مجلة جامعة طرطوس للبحوث والدراسات العلمية _ سلسلة العلوم الهندسية المجلد (٧) العدد(٤) ٢٠٢٣
Tartous University Journal for Research and Scientific Studies - engineering Sciences Series Vol. (7) No. (4) 2023

الصيانة التنبؤية لمحركات السّيور النّاقلة اعتماداً على تقنية إنترنت الأشياء والمُتحكّمات المُصغّرة

أ. د. م. ثائر أحمد ابراهيم*

م. محمد صادق علي**

(تاريخ الإيداع ٢٠٢٣/٢/٢٣ . قُبِل للنشر في ٢٠٢٣/٥/١٤)

□ ملخّص□

يتمحور العمل في هذ البحث حول تصميم وتنفيذ نظام تحكّم ومراقبة يؤمّن الصّيانة التنبؤيّة للمحركّات التحريضيّة للسّيور النّاقلة المتواجدة في أغلب المصانع. يعتمد النظام على معيار "ISO 10816" من أجل تحديد حالة العمل (الطّبيعي، الصّيانة التنبؤيّة، وحالة الإيقاف عند الطوارئ). يقوم النظام بمراقبة اهتزاز المحرك والبارامترات الأخرى (الجهد والتّيار) وإرسال بريد الكتروني عند وجود حالة عطل مُحتمل، والإيقاف الطّارئ عند تجاوز القيم المسموحة للاهتزاز.

يعتمد النظام على المتحكّم المُصغّر "ESP32" الرخيص الثمن لمُعالجة البيانات، وعلى منصّة "Ubidots" التي تمثّل واجهة إنترنت الأشياء لإرسال رسائل البريد الالكتروني وتوفير المراقبة والتحكّم عن بعد بواسطة الحاسوب أو أي هاتف ذكي.

تم تنفيذ النظام واختباره على محرّكات السّير النّاقل للمواد الأولية بين الأفران والمطاحن في معمل إسمنت طرطوس. تظهر مناقشة نتائج الاختبار أنّ النظام المُصمم يقوم بوظائفه بشكل صحيح ويحقق الغاية المطلوبة منه.

الكلمات المفتاحيّة: الصّيانة التنبؤيّة، محرّك، اهتزاز ,ESP32, UBIDOTS, IoT.

* أستاذ في قسم هندسة الأتمتة الصناعية – كلية الهندسة التقنية – جامعة طرطوس – سوريا.

** طالب دراسات عليا، ماجستير هندسة التحكم والأتمتة الصناعية–كلية الهندسة التقنية– جامعة طرطوس– سوريا.

مجلة جامعة طرطوس للبحوث والدراسات العلمية _ سلسلة العلوم الهندسية المجلد (٧) العدد(٤) ٢٠٢٣
Tartous University Journal for Research and Scientific Studies - engineering Sciences Series Vol. (7) No. (4) 2023

Predictive maintenance of production lines motors based on the Internet of Things and the microcontroller

Prof. Dr. Eng. Their Ahmad Ibrahim*
Eng. Mohamad Sadek Ali**

(Received 23/2/2023 . Accepted 14/5/2023)

□ **ABSTRACT**

The work in this research focuses on the design and implementation of a control and monitoring system that provides predictive maintenance for the induction motors of conveyor belts that are found in most factories. The system is based on the "ISO 10816" standard in order to determine the operating status (normal, predictive maintenance and emergency stop status). The system monitors the vibration of the motor and other parameters (voltage and current), sends an e-mail when there is a possible malfunction, and emergency stop when the permissible values of vibration are exceeded.

The system is used on an inexpensive "ESP32" microcontroller for data processing, and on the 'Ubidots" platform, which represents an Internet of Things interface for sending emails and providing remote monitoring and control via a computer or a smartphone.

The system was implemented and tested on conveyor motors for materials between kilns and mills in Tartous Cement Factory.

Discussion of the test results showed that the designed system performs its functions properly and achieves its intended purpose.

Keywords: Predictive maintenance, Engine, Vibration, ESP32, UBIDOTS, IOT.

* Professor in Department of Industrial Automation, Faculty of Technical Engineering, Tartous University. Syria.

** Scientific Student, Master in Department of Control and Industrial Automation Faculty of Technical Engineering, Tartous University. Syria.

1- المقدّمة:

بسبب الخوف من زيادة الإنفاق تُحجم المؤسّسات الصناعية الصّغيرة والمتوسّطة عن تبنّي تقنيّات جديدة تفيد في أتمتة عمليات المراقبة والتحكّم، من هنا لابدّ من إيجاد حلول تواكب التّطور وبتكلفة ماديّة قليلة [1].

في الحقيقة، إنّ البيانات الّتي تراقب أداء عمل التّجهيزات والآلات (مثل بارامترات الاهتزاز، التيّار، ...الخ) في الزّمن الحقيقي ذات أهميّة أعلى من البيانات المجمّعة عند المرحلة النهائيّة للمُنتج أو في نهاية فترة العمل، ذلك لما تحمله هذه البيانات من تنبّؤ لاحتياج الصّيانة بدلاً من الصّيانة الدوريّة المعتمدة حالياً في العديد من المصانع [2].

حالياً، تطبق المنشآت الصناعية الحديثة مبدأ الصّيانة التنبؤيّة التي تعتمد على تقنية إنترنت الأشياء (IOT). حيث يتمّ تحصيل البيانات بواسطة أجهزة استشعار متوضّعة على التّجهيزات، ومن ثم إرسالها عبر الشّبكة (Internet) إلى نظام المُعالجة واتّخاذ القرار ليتم اقتراح الصّيانة التنبؤيّة بناءً على التغيّرات في بيانات البارامترات المُقاسة [3].

تم إجراء الكثير من الدراسات والأبحاث حول الصيانة التنبؤية التي دلت على أهميتها، نذكر بعضاً منها: دراسة في عام 2020 قام فيها الباحث F.Aswin بتصميم نظام لمراقبة اهتزاز الآلات الدّوارة عن طريق ثلاثة حسّاسات تسارع، وعرض القيم على شاشة الحاسب عن طريق البيئة البرمجية LabView [4]. وفي دراسة أخرى عام 2020 قام A.Lundell بإنشاء نظام صيانة تنبؤيّة لمحرّكات السّفن اعتماداً على مستشعرات الصوت والاهتزاز وقياسات بارامترات الزيت [5]. وفي دراسة نُشرت عام 2019 قام A.khademi بتوضيح إمكانيّة استخدام إنترنت الأشياء للصّيانة الذكيّة وكيف يمكن لإنترنت الأشياء الصّناعي أن يساعد في مراقبة حالة الآلات الدّوارة باستخدام تحليل الاهتزاز، وتم إدخال جيل جديد من حسّاسات قياس التّسارع لقياس الاهتزازات وتطوير تطبيق ويب للحصول على البيانات لتقييم حالة الأجهزة [6]. وفي عام 2018 قام الباحث Kiangala بتطوير نظام تحكّم مؤتمت لمعمل لتعبئة الزجاجات بالاعتماد على المُتحكّم المنطقي المُبرمج PLC Siemens S7-300، وقام بإضافة حسّاس اهتزاز وتفعيل نظام الصّيانة التنبؤيّة بالاستناد على المعيار ISO 10816، واعتمد على اللّغة البرمجيّة Python لإرسال رسائل البريد الالكتروني [1].

