

## Design a Magnetic Bearing Control System to Reduce the Deflection of Rotating Shafts

Dr. Haytham Wardeh\*  
Dr. Mwaffak Munjed\*\*  
Anas al-Sallomi\*\*\*

(Received 11 / 3 / 2024. Accepted 2 / 6 / 2024)

### □ ABSTRACT □

Magnetic bearings are based on the principle of using a magnetic field to lift rotating shafts and therefore do not contain any friction or wear, which gives them high reliability in addition to speed that is not possible to achieve with other bearings, which can be easily achieved using these bearings.

The use of these bearings in rotating machines also reduces vibration in the machine, which improves the life of the machine and thus increases its periodic maintenance periods..

The design of the control system for such bearings is considered the main point in the quality of the work of these bearings, as the control system works to read the deviation in the rotating axis within the bearing and adjusts it by adjusting the intensity of the current passing through its coils, which changes the intensity of the generated magnetic field and thus returns the axis to its position.

What we have done in this research is to design a traditional and advanced control system for a mathematical model of a rotating axis supported by a magnetic bearing using the MATLAB/SIMULINK program to reduce the deviation of the rotating axis within the bearing in order to reduce wear and tear in traditional bearings and increase the speed of rotation of these axes in machines, as the results showed. The use of an advanced control system for the magnetic bearing led to a greater reduction in axis deviations than the traditional control system.

**Keywords:** Magnetic bearings – traditional control systems – advanced control systems - Modeling, MATLAB/SIMULINK.

**Copyright**



:Tishreen University journal-Syria, The authors retain the copyright under a CC BY-NC-SA 04

\* Associate Professor. Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, al-Baath University, Homs, Syria.

\*\*Assistant Professor. Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, al-Baath University, Homs, Syria.

\*\*\* PhD Student, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, al-Baath University, Homs, Syria.  
[anassallomi@gmail.com](mailto:anassallomi@gmail.com)

## تصميم نظام تحكم بالمحامل المغناطيسية للحد من انحراف الأعمدة الدوارة

د. هيثم وردة\*

د. موفق منجد\*\*

أنس السلومي\*\*\*

(تاريخ الإيداع 11 / 3 / 2024. قُبِلَ للنشر في 2 / 6 / 2024)

### □ ملخص □

تقوم المحامل المغناطيسية على مبدأ استخدام المجال المغناطيسي لرفع الأعمدة الدوارة وبالتالي فإنها لا تحتوي على أي احتكاك أو تآكل مما يعطيها موثوقية عالية بالإضافة إلى السرعة التي من غير الممكن تحقيقها بواسطة المحامل الأخرى والتي يمكن تحقيقها بسهولة باستخدام هذه المحامل .

كما أن استخدام هذه المحامل في الآلات الدوارة يؤدي إلى تقليل الاهتزاز في الآلة مما يحسن من عمر الآلة وبالتالي زيادة فترات الصيانة الدورية لها .

يعتبر تصميم نظام التحكم لمثل هذه المحامل النقطة الأساسية في جودة عمل هذه المحامل حيث أن نظام التحكم يعمل على قراءة الانحراف في المحور الدوار ضمن المحمل ويقوم بضبطه من خلال تعديل شدة التيار المار في وشائعه مما يغير من شدة الحقل المغناطيسي المتولد وبالتالي يقوم باعادة المحور إلى وضع التوازن .

إن ما قمنا به في هذا البحث هو تصميم نظام تحكم تقليدي ومتقدم لنموذج رياضي لمحور دوار مدعوم بمحمل مغناطيسي باستخدام برنامج MATLAB/SIMULINK لتقليل الانحراف في المحور الدوار ضمن المحمل وذلك للتقليل من التآكل والاهتراء في المحامل التقليدية وزيادة سرعة دوران هذه المحاور في الآلات حيث أظهرت النتائج أن استخدام نظام تحكم متقدم للمحمل المغناطيسي أدى لتخفيض الانحرافات في المحور بنسبة أكبر من نظام التحكم التقليدي.

**الكلمات المفتاحية:** المحامل المغناطيسية - أنظمة التحكم التقليدية - أنظمة التحكم المتقدمة ،النموذج الرياضي، MATLAB/SIMULINK.

حقوق النشر : مجلة جامعة تشرين- سورية، يحتفظ المؤلفون بحقوق النشر بموجب الترخيص



CC BY-NC-SA 04

\* أستاذ مساعد- كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية- جامعة البعث - حمص - سورية.

\*\* مدرس- كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة البعث - حمص - سورية.

\*\*\* طالب دكتوراه- كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة البعث - حمص - سورية. إيميل: [anassallomi@gmail.com](mailto:anassallomi@gmail.com)

**مقدمة:**

يعتمد التحكم في المحامل المغناطيسية على استخدام دارات الإلكترونية لتعديل المجال المغناطيسي المطبق على المحمل. يمكن استخدام هذه الدارات لضبط خصائص المحمل، مثل الصلابة، والمقاومة، والوضواء. هناك العديد من الطرق المختلفة للتحكم في المحامل المغناطيسية. أحد أكثر الطرق شيوعاً هو استخدام أنظمة التحكم التقليدية أو أنظمة التحكم المتقدم. تعمل هذه الأنظمة على معالجة الإشارات من الحساسات الموجودة في المحمل، ثم تستخدم هذه الإشارات لضبط المجال المغناطيسي.

