Syria, fares.t.abbas@gmail.com

² Department of Design and Production, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, ALBaath University, Homs, Syria, pmassoud63@gmail.com

* Corresponding author: Fares Talal Abbas, fares.t.abbas@gmail.com

Published online: 30 September 2020

Abstract— Jib Crane is a type of machinery used mainly to raise or lower materials or heavy objects and to carrying them to other places. It is used in construction and in the installation of large machines such as wind turbines and harbors, and is an essential component of integrated production processes. Because of the large loads carried by these cranes it became necessary to know their behavior before investment by studying their movements and studying the vibration of payloads and work to reduce them as much as possible and thus prolong the life of the crane components and increase their efficiency. Hence the need to design a control system to dampen load vibration to reduce the impact of dynamics affecting the parts of the crane. In this research, the mathematical model similar to the mechanical model of the crane was prepared and solving the model using MATLAB program, and then design a proportional integral differential controller for jib crane.

Keywords— Jib Crane, Load Vibration, Mathematic Modeling, PID Controller, MATLAB.