في هذا البحث تم تطبيق مبدأ الصّيانة التنبؤيّة لاكتشاف علامات الإنذار المبكّر، والمتعلّقة بأعطال محتملة في السّيور النّاقلة والّتي قد تؤدّي إلى توقّف الإنتاج في حال التّأخّر بالصّيانة. ويتمحور العمل حول تصميم وتنفيذ نظام يؤمّن الصّيانة التنبؤيّة للمحركّات التحريضيّة للسّيور النّاقلة المتواجدة في أغلب المصانع والمنشآت الإنتاجية.

كدراسة حالة، تم اختبار النظام المُصمم في الشركة العامة للإسمنت في مدينة طرطوس على السّير النّاقل للمواد الأوليّة بين المطاحن والأفران، حيث أظهرت الدّراسات الميدانيّة لمعمل الإسمنت كثرة الأعطال في محرّكات السّير لأسباب عدّة أغلبها تلف الرّولمان في محرّك السّير، انحراف السّير النّاقل وغيرها من الأسباب.

2- أهميّة البحث وأهدافه:

تكمن أهميّة البحث في تصميم نظام تحكّم ومراقبة مؤتمت للصيّانة التنبؤيّة لمحرّكات السّيور النّاقلة باستخدام متُحكّمات الـ Arduino غير المُكلفة وتقنيّة الـ IoT الحديثة بإمكانه القيام بـ:

- ✓ الصّيانة التنبؤيّة لمحركات السّيور الناقلة، وبالتّالي تلافي الخسائر الماديّة النّاجمة عن حدوث عطل قد يؤدّي إلى تلف المكوّنات بشكل كامل (المحرّك، علبة السّرعة، محور، ...الخ).
- ✓ تقليل وقت توقّف الإنتاج عن طريق إرسال إشعار بالبريد الإلكتروني إلى عمال الصّيانة لإعلامهم بحاجة الكشف على أحد المحرّكات تفادياً لحدوث عطل، وما ينجم عن ذلك من انقطاع عن العمل.

الهدف العام من هذا البحث هو تصميم نظام مؤتمت غير مُكلف مادياً لحماية محرّكات السّيور النّاقلة واختباره على محرّك السّير النّاقل للمواد الأوليّة بين الأفران والمطاحن في معمل الإسمنت في طرطوس، يحقّق الإمكانيّات التّالية:

- مراقبة البارامترات الدّالة على عمل المحرك (جهد، تيّار، اهتزاز) وعن بعد، تتم المراقبة بواسطة حاسوب أو أي هاتف ذكي.
- إرسال رسالة بريد الكتروني إلى مختصّ الصّيانة عند وجود قيمة اهتزاز غير طبيعية ليتم بناءً عليها اتّخاذ القرار لبدء الصّيانة.
- الفصل تلقائياً عن العمل في حال تجاوز قيم الاهتزاز المسموحة.

3- طرائق البحث وموادّه:

في البداية قمنا بدراسة معيار الاهتزاز الذي يشكّل الرّكن الأساسي للصيّانة التنبؤيّة، وتحديد البارامترات المطلوبة بما يناسب دراستنا.

ومن ثم قمنا ببناء مخطط صندوقي لنظام التحكّم والمراقبة المُقترح تصميمه وشرح عناصر ومكوّنات هذا النّظام. حيث تمّ اختيار المتُحكّم من نوع آردوينو (شريحة: Arduino ESP32) ومن أجل برمجته استخدمنا البرنامج "Arduino IDE" المفتوح المصدر.

تم استخدام حساس التّسارع "Mpu6050 with Kalman filter" لحساب قيم الاهتزاز، وحسّاسات تيّار "Sct 013" وحسّاسات جهد "Zmpt101-b"، بالإضافة إلى وحدة مخارج (ريليه).

من أجل تصميم واجهة المراقبة والتحكّم، استخدمنا منصّة "Ubidots" التي توفّر إضافة الى الموقع الخاصّ بها تطبيقاً للهواتف الذكيّة.

وفي النّهاية قمنا باختبار النّظام المصمّم ومناقشة نتائجه.

4- نظام الصّيانة التّنبؤيّة للمحرّكات التّحريضيّة:

الهدف الرئيسي لمراقبة الحالة وأنظمة حماية خطوط الانتاج هو ضمان التشغيل المستمر الصحيح لآلات المصنع لذلك يتم تركيب أنظمة قياس الاهتزاز على المحركات من أجل التحليل المستمر لاهتزازات الآلات. لهذا الغرض نحتاج إلى مرجع لمقارنة اهتزاز الآلة معه لتقييم حالة كل آلة.

يوفر المعيار "ISO 10816" مرجعاً للاهتزازات المسموح بها وحالات الإنذار للآلات المختلفة بناءً على التحليلات الإحصائية التي تم جمعها بواسطة "ISO TC 108". يُمثل "ISO 10816" أحد المعايير الأولى والأكثر تطوراً لتقييم اهتزاز الآلات بما في ذلك أنواع مختلفة من الآلات مثل توربينات الرياح والتوربينات المائية والتوربينات الغازية والتوربينات البخارية والآلات الترددية، ...إلخ. يتم مراقبة الاهتزازات الميكانيكيّة للمحرّك ومقارنتها مع المعيار

"ISO 10816" الذي يصنّف المحرّكات التحريضيّة حسب استطاعتها إلى أربعة أقسام والاهتزازات الميكانيكية (التي تقدّر بالميلي متر/ ثانية أو إنش/ ثانية) إلى أربع مستويات [7]. يوضّح الجدول (1): مستويات الاهتزاز المختلفة (جيّد، مرضٍ، غير مرض وغير مقبول)، والأصناف الأربعة للمحرّكات التحريضيّة.

الجدول (١): معيار "ISO 10816" لمستويات الاهتزاز المختلفة للمحرّكات التحريضيّة [1].

VIBRATION SEVERITY PER ISO 10816						
Machine			Class I small machines	Class II medium machines	Class III large rigid foundation	Class IV large soft foundation
	in/s	mm/s				
Vibration Velocity Vrms	0.01	0.28	good	good	good	good
	0.02	0.45				
	0.03	0.71				
	0.04	1.12	satisfactory			
	0.07	1.80		satisfactory		
	0.11	2.80			satisfactory	
	0.18	4.50	unsatisfactory			unsatisfactory
	0.28	7.10		unsatisfactory	unsatisfactory	
	0.44	11.2				
	0.70	18.0	unacceptable	unacceptable	unacceptable	unacceptable
	0.71	28.0				
	1.10	45.0				

يتم تقسيم الفئات المختلفة للمحرّكات في الجدول السابق، على النّحو التّالي:

الفئة الأولى: آلات صغيرة الاستطاعة (من 0 إلى 15 كيلو وات).

الفئة الثّانية: آلات متوسّطة الاستطاعة (من 15 إلى 75 كيلو وات).

الفئة الثّالثة: آلات كبيرة الاستطاعة (استطاعتها > 75 كيلو وات) مثبّتة على هياكل وأساسات صلبة.