يمكن استخدام التحكم في المحامل المغناطيسية في مجموعة متنوعة من التطبيقات. تشمل بعض الأمثلة الشائعة:

- المحركات الكهربائية
- الأقراص الصلبة
- أنظمة التوجيه
- الروبوتات

يوفر التحكم في المحامل المغناطيسية العديد من الفوائد، بما في ذلك:

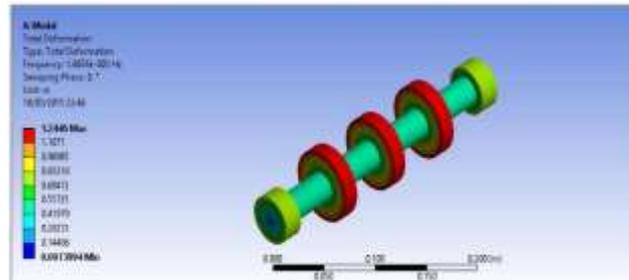
- انخفاض الاحتكاك: يؤدي انخفاض الاحتكاك إلى زيادة الكفاءة وخفض استهلاك الطاقة.
- زيادة الكفاءة: يؤدي انخفاض الاحتكاك أيضاً إلى زيادة الكفاءة، مما يؤدي إلى تقليل الحرارة المنبعثة من المحمل.
- طول العمر الافتراضي: تتميز المحامل المغناطيسية بعمر افتراضي أطول من المحامل التقليدية، بسبب انخفاض الاحتكاك.

مع التطبيق الواسع النطاق للمحامل المغناطيسية في المحركات عالية السرعة، والآلات التوربينية، والأدوات الآلية، أصبح تطوير وحدات التحكم بالمحامل المغناطيسية ذا أهمية متزايدة.

يمكن تقسيم المحمل المغناطيسي إلى نوعين هما المحمل المغناطيسي النشط (AMB) والمحمل المغناطيسي السلبي (PMB). يتم التحكم في المحمل المغناطيسي النشط كهربائياً، في حين أن المحمل المغناطيسي السلبي ليس لديه آلية تحكم.

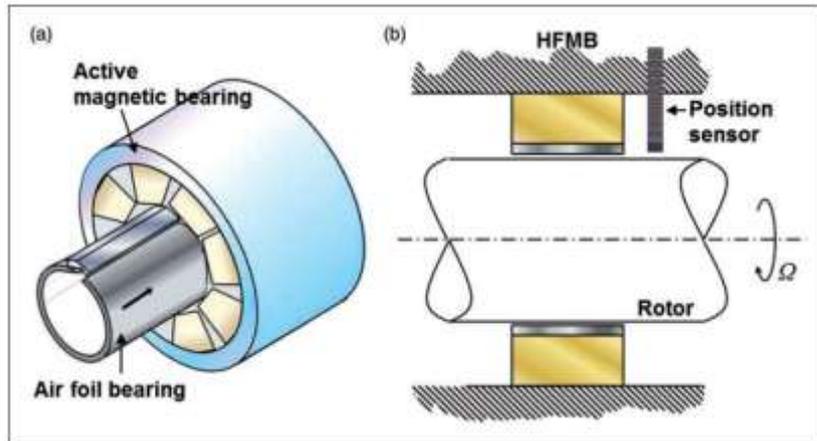
**1- الدراسات المرجعية :**

بالعودة لبعض الدراسات المرجعية نلاحظ أن الباحث في البحث [1] في العام (2015) قام الباحث مهد صفوان (MOHD SAFWAN BIN MAT DIN) في هذا البحث بدراسة السلوك الديناميكي لنظام محور دوار مدعوم بمحمل مغناطيسي من الأطراف. كما يقوم البحث على دراسة الاهتزاز الذي يحدث أثناء التشغيل واختلاف النتائج بعد تعديلات بعض بارامترات نظام التحكم . واستخدم الباحث برنامج ANSYS لتنفيذ عمليات محاكاة عمل المحور الدوار مع دعائم المحمل المغناطيسي.



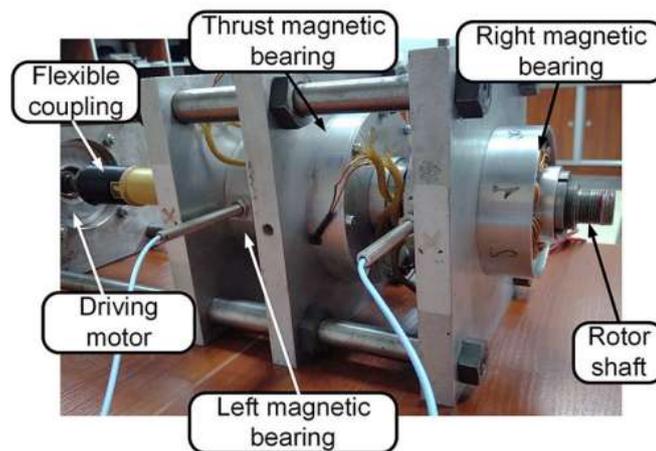
الشكل (1) النموذج المدروس من الباحث [1]

تناول الباحث يونغ لي Yong Bok Lee [2] في العام (2015) هذا البحث الذي يقوم على دراسة المحامل الهجينة المغناطيسية (HFMB) للتقليل من الانحراف الناتج عن إدخال خلل مفاجئ أو اضطراب غير متوقع أثناء تشغيل التوربين/الدوار. حيث استخدام HFMB لتحقيق الاستقرار أثناء سلوك الاهتزاز العابر. يتكون HFMB من تقنيتين للمحمل الخالية من الزيت وهما محمل مغناطيسي نشط (AMB) ومحمل رقائق الهواء (AFB). إن استخدام كلتا التقنيتين يستفيد من نقاط القوة في كل محمل مع التعويض عن نقاط الضعف الكامنة فيها.



الشكل (2) نموذج المحمل المغناطيسي الهجين [2]