الفئة الرّابعة: آلات كبيرة الاستطاعة (استطاعتها > 75 كيلو وات) ولكن مثبّتة على هياكل مرنة (على سبيل المثال مجموعات المولّدات التوربينيّة والتوربينات الكهربائيّة التي تزيد عن 10 ميجاوات).

تتم قراءة سرعة الاهتزاز "VRMS" من مستشعر اهتزاز يتم تركيبه على أقرب نقطة من محور المحرّك، يتم بعد ذلك توصيل الجانب الآخر من المستشعر بوحدة التحكّم.

كما نلاحظ، الجدول مُقسم إلى أربع حالات (أقسام): الحالة الأولى مظلّلة باللّون الأخضر، والثّانية هي المظلّلة باللّون الأخضر الفاتح، والثّالثة هي المظلّلة باللّون الأحمر الفاتح والرّابعة هي المظلّلة باللّون الأحمر.

الحالة ١: تمثّل الحالة الطّبيعية لعمل المحرّك.

الحالة ٢: تمثّل حالة العمل المرضي للمحرّك، يمكن تجاهل الاهتزازات في هذه الحالة، ولكن وبما أنّ الوقاية دائماً أفضل من العلاج فيجب مراقبة هذه الحالة لأنّه من المرجّح أن يتمّ تحويلها إلى حالة غير مقبولة لاحقًا. في حال استمرّ الاهتزاز ضمن هذه الحالة لزمن محدّد (تم وضع هذا الزّمن في بحثنا ساعة واحدة)، فسيتم إرسال رسالة لبدء الصّيانة التنبؤيّة.

الحالة ٣: تمثّل حالة العمل غير المرضي. إذا كانت سرعة اهتزاز المحرّك الّتي تمّ الحصول عليها في وقت محدّد تقع ضمن النّطاق غير المرضي، فسوف يطلب النّظام صيانة تنبؤيّة عند أول توقّف للماكينة (المحرّك).

الحالة ٤: تمثّل حالة العمل غير المقبول. وهذا يتطلّب اهتماماً فوريّاً لسلامة النّظام بأكمله، لذلك يطلق عليها الصّيانة التّصحيحيّة. تعتبر الحالة ٤ بمثابة إنذار من الدّرجة الأولى.

كدراسة حالة سنقوم بدراسة محركات السّير النّاقل للمواد الأوليّة بين المطاحن والأفران في معمل إسمنت طرطوس حيث أظهرت الزيارات الميدانيّة كثرة الأعطال في محرّكات هذا السّير. هناك محركين تحريضيين، الأوّل استطاعته 18 كيلو وات والثّاني 18,5 كيلو وات، الشّكل (١)، مواصفات المحركين في الجدول 2.

كما نلاحظ، يتبع المحركين للمحرّكات من الفئة الثّانية، وعليه تكون بارامترات الحالات الأربع، كما يلي: الحالة الأولى أقل من 1.12mm/s والحالة الثّانية في المجال بين 1.12 و 2.8mm/s والحالة الثّالثة في المجال بين 2.8 و 7.1mm/s والحالة الرّابعة أكبر من 7.1mm/s.

الشّكل (1): اللّوحة الاسميّة لمحرّكيّ السّير النّاقل للمواد الأوليّة بين المطاحن والأفران في معمل إسمنت طرطوس

الجدول (٢) المواصفات الفنية للمحرّكين:

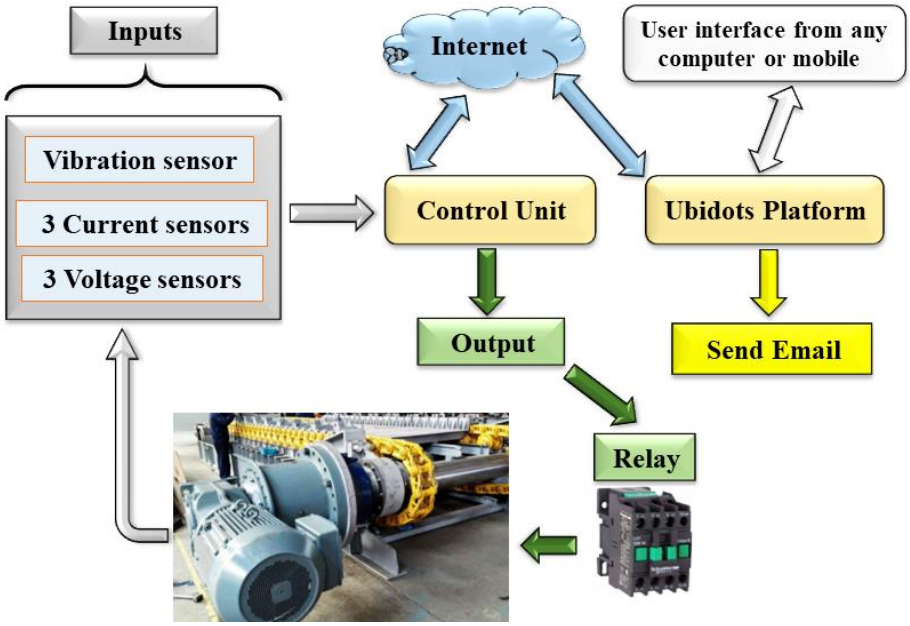
مواصفات المحرك	المحرّك الأوّل	المحرّك الثّاني
الاستطاعة	18 كيلو واط	18.5 كيلو واط
سرعة الدّوران	980 دورة/دقيقة	720 دورة/دقيقة
عامل الاستطاعة	0,84	0.8
التيّار الاسمي	36.5 أمبير	40.5 أمبير
جهد التّشغيل	380 فولت	380 فولت
التّوصيل	مثّلثي	نجمي

5- تصميم نظام التحكّم والمراقبة للصيّانة التنبؤيّة لمحرّكات السّير النّاقل:

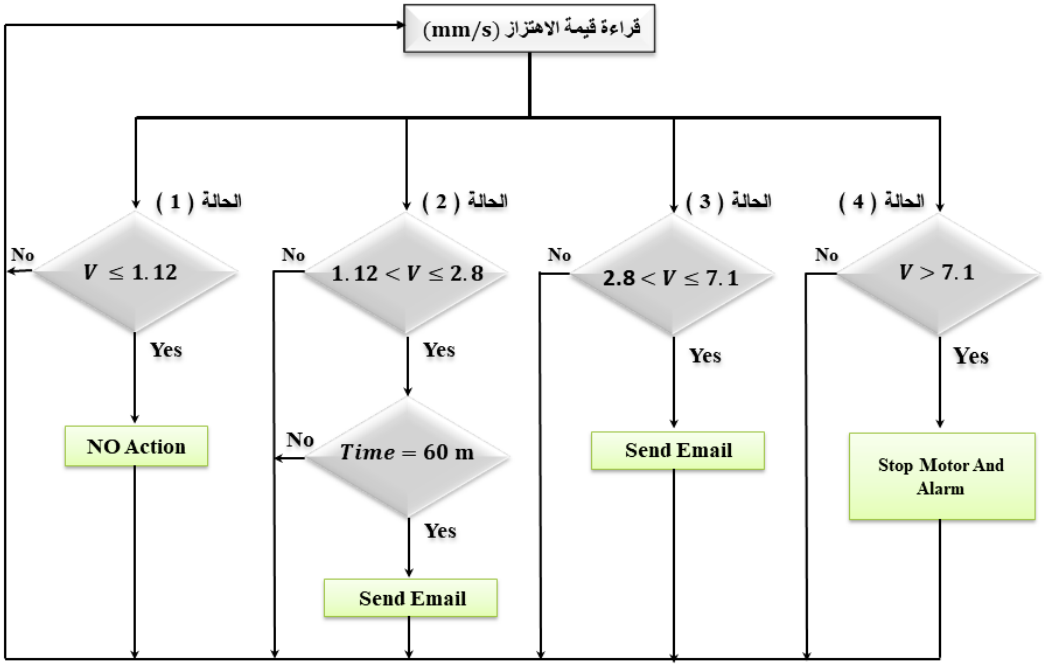
يبيّن الشّكل (2) المخطط الصندوقي لنظام التحكّم والمراقبة المُقترح والقائم على تقنية إنترنت الأشياء، استخدمنا ثلاثة حسّاسات للجهد وثلاثة حسّاسات للتيّار لقياس الأطوار الثّلاثة للمحرّك بالإضافة إلى حسّاس لقياس اهتزاز المحرّك.

يقوم المُتحكّم بقراءة بيانات الحسّاسات ومُعالجتها ليتم إرسالها عن طريق الإنترنت إلى منصّة إنترنت الأشياء "Ubidots" والّتي يمكن الوصول إليها من أي حاسب أو هاتف ذكي متصل بالإنترنت.

تتم مقارنة قيمة الاهتزاز مع القيم المرجعيّة وذلك كما هو موضح بالخوارزميّة التي قمنا بتصميمها لتحليل الاهتزاز والمبينة في الشكل (3)، حيث لا يتم تنفيذ شيء إذا كان الاهتزاز طبيعي (ضمن الحالة "1")، وفي حال كان الاهتزاز ضمن الحالة "2" وبقي ضمنها لمدّة ساعة كاملة، يتم إرسال بريد الكتروني للإعلام بذلك، أما إذا كان ضمن الحالة "3" يتم إرسال بريد الكتروني مباشرةً. أما إذا وصل الاهتزاز إلى لحالة "4" فسيتم إيقاف السّير الناقل ويظهر على المنصّة إنذار طوارئ (Emergency).



الشكل (2): المخطط الصّندوقي لنظام التحكّم والمراقبة المُقترح



الشكل (3): الخوارزميّة المتّبعة لتحليل الاهتزاز

5-1- وحدة التّحكّم (Control Unit):

بمقارنة المُتحكّمات المُمكن استخدامها، تم اختيار الآردوينو (Arduino) وذلك لرخص ثمنه وعدم الحاجة إلى جهد كبير لتأمين التغذية له واستهلاكه المنخفض للتيار الكهربائي. بالإضافة إلى سهولة التعامل معه وبساطة لغة البرمجة، حيث يتم برمجته عن طريق الحاسوب باستخدام البرنامج "Arduino IDE" المفتوح المصدر.

تتوفر شرائح الآردوينو بأنواع عديدة. تم اختيار المُتحكّم المُصغّر "ESP32" ، الشكل (4)، وذلك نظراً لقدرته على الاتّصال بالوايفاي وسرعة المعالجة بالإضافة التّكلفة القليلة [8].

الشّكل (4): المُتحكّم ESP32-NODE MCU

ومن أجل بناء برنامج المراقبة والتحكّم استخدمنا منصة "Ubidots" التي إضافة إلى الموقع الخاص بها تطبيقاً لهواتف الأندرويد، بالإضافة لسهولة التّعامل معها كما أنّه عن طريقها يمكن اجراء عمليّات المقارنة للبارامترات والتي على أساسها يتم إرسال رسالة بريد الكتروني أو تشغيل/إيقاف المحرّك [9].

كما أنها تدعم بروتوكولات الاتصال (كبروتوكول MQTT) المستخدم في هذا البحث، وهو بروتوكول اتصالٍ من آلة إلى آلة (M2M) ويعمل ضمن طبقة التطبيقات. تتكون بنية اتصال MQTT من وسيط (MQTT Broker) مركزيّ وأيّ عدد من عملاء MQTT الذين همّ أجهزة أنترنت الأشياء، يتكون الوسيط من العديد من "صناديق البريد" التي تسمى الموضوعات حيث يمكن لكلّ عميلٍ الاشتراك ونشر الرسائل (Pub-Sub).

يتّصل كلّ من هؤلاء العملاء بالوسيط، ويشترك في أيّ عددٍ من الموضوعات، وينشر الرسائل بأي عدد من الموضوعات، وسيتلّقى العملاء بمجرد الاشتراك في موضوعٍ معينٍ كلّ رسالة يتمّ إرسالها حول هذا الموضوع خلال الفترة التي يتم فيها الاشتراك.

5-2- حسّاسات ومشغّلات النّظام (Sensors and Actuators):

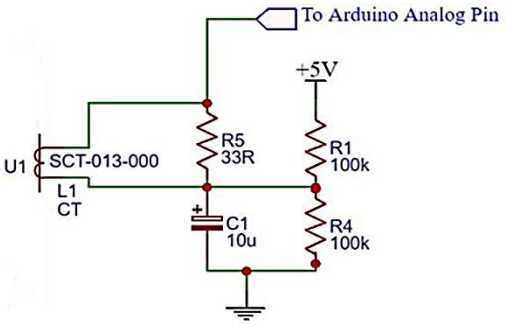
سنعرض فيما يلي وبشكل موجز الحسّاسات والمشغّلات اللّازمة لتصميم نظام التحكّم والمراقبة المُقترح:

يبين الشكل (5) حساس التسارع والميلان، وهو عبارة عن مستشعر يمكنه قياس التسارع والسّرعة والدّوران حول المحاور الثّلاثة. سنستخدم قراءة هذا المستشعر من أجل استنتاج قيم الاهتزاز [10].	 **الشكل (5): مستشعر التّسارع والميلان Mpu6050**
يقيس المستشعر الموضّح في الشّكل (6) قيمة التّيار المتناوب بمجال تتراوح قيمته من 0 إلى 100 أمبير. إشارة الخرج هي إشارة تيار مجاله من 0 إلى 50 ميلي أمبير متناسبة مع قيمة التّيار المقاسة. سوف نستخدم ثلاثة مستشعرات لقياس تيّار المحرّكات ثلاثية الطّور [11] ,[12].	 **الشكل (6): مستشعر التّيار المتناوب Sct-013-000**

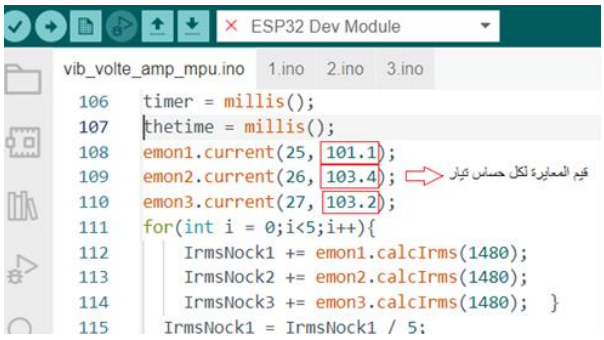
يقيس المستشعر الموضّح في الشّكل (7) قيمة الجهد المتناوب بمجال تتراوح قيمته من 0 إلى 1000 فولت. إشارة الخرج هي إشارة جهد مجاله من 0 إلى 5 فولت مستمر متناسبة مع قيمة الجهد المقاسة [11]. سوف نستخدم ثلاثة مستشعرات لقياس جهد دخل المحرّكات ثلاثيّة الطّور.	 **الشكل (7): مستشعر الجهد المتناوب Zmpt101b**
المُشغل هو عبارة عن وحدة الريليهات المبينة في الشكل (8)، جهد تشغيل الرّيليه الواحدة (القناة) 5 فولت مستمر. تم استخدامها للتحكّم في تشغيل الحمل (المحرك) الذي يستهلك تيّار عالي لا يتحمّله قطب المتحكّم [13].	 الشكل (8): وحدة ريليهات

5-3- معايرة الحسّاسات:

حسّاس التيّار: في البداية قمنا بتحويل إشارة خرج الحسّاس Sct-013 التّماثلية من إشارة تيّار إلى إشارة جهد ليستطيع قراءتها المتحكّم ESP32 عن طريق الدّارة المبيّنة في الشّكل (9)، حيث تم إضافة مقاومة تحميل لتيّار الخرج (R5). ثم تم معايرة الحسّاس برمجياً عن طريق تغيير قيمة المعايرة، الشّكل (10):

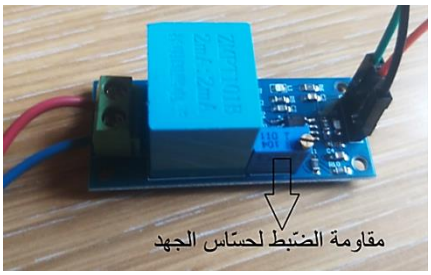


الشّكل (10): معايرة حسّاس التّيار بشكل برمجي.



الشّكل (9): دارة تحويل إشارة التيّار إلى جهد.

حسّاس الجهد: تتم معايرة حسّاس الجهد عن طريق ضبط قيمة المقاومة المتغيّرة الموجودة في الحسّاس كما هو موضح في الشّكل (11):



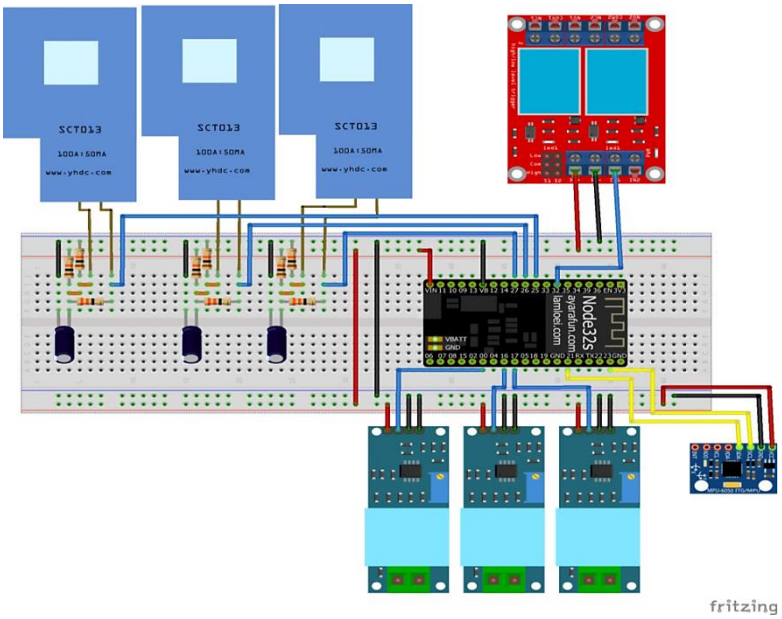
الشكل (11): معايرة حساس الجهد عن طريق ضبط قيمة المقاومة.

الحسّاس MPU-6050:

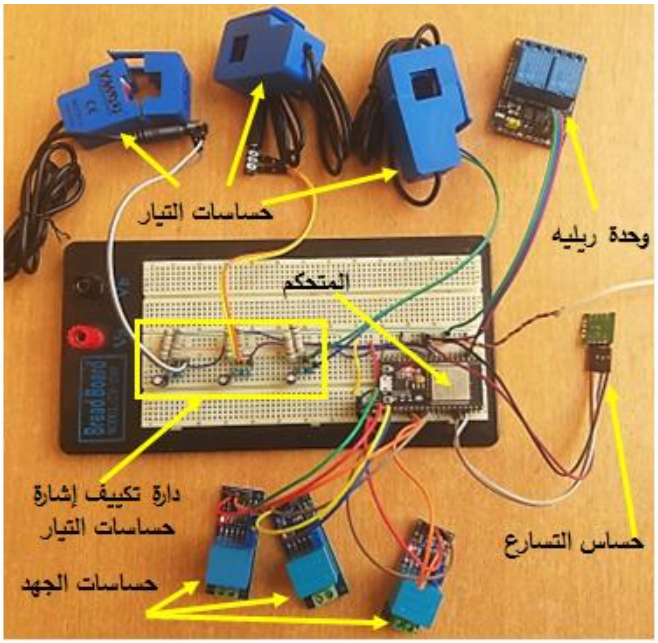
يقوم هذا الحسّاس بقياس تسارع الجاذبيّة الأرضيّة وزاوية الميل، ولكن معيار الصّيانة التنبؤيّة ISO-10816 يعتمد على سرعة الاهتزاز لذلك قمنا بتحويل القيمة المُقاسة للميل إلى سرعة برمجيّاً باستخدام مكتبات البيئة البرمجيّة Arduino IDE. الميّزة الرئيسيّة لهذا الحسّاس هي الاتّصال المباشر مع المتحكّم ESP32 عن طريق البروتوكول I2C [10].

5-4- تنفيذ النّظام:

قمنا بدايةً برسم مخطّط التّوصيل لمكوّنات النّظام باستخدام البرنامج "Fritzing" الموضح في الشّكل (12)، ومن ثم تم التّنفيذ العملي كما يبيّن الشّكل (13).



الشّكل (12): توصيل النّظام على برنامج Fritzing



الشّكل (13): تنفيذ النّظام المصمّم

5-5- التّصميم البرمجي:

5-5-1- تصميم برنامج التحكّم:

يمكن برمجة شرائح ESP32 عن طريق البرنامج Arduino IDE أو MycroPython، تم اختيار البرنامج Arduino IDE ، كونه مفتوح المصدر وسهل البرمجة حيث يضم العديد من المكتبات المفيدة.