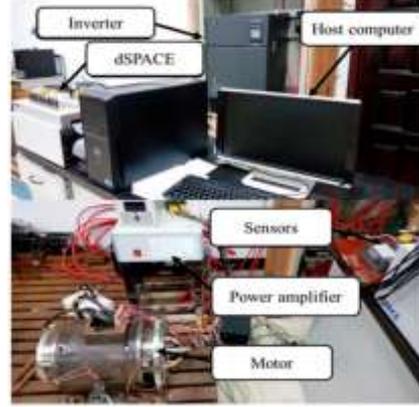
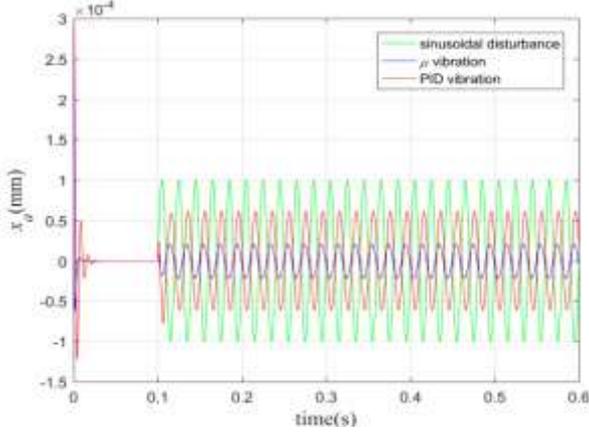
وتمكن الباحث من تخفيض الاهتزاز غير المتزامن كما أظهرت النتائج انخفاضاً بنسبة 30% تقريباً. عندما حدث فقدان الكتلة المفاجئ للمحور الدوار المدعوم بواسطة HFMB . تتناول الباحث SZOLC و آخرون ( 2021 ) [3] في هذا البحث أنظمة التحكم بالمحامل المغناطيسية لآلة دوارة عالية السرعة حيث تم عرض الخصائص النظرية والتجريبية لأنظمة التحكم مع خوارزمية التحكم الخوارزمي النموذجي (MAC) وخوارزمية التناسبية التفاضلية (PD) .



الشكل (3) النموذج المقترح للباحث [3]

وقد توصل الباحث إلى أن نظام التحكم التنبئي باستخدام خوارزمية MAC أدى إلى أصغر زمن تجاوز وأقصر وقت للاستقرار كما أن خطأ الحالة الثابتة كان أصغر بكثير من استخدام نظام التحكم PD. في العام (2023) اقترح الباحث Yuanwen Li [4] استراتيجية تحكم تعتمد على طريقة النظام العكسي والمتحكم  $\mu$  للتحكم في الاهتزاز في نظام دوار صلب مزود بمحامل مغناطيسية نشطة مدمجة في محركات عالية السرعة ومقارنتها

مع أنظمة التحكم التقليدية. *PID* وقد استخدم الباحث طريقة النمذجة الرياضية حيث أظهرت عمليات المحاكاة والتجارب أن استراتيجية التحكم المقترحة يمكن أن تسمح بتعليق الدوار بثبات وقمع اهتزازاته المنخفضة والعالية التردد بشكل فعال، مما يوفر استقرارًا داخليًا وخارجيًا ممتازًا .



الشكل (4) النموذج المقترح للباحث [4]

وتوصل الباحث بعد الدراسة إلى أن وحدة التحكم  $\mu$  لديها قدرة على الحد من الاهتزاز بقيمة ذروة اهتزاز الإزاحة أصغر بنسبة 65.8% من قيمة وحدة التحكم. *PID*.

## أهمية البحث وأهدافه:

### 2- هدف البحث:

تخفيض انحراف المحور الدوار وذلك بتصميم نظام تحكم تقليدي ومتقدم لمحمل مغناطيسي مركب على هذا المحور .

### 3- الدراسة النظرية :

بما أن الهدف من البحث هو تصميم نظام تحكم لمحمل مغناطيسي لذلك لابد من التطرق لأنظمة التحكم التقليدية (*PID Controller*). والمتقدمة (*Fuzzy Logic Controller*).

### 4-1 أنظمة التحكم التقليدية :

تستخدم المتحكمات التناسبية التكاملية التفاضلية بشكل واسع في التطبيقات الصناعية فأكثر من نصف المتحكمات الصناعية تقريباً هي المتحكمات التناسبية التكاملية التفاضلية أو المتحكمات التناسبية التكاملية التفاضلية المعدلة. 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 (*Digital PID Controller*) وذلك من خلال استخدام المايكروكنترولر.

يمكن تقسيم المتحكمات التقليدية الصناعية إلى:

- المتحكمات ذات الوضعيتين أو الواصل الفاصل ON-OFF.
- المتحكمات التناسبية P.
- المتحكمات التكاملية I.
- المتحكمات التناسبية التكاملية PI.
- المتحكمات التناسبية التفاضلية PD.

• المتحكمات التناسبية التكاملية التفاضلية PID.

عمل المتحكمات التناسبية:

بالنسبة للمتحكمات التناسبية الشكل (5)، فإن العلاقة بين خرج المتحكم  $u(t)$  وإشارة خطأ التشغيل  $e(t)$  هي:

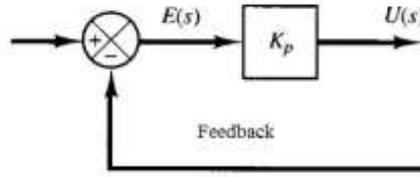
$$u(t) = K_p \cdot e(t)$$

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p$$

بإجراء تحويل لابلاس:

$K_p$ : ثابت التناسب

مهما تكن آلية العمل ومهما يكن شكل طاقة التشغيل فإن المتحكم التناسبي هو في الحقيقة عبارة عن مضخم مع ثابت تناسب له.



الشكل (5) المتحكم التناسبي

عمل المتحكمات التكاملية:

في عمل المتحكمات التكاملية الشكل (6) تتغير قيمة خرج جهاز التحكم  $u(t)$  بمعدل يتناسب مع إشارة خطأ التشغيل  $e(t)$  أي أن:

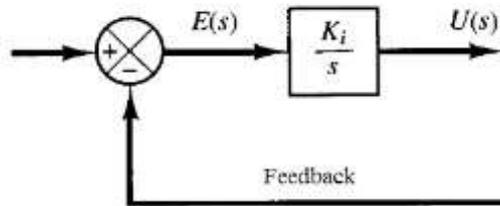
$$u(t) = K_i \int_0^t e(t) dt$$

$$\frac{U(s)}{E(s)} = \frac{K_i}{s}$$

التابع التحويلي للمتحكم التكاملي:

$K_i$ : ثابت التكامل (ربح المتحكم)

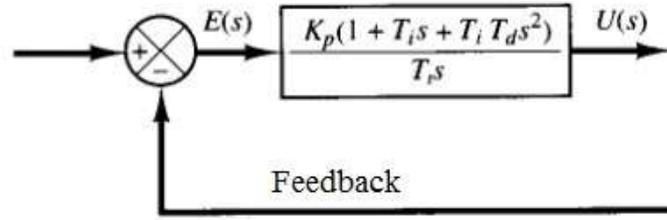
في حالة مضاعفة قيمة  $e(t)$  فإن قيمة  $u(t)$  ستتغير مرتين بشكل أسرع. من أجل خطأ التشغيل المعدوم، فإن قيمة  $u(t)$  تبقى ثابتة. يدعى عمل المتحكم التكاملي أحياناً بالمتحكم الضابط.