في البداية قمنا بتضمين المكتبات الضرورية للعناصر المستخدمة في النظام، ثم عرّفنا أقطاب الدخل وقمنا بضبط إعدادات الاتصال بالإنترنت والخادم، حيث بدايةً نحدد اسم الشبكة وكلمة السر ثم نقوم بربط الجهاز مع المنصة عن طريق تعليمة *const char *UBIDOTS_TOKEN = "##########"* ومن ثم تعريف كافة المتغيرات التي سيتم تخزين القيم فيها وارسالها إلى الخادم. تم إعطاء الأفضلية في البرنامج لقراءة بيانات الاهتزاز بشكل دوري (كل 2 ميلي ثانية) لكون الاهتزاز هو البارامتر الأهم في النّظام المصمّم، ولزيادة الدّقة يتم إرسال قيم الاهتزاز إلى مكتبة المتوسّط الحسابي باستخدام التّعليمة المبيّنة في الشّكل (14).

```
10   Serial.print("velocity is");
11   Serial.println (velocity);
12   VelocitytAvgX = myAvg.reading(velocity);
13   //Serial.print("AVGX: ");
```

الشّكل (14): إرسال قيمة الاهتزاز إلى مكتبة المتوسّط الحسابي.

يبيّن الشّكل (15) بأنّه يتم الدّخول الى تابع حساب الاهتزاز بشكل دوري، بينما لا يتم الدّخول إلى تابعي حساب الجهد والتيار إلّا كل ثانية ونصف فقط.

```
137   {
138   vibraition();
139   if (millis()-thetime>=1500){
140   voltage();
141   current();
142   thetime = millis();
143   }
```

الشّكل (15): الدّخول إلى البرامج الفرعيّة لحساب الاهتزاز والجهد والتّيار.

يتم إرسال هذه القيم إلى منصّة Ubidots كل 2000 ميلي ثانية (2 ثانية)، يمكن تغيير هذا الوقت عن طريق تغيير تردّد الإرسال الموضّح في الشّكل (16).

```
45   const char *VARIABLE_LABEL10 = "Emergency";
46   const int PUBLISH_FREQUENCY = 2000;
47   Ubidots ubidots(UBIDOTS_TOKEN);
48   #define Emergency 32
49   void callback(char *topic, byte *payload, unsigne
```

الشّكل (16): التحكّم في تواتر إرسال قيم الحسّاسات إلى منصّة الإنترنت عن طريق تغيير القيمة المحددة.

بالنّسبة لإرسال رسائل البريد الالكتروني يتم ذلك بعد قراءة الاهتزاز على منصّة Ubidots (سيتم توضيحها لاحقاً) أما لإيقاف العمل عند تجاوز القيم المسموحة للاهتزاز، فيتم الفصل بشكل مباشر عن طريق برنامج التّحكم مع العلم بأنّه يمكن التّحكم بالفصل عن طريق المنصّة ولكن الأفضل هو الفصل بشكل مباشر عن طريق برنامج التّحكم

كما يبيّن الشّكل (17)، لأن الفصل عن طريق الإنترنت يمكن أن يحدث فيه تأخير زمني بسبب اعتماده على سرعة الإنترنت.

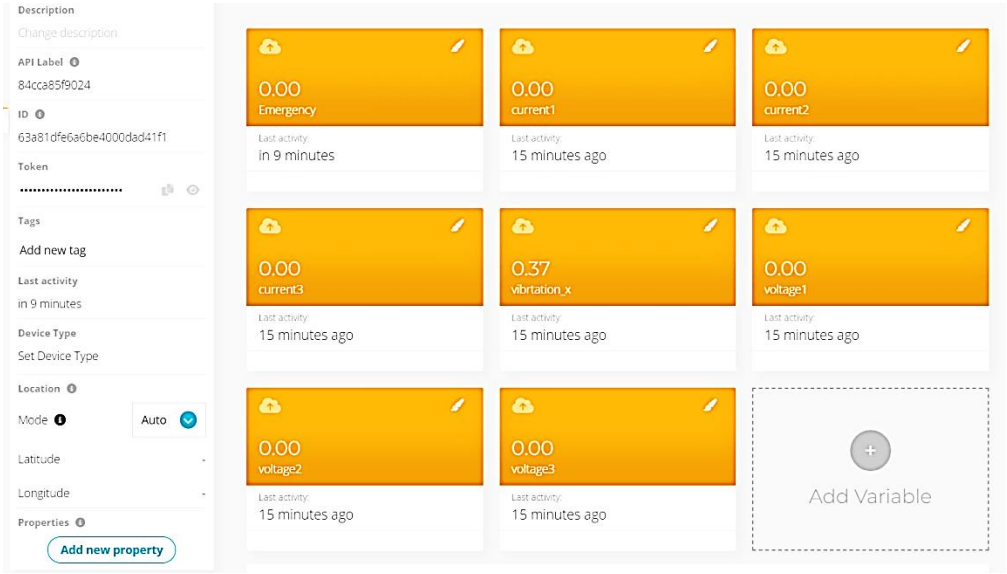
```
158   if (VelocitytAvgX > 7.1)
159   {
160   digitalWrite(Emergency,LOW );
161   im_stop = 1;
```

الشّكل (17): تشغيل ريليه الطوارئ وفصل المحرّك عن العمل.

5-5-2- تصميم واجهة المراقبة والتحكّم على منصّة Ubidots:

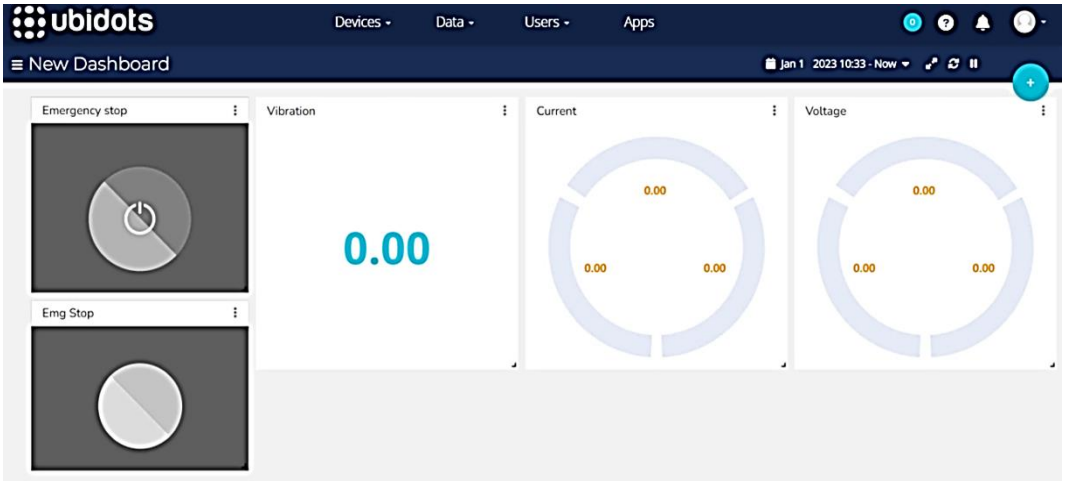
تم الاعتماد في تصميم واجهة التحكم والمراقبة على منصة UBIDOTS مع العلم بأنه لايفضل استخدام منصات مجانية لأنّه لايوجد حماية للبيانات وتم تصميم المنصّة هنا للاختبار فقط ويجب تصميم منصة خاصة وطنيّة.

بعد الدّخول إلى الموقع وإنشاء حساب، نقوم بالدّخول إلى صفحة الأجهزة وإضافة جهاز جديد وضمن هذا الجهاز يتم إضافة المتغيّرات التي تعبّر عن المداخل والمخارج للنّظام المُصمّم، يبيّن الشّكل (18) صفحة الأجهزة مع المتغيّرات الّتي تمّت إضافتها.



الشّكل (18): صفحة الأجهزة في منصة Ubidots

بعد ذلك يتم الدّخول إلى صفحة لوحة القيادة وإضافة المؤشرات المتعلّقة بالمتغيّرات الّتي تم تصميمها في صفحة الأجهزة، هنا تم وضع المتغيّرات المتعلّقة بحساسات الجهد في مؤشّر واحد وكذلك بالنّسبة لحسّاسات التيّار كما هو موضّح في الشّكل (19). في صفحة الأحداث المبيّنة في الشّكل (20)، تمّت عمليّة مقارنة الاهتزاز الحالي مع القيم المرجعيّة لحالات الاهتزاز الّتي ذُكرت سابقاً، حيث في الحدث الأوّل سيتم إرسال بريد الكتروني إذا استمرّ الاهتزاز الّذي تكون قيمته أكبر من (1.8) لمدّة 60 دقيقة، وفي الحدث الثّاني يتم إرسال بريد الكتروني مباشرة اذا تجاوزت قيمة الاهتزاز (4.5) مم/ثانية. يمكن عن طريق هذه الصّفحة بسهولة إضافة مقارنات لكل من حسّاسات الجهد والتيّار لإرسال رسائل بريد الكتروني أو حتّى التّحكم بإيقاف وتشغيل المحرّك.



الشكل (19): صفحة لوحة القيادة في منصّة Ubidots

الشّكل(20): صفحة الأحداث ضمن منصّة Ubidots

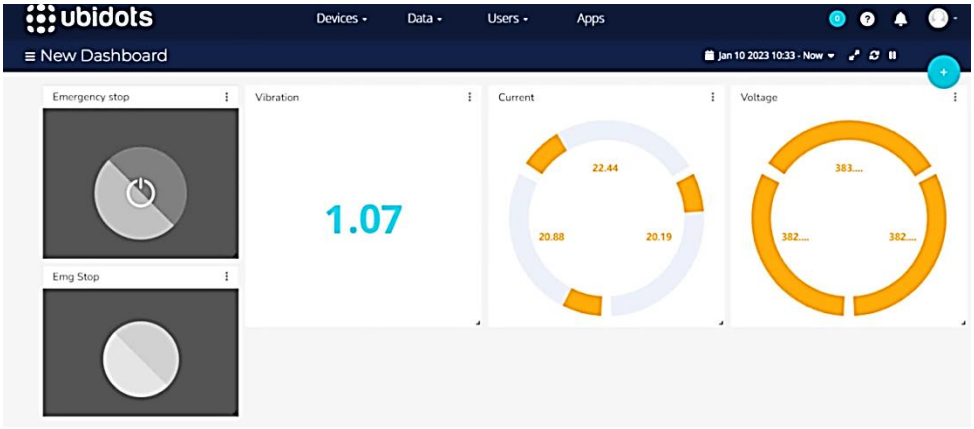
6- اختبار النّظام ومناقشة النّتائج:

6-1- اختبار النّظام:

تم اختبار النّظام بتركيبه على محرّكي السّير النّاقل للمواد الأولية بين الأفران والمطاحن في معمل إسمنت طرطوس كما يبيّن الشّكل (21).

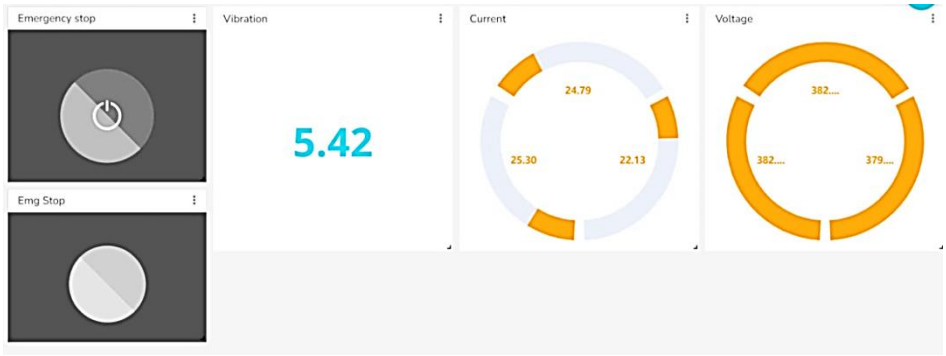
الشّكل (21): اختبار النّظام المُصمّم على محرّكي السّير النّاقل للمواد الأولية بين الأفران والمطاحن في معمل الإسمنت.

تمّت قراءة بارامترات الاهتزاز والتيّار والجهد للمحرّك الأوّل وعرض قيم هذه البارامترات على منصّة الإنترنت Ubidots المبيّنة في الشّكل (22) حيث بيّنت قراءات مستشعر الاهتزاز للمحرّك أنّه سليم ولا وجود حاجة لإجراء صيانة.

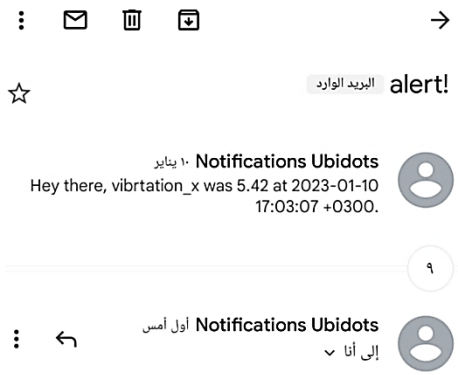


الشّكل (22): عرض قيم الاهتزاز والتيّارات والجهود للمحرّك الأوّل على منصّة Ubidots

وعند اختبار النّظام على المحرك الثاني (والذي كان يُصدر صوت ضجيج عالي يمكن سماعه عند الاقتراب منه) بيّنت قراءة مستشعر الاهتزاز الموضّح في الشّكل (23) أن المحرّك بحاجة إلى صيانة، حيث أنّ قيمة الاهتزاز المقاسة كانت (5.42) وبالتّالي الاهتزاز ضمن نطاق الحالة الثّالثة (حسب معيار ISO 10816)، حيث تمّ بشكل آلي مباشرةً إرسال بريد الكتروني من منصّة Ubidots كما يبيّن الشّكل (24)، حيث تبيّن لاحقاً أن سبب الاهتزاز العالي هو تلف رولمان المحرّك.



الشّكل (23): قيمة الاهتزاز (5.42).



الشّكل (24): إرسال تنبيه بريد الكتروني بقيمة الاهتزاز الحاليّة.