الشكل (6) المتحكم التكاملي

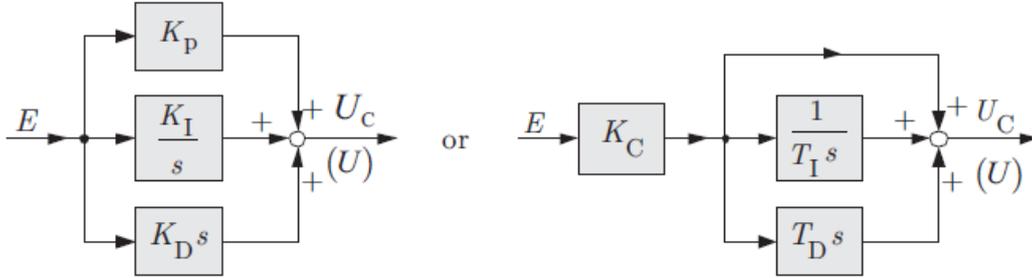
عمل المتحكمات التناسبية التكاملية التفاضلية:

يطلق على جمع عمل المتحكمات التناسبية والتكاملية والتفاضلية بعمل المتحكم التناسبي التكاملي التفاضلي الشكل (7).



الشكل (7) المتحكم التناسبي التكاملية التفاضلي

إن هذا المتحكم يمتلك الميزات الخاصة للتحكمات الثلاثة السابقة، ويتألف الفعل التحكمي (Control action) للمتحكم التناسبي التكاملية التفاضلي من ثلاثة أفعال: الفعل التناسبي (Proportional action) الذي يقلل من الخطأ ويمتاز بسرعة الاستجابة إلا أنه يملك خطأً في الحالة المستقرة، عند إضافة الفعل التكاملية (Integral action) للتناسبي فإنه يمكننا من التخلص من الخطأ في الحالة المستقرة إلا أنه يقلل من زمن الوصول للاستقرار، عند إضافة الفعل التفاضلي (Derivative action) فإنه يعمل على تخميد الاستجابة الديناميكية والشكل (8) يوضح بنية المتحكم التناسبي التكاملية التفاضلي.



الشكل (8) المخطط الصندوقي للمتكم التناسبي التكاملية التفاضلي

معادلة عمل هذا المتحكم:

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

التابع التحويلي للمتكم:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left[ 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right]$$

#### 4-2 أنظمة التحكم المتقدمة :

التحكم المنطقي العائم (FLC) هو عبارة عن تحكم باستخدام القواعد (Rules) التي تكون بشكل (If - Then)، وقد تم اقتراحه كفرع بديل في تصميم الأنظمة التحكمية التي تكون معقدة جداً لأن تحلل باستخدام الطرق التقليدية.

وحتى ندرك الفكرة الأساسية للمنطق المصنوب أو العائم (Fuzzy logic) بشكل جيد يجب التعرف على المفاهيم التالية []:

- المتغير اللغوي (Linguistic Variable): وهو عبارة عن متغير تكون قيمته كلمة أو جملة ضمن لغة طبيعية أكثر من أن تكون عددية، وتكون مداخل ومخارج المتحكم العائم عبارة عن متغيرات لغوية.
- المقترح العائم (Fuzzy Proposition): هو عبارة عن مجموعة من البيانات في لغة طبيعية.
- القاعدة اللغوية (Linguistic Rule) [If - Then]: والتي تتألف من جزأين: الجزء الأول (IF) يتبعه المقترح العائم والجزء اللاحق (Then) يتبعه المقترح العائم. وتكتب القاعدة اللغوية على الشكل التالي:

**If** (مقترح لغوي) **Then** (مقترح لغوي)

وكما ذكرنا سابقاً فإن المنطق العائم يتعامل مع المشاكل الغامضة الغير واضحة على عكس المنطق الجبري، في المنطق الجبري لنفرض أن هناك مجموعة جبرية معينة (Crisp set) ولتكن (A) فالمتحولات أو العناصر الجبرية إما أن تنتمي لهذه المجموعة (1) أو لا تنتمي (0). أما في المنطق العائم فإن كل عنصر يملك درجة من العضوية في مجموعة معطاة تبدأ من الصفر (أي خارج المجموعة) إلى الواحد (أي داخل المجموعة). من خلال ما سبق يمكن تعريف المجموعة العائمة على أنها مجموعة من العناصر التي يملك فيها كل عنصر درجة انتماء لهذه المجموعة مختلفة عن الآخر. أي أن هذه المجموعة العائمة تملك حدوداً ناعمة وليس حدوداً واضحة وحادة كالمجموعات الجبرية. درجة انتماء العنصر للمجموعة تُحدّد مدى انتماء هذا العنصر للمجموعة ودرجة الانتماء هي عدد حقيقي ضمن المجال (0-1) فعلى سبيل المثال إذا كانت درجة انتماء العنصر (1) نقول إن هذا العنصر منتمي كلياً إلى المجموعة، أما إذا كانت درجة انتماء العنصر (0.5) نقول إن هذا العنصر منتمي بنسبة (50%) إلى هذه المجموعة. يتم التعبير عن المجموعات الجبرية الكلاسيكية عن طريق كتابة معادلة يتم من خلالها تحديد العناصر المنتمية لهذه المجموعة ورسم بياني يوضح ما سبق، أما في حالة المجموعات العائمة فنستخدم تابع الانتماء وهو عبارة عن منحنى يمثل درجة عضوية أو درجة انتماء متحوّل عائم إلى مجموعة عائمة معينة ضمن المجال (0-1) .

**طرائق البحث ومواده:**

في هذا البحث استخدمنا النموذج الرياضي للمحور الدوار وذلك انطلاقاً من المعادلة التفاضلية لهذا المحور [5]

$$m_c \ddot{x} + b_x \dot{x} + k_x x = m_s (r + z) \omega^2 \cos(\omega t) + m_b (r_b - z) \omega^2 \cos(\omega t + \phi)$$

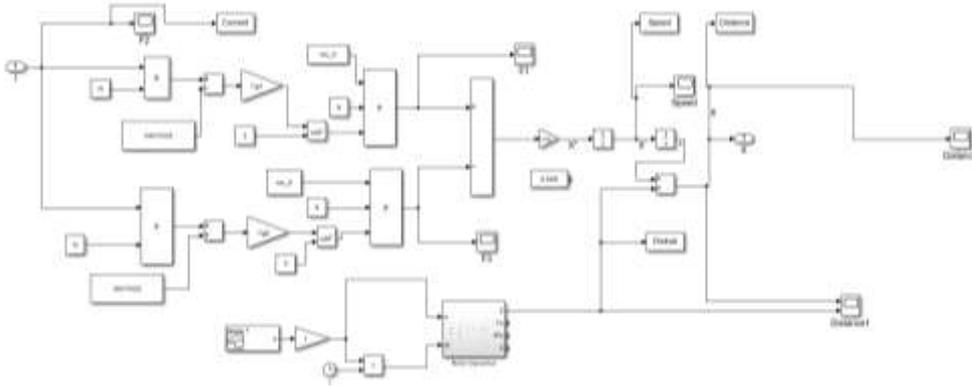
$$m_c \ddot{y} + b_y \dot{y} + k_y y = m_s (r + z) \omega^2 \sin(\omega t) + m_b (r_b - z) \omega^2 \sin(\omega t + \phi)$$

والتي تصف الانحرافات في المحور الدوار والتي سنعمد عليها من أجل محاولة تخفيضها .

أما بالنسبة إلى المحمل المغناطيسي المدروس فإن المعادلة التفاضلية التي تربط بين شدة التيار والقوة المغناطيسية المتولدة من المحمل تعطى بالعلاقة [6] :

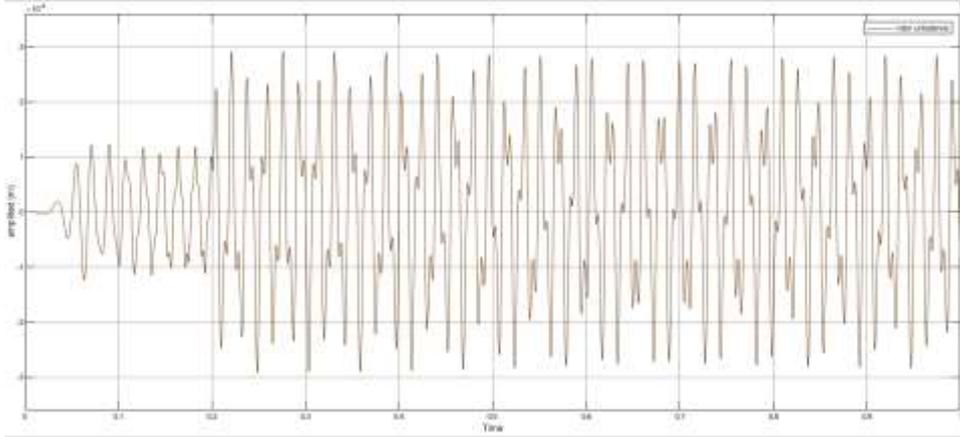
$$f_{tot} = A_g \mu_0 \left[ \left( \frac{NI - \frac{Hm.lm}{2}}{g_1} \right)^2 - \left( \frac{NI + \frac{Hm.lm}{2}}{g_+} \right)^2 \right]$$

حيث قمنا في برنامج الماتلاب بالربط بين الانحراف في المحور الدوار والناتج عن كتلة غير متوازنة عليه كإشارة دخل للمحمل المغناطيسي حيث يعمل المحمل على تحديد قيمة هذا الانحراف في كل لحظة ومحاولة تخفيضها وإعادة المحور إلى وضع التوازن حيث يبين الشكل (9) النموذج الرياضي الكلي للدوار والمحمل المغناطيسي .



الشكل (9) النموذج الرياضي الكلي للدوار والمحامل المغناطيسي

يبين الشكل (10) الانحراف التي يتعرض لها المحور الدوار والنتائج عن وجود كتله لا مركزية على المحور الدوار تؤدي إلى خلق قوى غير متوازنة تسبب انحراف المحور الدوار وحدث اهتزازات في المحور والتي حصلنا عليه من تطبيق النموذج الرياضي لمعادلات المحور الدوار على برنامج MATLAB/SIMULINK.



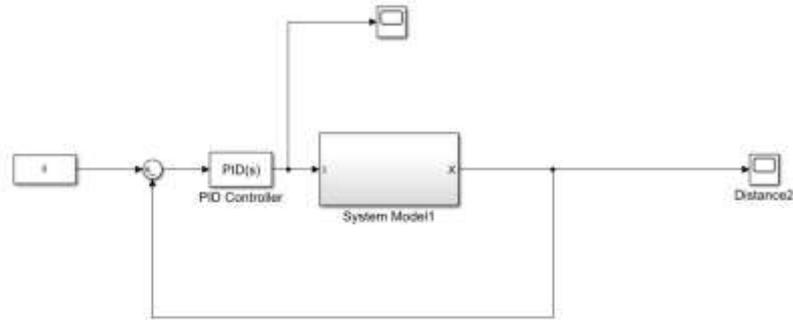
الشكل (10) انحراف المحور الدوار غير المتوازن

والتي تعتبر إشارة دخل للمحمل المغناطيسي الذي سيعمل على محاولة إزالة أو التقليل من هذه الانحرافات وإعادة المحور لوضع التوازن قدر المستطاع كما يبين الشكل (11) قيمة الازاحة في المحور غير المتوازن والمأخوذ من برنامج Matlab وهي بقيمة  $2.89 \times 10^{-4}m$