ومن أجل اختبار حالة فصل المحرّك عند الاهتزاز الشّديد (والتي تمثله الحالة "4")، تم تحريك مستشعر الاهتزاز بشكل يدوي، عندها تم تشغيل ريليه التّوقف (الطّوارئ) بشكل فوري عند تجاوز القيمة المسموحة للاهتزاز، وتمّ تشغيل ضوء على واجهة الإنترنت للتعبير عن حالة التّوقف، يبيّن الشّكل (25) الإيقاف الآلي عند الوصول إلى الحالة "4". كذلك يمكن للمُستخدم إيقاف محرّك السّير النّاقل عن طريق الضّغط على المفتاح "Emergency stop" في لوحة القيادة على منصّة Ubidots، كما يوضّح الشّكل (26).

الشكل (25): الإيقاف الآلي عند الاهتزاز العالي **الشكل (26): تشغيل مفتاح الطّوارئ من منصّة Ubidots**

6-2- مناقشة النّتائج:

بيّنت نتائج الاختبار لنظام التحكّم والمراقبة الذي قمنا بتصميمه وتنفيذه أنّه يقوم بوظائفه ويحقق الغاية المطلوبة منه حيث تبين ما يلي:

- ✓ وفّر النّظام لنا إمكانية مراقبة قيم بارامترات محركات السّير (اهتزاز، تيّار، جهد)، عن بعد وفي الزّمن الحقيقي.
- ✓ يفي المتحكّم الذي تم اختياره بالغرض من حيث السّرعة في تنفيذ التّعليمات ومُعالجة البيانات بسرعة وتأمين الاتصال بالإنترنت.
- ✓ تمكّن النّظام من تحديد حالة العمل الطّبيعي وحالة الصّيانة التنبؤية بالإضافة إلى حالة الإيقاف عند الطوارئ.
- ✓ تم إرسال رسالة بريد الكتروني تتضمّن وقت وتاريخ وجود اهتزاز غير طبيعي بالإضافة إلى قيمة الاهتزاز.
- ✓ تكلفة تنفيذ النّظام قليلة لا تتعدّى الـ 50$، كما يبين الجدول (3).

الجدول (3): حساب تكلفة النّظام

اسم المادّة	السّعر بالدولار الأمريكي	الكميّة	المجموع
متحكّم Esp32	10	1	10
حسّاس الجهد	3	3	9
حسّاس التيّار	6	3	18
حسّاس التسارع	4	1	4
وحدة مخارج	3	1	3
توصيلات وملحقات	5	1	5
المجموع الإجمالي			49$

7- الاستنتاجات والتوصيات:

الاستنتاجات:

- يمتاز نظام التحكّم والمراقبة المُصمّم بقلة تكلفته واستجابته السريعة وذلك لاعتماده على متحكّمات رخيصة الثمن وفي متناول اليد (ESP32) وهي تفي بالغرض تماماً من حيث السرعة في تنفيذ التعليمات ومعالجة البيانات والاتصال بالإنترنت.
- مكّنت منصة Ubidots من مراقبة البارامترات التي تؤثر على حالة عمل المحركات في الزمن الحقيقي بالإضافة إلى التحكّم بها (من أي جهاز كومبيوتر أو هاتف محمول).
- إمكانيّة إيقاف السّير النّاقل عن بعد، تلقائياً عند الضرورة، وفّر لنا أماناً عالياً وحماية إضافية لمنظومة خط الإنتاج.
- تم تنفيذ النّظام بخبرات محلية بتكلفة قليلة، وبالتّالي يستطيع أصحاب المنشآت الصّناعية الصّغيرة تركيب هذا النّظام ومواكبة التّطور الحالي للأتمتة الصناعية.
- يمكن تعميم النظام المُصمم وتركيبه على جميع الآلات وليس فقط على خطوط الإنتاج في المنشآت الصناعية لتفادي الأعطال قبل حدوثها، مما يؤمن استمرارية العمل وما يترتب على ذلك من نتائج ايجابية على الناحية الفنية والاقتصادية.

التوصيات:

- نوصي بالاهتمام بموضوع الصيانة التنبؤية في المنشآت الصناعية لتدارك الأعطال قبل أن تتفاقم، وما يترتب على ذلك من فوائد على الصعيد الفني والاقتصادي.
- نوصي بإضافة حسّاس حرارة إلى النظام، واستخدام الحساسات اللاسلكية لإرسال البيانات المتحسسة لاسلكيّاً إلى المتحكّم.
- نوصي باستخدام المُعالج المُصغّر الراسبيري باي (Raspberry Pi) كونه أقوى برمجياً في حال زيادة تعقيد النظام والحاجة إلى معالجة معقّدَة للبيانات.
- نوصي بضرورة مراعاة أمن المعلومات والاهتمام بمسألة تشفير البيانات ضمن بروتوكول (MQTT).
- نوصي بتصميم و تطوير منصات محلية تقدم (MQTT broker).

المراجع:

[1] Kahiomba Sonia Kiangala and Z. Wang, "High Tech Automated Bottling Process for Small To Medium Scale Enterprises Using Plc, Scada and Basic Industry 4.0 Concepts," UNIVERSITY OF SOUTH AFRICA, 2018.

[2] D. T. A. Kumar, "IoT based Condition Monitoring of Generators and Predictive Maintenance D.Swathi," *IEEE J.*, 2019.

[3] D. Ganga and V. Ramachandran, "IoT-Based Vibration Analytics of Electrical Machines," *IEEE Internet Things J.*, 2018.

[4] F. Aswin, I. Dwisaputra, and R. Afriansyah, "Online vibration monitoring system for rotating machinery based on 3-axis MEMS accelerometer," *J. Phys. Conf. Ser.*, 2020.

[5] A. Lundell, "VIBRATION SENSING FOR ENGINE CONDITION MONITORING AND," Faculty of Science and Engineering , Åbo Akademi University, 2020.

[6] A. Khademi, F. Raji, and M. Sadeghi, "IoT Enabled Vibration Monitoring Toward Smart Maintenance," *Proc. 3rd Int. Conf. Internet Things Appl. ieee*, 2019.

[7] O. S. A. El-Kawi, "Predictive Maintenance of Rotating Machines using Arduino Platform," *Int. J. Res. Appl. Sci. Eng. Technol.*, 2020.

[8] M. H. Qahtan, E. A. Mohammed, and A. J. Ali, "IoT-Based Electrical Vehicle's Energy Management and Monitoring System," *Open Access Libr. Journa*, 2022.

[9] N. S. Mohammed and N. H. Selman, "Home Energy Management and Monitoring Using Ubidots Platform," *Al-Furat J. Innov. Electron. Comput. Eng.*, 2020.

[10] R. K. Megalingam, J. M. Varghese, and S. Aarsha Anil, "Distance estimation and direction finding using I2C protocol for an auto-navigation platform," *Int. Conf. VLSI Syst. Archit. Technol. Appl. VLSI-SATA*, 2016.

[11] T. R. Lin, N. H. Omar Khan, and M. Z. Daud, "Arduino based appliance monitoring system using SCT-013 current and ZMPT101B voltage sensors," *Prz. Elektrotechniczny*, 2021.

[12] I. W. A. Suteja, "Sistem Pencatatan Pemakaian Listrik Menggunakan Aplikasi Arduino," *PROtek*, 2019.

[13] A. Rosen *et al.*, "Smart Home Automation System," *Comput. Eng. Calif. STATE Univ. NORTHRIDGE*, 2015.