	Value	Time
Max	2.894e-04	7.156
Min	-2.894e-04	7.019

الشكل (11) يبين قيمة الازاحة في المحور

كما يبين الشكل (12) النموذج الرياضي للمحمل والدوار مع نظام التحكم التقليدي PID المقترح

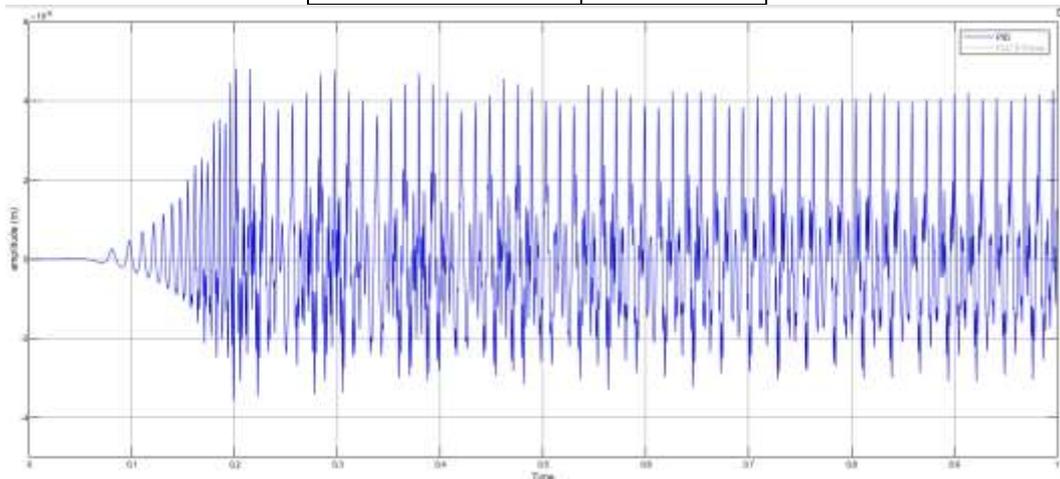


الشكل (12) النموذج الرياضي للمحمل والدوار مع النظام التحكمي التقليدي المقترح

وباستخدام برنامج MATLAB وبتطبيق ثوابت المتحكم P-I-D على النموذج الكلي للمحمل والمحور والمبينة بالجدول (1) نجد أن انحراف المحور الناتج عند استخدام المتحكم التناسبي التكاملي التفاضلي والمبين بالشكل (14).

الجدول ( 1 ) يبين قيم ثوابت المتحكم التقليدي

<b>100000</b>	<b>P</b>
<b>50</b>	<b>I</b>
<b>250</b>	<b>D</b>



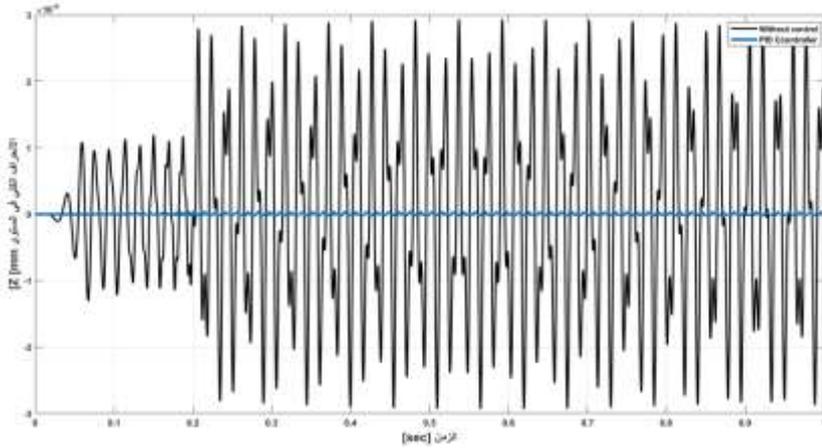
الشكل (14) اهتزازات المحور في حالة المتحكم التناسبي التكاملي التفاضلي

والشكل (15) يبين قيمة الازاحة في المحور الناتج عن استخدام المتحكم التقليدي PID والمأخوذ من برنامج Matlab .

Trace Selection		
PID		
Signal Statistics		
	Value	Time
Max	4.829e-06	0.201
Min	-3.579e-06	0.198

الشكل ( 15 ) قيم الازاحة الأعظمية في حال استخدام المتحكم PID

ولتوضيح عمل المتحكم في تخفيض اهتزاز المحور سوف نقوم بدمج مخطط إزاحة المحور بدون وجود تحكم مع مخطط إزاحة المحور بوجود نظام تحكم تقليدي كما هو مبين بالشكل (16).



الشكل ( 16 ) مقارنة بين إزاحة المحور في حال وجود تحكم وفي حال عدم وجود تحكم

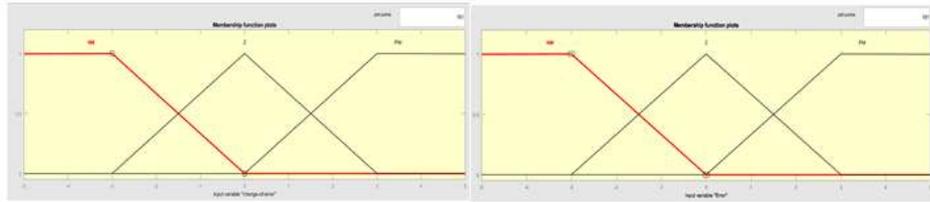
من خلال ما سبق يلاحظ بأن المتحكمات التقليدية أعطت أداءً جيداً لعمل المحمل المغناطيسي عند استخدامها للتحكم بالمحمل وضبط دوران الدوار أثناء الاستئثار وعند تعرضه لمجموعة من الحمولات المتغيرة وأدت إلى تحسّن في استجابة النظام وأي تغيير في الحمولة يؤدي إلى إعادة ضبط موضع وتمركز الدوار أثناء الحركة فالمخطط المبين بالشكل (16) يبين أن انحراف المحور بدون نظام تحكم (باللون الأسود) وسعة الاهتزاز للمحور مع نظام تحكم PID (باللون الأزرق) كما يلاحظ أنه في حال استخدام متحكم PID انخفاض سعة الاهتزازات من  $2.89 \times 10^{-4}m$  إلى  $4.829 \times 10^{-6}m$ .

أما عند استخدام نظام تحكم متقدم وهو نظام تحكم FLC3\*3 liner حيث تم الاعتماد على الأسس التالية في عملية تصميم المتحكم:

- اعتماد نموذج Mamdani.
- المتحكم المستخدم هو متحكم تناسبي تكاملي عائم (Fuzzy PI Controller).
- اعتماد إشارتي دخل هما الخطأ (إشارة السرعة)، والتغير في الخطأ (إشارة التسارع).
- مجال توابع الانتماء لإشارات الدخل  $[-4,+4]$ ، وهو يعتمد على عدد توابع الانتماء المستخدمة (حسب أغلب المعايير العالمية).
- بناء المتحكم العائم سيتم اعتماداً على عدة توابع انتماء وبأشكال مختلفة ودراسة أداء المتحكم في كل حالة.
- كما يبين الشكلين (17)(18) جدول الخبرة وتوابع الانتماء لكل من إشارة الخطأ وتغيير إشارة الخطأ للمتحكم المدروس .

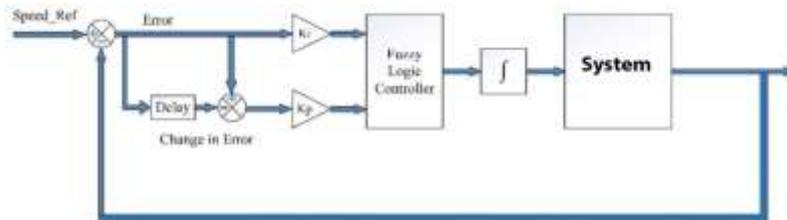
Ce \ e	NM	Z	PM
NM	NM	NM	NM
Z	NM	Z	PM
PM	PM	PM	PM

الشكل(17) يبين جدول الخبرة



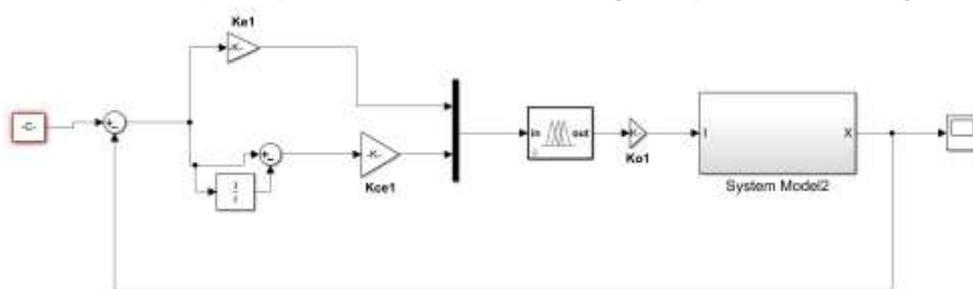
الشكل (18) شكل توابع الانتماء المثلثية (3×3) الخطية لإشارة الخطأ والتغير في الخطأ

يبين الشكل (19) الشكل العام للمتحكم التناسبي التكاملي العائم بعد إضافته للنظام المراد التحكم به ومدخله التي هي عبارة عن إشارة الخطأ  $e(t)$  وتكامل الخطأ أو مجموع الأخطاء  $(\sum e(t))$ .



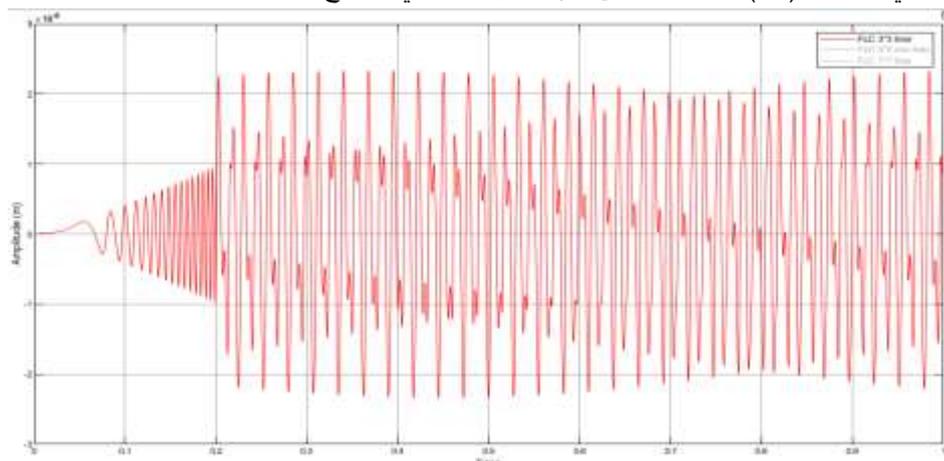
الشكل (19) المتحكم التناسبي التكاملي العائم ضمن الجملة الصناعية

نظام التحكم المقترح للمحمل المغناطيسي موضح بالشكل (20) وهو متحكم تناسبي تكاملي عائم.

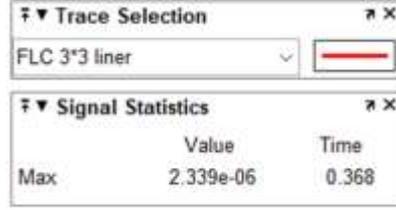


الشكل (20) النموذج الرياضي للمحمل المغناطيسي مع النظام التحكمي العائم

يبين الشكل (21) انحراف المحور الدوار الناتج عن إشارة التشويش المطبقة على المحور بوجود المتحكم العائم FLC3\*3 والخطي والشكل (22) القيمة العظمى للإزاحة والمبينة في برنامج Matlab.

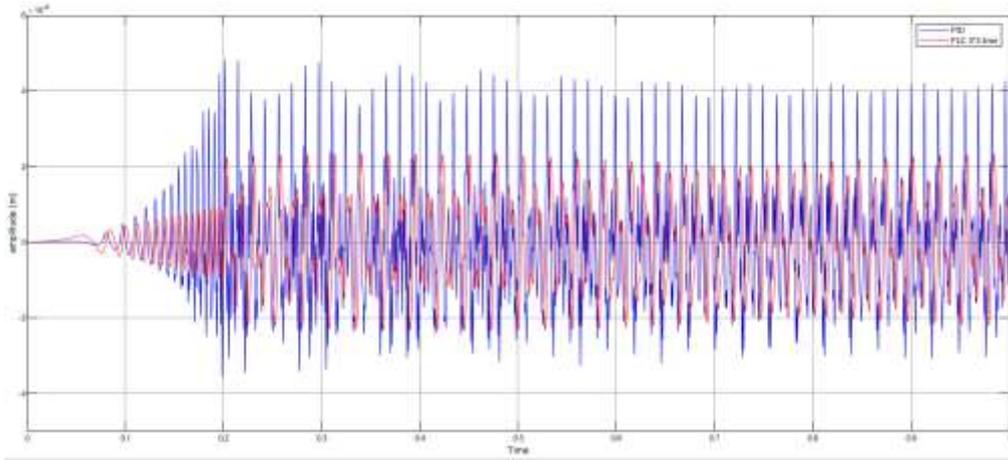


الشكل (21) اهتزاز المحور الدوار الناتج عند استخدام المتحكم العائم FLC3\*3liner .



الشكل ( 22 ) قيمة الانحراف الأعظمي عند استخدام المتحكم العائم FLC3\*3liner .

ولبيان نتيجة هذا المتحكم سنقوم بمقارنته مع الانحراف عند استخدام المتحكم التناسبي التكاملي التفاضلي وكما يظهر الشكل ( 23 ) حيث نلاحظ أن تخامد الاهتزازات عند استخدام المتحكم العائم تم تخفيضها من القيمة ( $4.829 \times 10^{-6}$ ) إلى القيمة ( $2.339 \times 10^{-6}$ ).



الشكل (23) مقارنة اهتزازات المحور في حالة المتحكم العائم بثلاث قواعد مثلثية خطية مع المتحكم التقليدي

### النتائج والمناقشة:

- 1- تم في هذا البحث دمج النموذج الرياضي للمحور الدوار والنموذج الرياضي للمحمل المغناطيسي من أجل تصميم نظام تحكم للحد من الانحرافات الناتجة عن عمل المحور الدوار والقوى التي يتعرض لها المحور أثناء التشغيل.
- 2- توصلنا في هذا البحث إلى تخفيض الانحرافات المتولدة في المحور الدوار عن طريق تصميم نظامي تحكم تقليدي ومتقدم ويمكننا تلخيص النتائج بالجدول التالي:

بدون تحكم	PID	FLC 3*3 liner	
$2.89 \times 10^{-4}m$	$5 \times 10^{-6}m$	$2.5 \times 10^{-6}m$	مطل الاهتزاز
7.1sec	0.36 sec	0.25sec	زمن الوصول للاستقرار
---	0.068 sec	0.037 sec	زمن استجابة النظام

## الاستنتاجات والتوصيات:

### الاستنتاجات :

- 1- يلاحظ أن سعة الاهتزاز باستخدام نظام تحكم متقدم FLC 3\*3 liner تنخفض بنسبة 99.13% بالمقارنة مع المحور الدوار بدون نظام تحكم وزمن الوصول للاستقرار أصغر بـ 28.4 مرة من زمن الاستقرار للمحور بدون نظام تحكم .
- 2- يلاحظ أن سعة الاهتزاز باستخدام نظام تحكم متقدم PID تنخفض بنسبة 98.27% بالمقارنة مع المحور الدوار بدون نظام تحكم وزمن الوصول للاستقرار أصغر بـ 19.7 مرة من زمن الاستقرار للمحور بدون نظام تحكم .

### التوصيات:

- 1- استخدام أنظمة تحكم أخرى على النموذج الرياضي المدروس .
- 2- استخدام الشبكات العصبونية على المحور وذلك لمحاولة تخفيض الانحرافات فيه بشكل أكبر.

## References:

- [1]. MOHD SAFWAN BIN MAT DIN 2015 DYNAMICS OF ROTOR SUPPORTED BY MAGNETIC BEARING Universiti Teknologi PETRONAS
- [2]. Sena Jeong<sup>1,2</sup> and Yong Bok Lee<sup>1</sup> 2015 Vibration control of high-speed rotor supported by hybrid foil-magnetic bearing with sudden imbalance Journal of Vibration and Control
- [3] Kuan-Yu Chen<sup>b</sup>, Pi-Cheng Tung<sup>a,\*</sup>, Mong-Tao Tsai<sup>a</sup>, Yi-Hua Fan -2008-A self-tuning fuzzy PID-type controller design for unbalance compensation in an active magnetic bearing-2008 Elsevier Ltd. All rights reserved. doi:10.1016/j.eswa.2008.10.055.
- [4] Yuanwen Li and Changsheng Zhu– 2023- Detection of Unbalance in Rotating Machines Using Shaft Deflection Measurement during Its Operation - IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering.
- [5] Viliam Fedák, Pavel Záskalický and Zoltán Gelvanič 2014 Analysis of Balancing of Unbalanced Rotors and Long Shafts using GUI MATLAB.
- [6] Lusty, Christopher 2016 Rotor Vibration Reduction and Control via Flexibly-Mounted Internal-Stator Magnetic Bearings University of Bath
- [7] Xie, X. (2004). Comparison of bearings-for the bearing choosing of high-speed spindle design. Department of mechanical engineering, University of Utah
- [8] Bert-Uwe Koehler<sup>\*</sup>, Joachim Denk, Gijs Van Maanen and Matthias Lang 2017 Applying Standard Industrial Components for Active Magnetic Bearings Siemens AG, Nonnendammallee 72, 13629 Berlin, Germany
- [9] Volodymyr Mykhaylyshyn 2011 Application of Active Magnetic Force Actuator for Control of Flexible Rotor System Vibrations ETD Archive.