

مجلة جامعة البعث

سلسلة العلوم الهندسية الميكانيكية
والكهربائية والمعلوماتية



مجلة علمية محكمة دورية

المجلد 43 . العدد 28

1442 هـ - 2021 م

الأستاذ الدكتور عبد الباسط الخطيب

رئيس جامعة البعث

المدير المسؤول عن المجلة

رئيس هيئة التحرير	أ. د. ناصر سعد الدين
رئيس التحرير	أ. د. درغام سلوم

مديرة مكتب مجلة جامعة البعث

بشرى مصطفى

عضو هيئة التحرير	د. محمد هلال
عضو هيئة التحرير	د. فهد شريباتي
عضو هيئة التحرير	د. معن سلامة
عضو هيئة التحرير	د. جمال العلي
عضو هيئة التحرير	د. عباد كاسوحة
عضو هيئة التحرير	د. محمود عامر
عضو هيئة التحرير	د. أحمد الحسن
عضو هيئة التحرير	د. سونيا عطية
عضو هيئة التحرير	د. ريم ديب
عضو هيئة التحرير	د. حسن مشرقي
عضو هيئة التحرير	د. هيثم حسن
عضو هيئة التحرير	د. نزار عبشي

تهدف المجلة إلى نشر البحوث العلمية الأصيلة، ويمكن للراغبين في طلبها

الاتصال بالعنوان التالي:

رئيس تحرير مجلة جامعة البعث

سورية . حمص . جامعة البعث . الإدارة المركزية . ص . ب (77)

. هاتف / فاكس : 963 31 2138071 ++

. موقع الإنترنت : www.albaath-univ.edu.sy

. البريد الإلكتروني : [magazine@ albaath-univ.edu.sy](mailto:magazine@albaath-univ.edu.sy)

ISSN: 1022-467X

قيمة العدد الواحد : 100 ل.س داخل القطر العربي السوري

25 دولاراً أمريكياً خارج القطر العربي السوري

قيمة الاشتراك السنوي : 1000 ل.س للعموم

500 ل.س لأعضاء الهيئة التدريسية والطلاب

250 دولاراً أمريكياً خارج القطر العربي السوري

توجه الطلبات الخاصة بالاشتراك في المجلة إلى العنوان المبين أعلاه.

يرسل المبلغ المطلوب من خارج القطر بالدولارات الأمريكية بموجب شيكات

باسم جامعة البعث.

تضاف نسبة 50% إذا كان الاشتراك أكثر من نسخة.

شروط النشر في مجلة جامعة البعث

الأوراق المطلوبة:

- 2 نسخة ورقية من البحث بدون اسم الباحث / الكلية / الجامعة) + CD / word من البحث منسق حسب شروط المجلة.
 - طابع بحث علمي + طابع نقابة معلمين.
 - إذا كان الباحث طالب دراسات عليا:
يجب إرفاق قرار تسجيل الدكتوراه / ماجستير + كتاب من الدكتور المشرف بموافقة على النشر في المجلة.
 - إذا كان الباحث عضو هيئة تدريسية:
يجب إرفاق قرار المجلس المختص بإنجاز البحث أو قرار قسم بالموافقة على اعتماده حسب الحال.
 - إذا كان الباحث عضو هيئة تدريسية من خارج جامعة البعث :
يجب إحضار كتاب من عمادة كليته تثبت أنه عضو بالهيئة التدريسية و على رأس عمله حتى تاريخه.
 - إذا كان الباحث عضواً في الهيئة الفنية :
يجب إرفاق كتاب يحدد فيه مكان و زمان إجراء البحث ، وما يثبت صفته وأنه على رأس عمله.
 - يتم ترتيب البحث على النحو الآتي بالنسبة لكليات (العلوم الطبية والهندسية والأساسية والتطبيقية):
عنوان البحث .. ملخص عربي و إنكليزي (كلمات مفتاحية في نهاية الملخصين).
- 1- مقدمة
 - 2- هدف البحث
 - 3- مواد وطرق البحث
 - 4- النتائج ومناقشتها .
 - 5- الاستنتاجات والتوصيات .
 - 6- المراجع.

- يتم ترتيب البحث على النحو الآتي بالنسبة لكليات (الآداب - الاقتصاد - التربية - الحقوق - السياحة - التربية الموسيقية وجميع العلوم الإنسانية):
- عنوان البحث .. ملخص عربي و إنكليزي (كلمات مفتاحية في نهاية الملخصين).
- 1. مقدمة.
- 2. مشكلة البحث وأهميته والجديد فيه.
- 3. أهداف البحث و أسئلته.
- 4. فرضيات البحث و حدوده.
- 5. مصطلحات البحث و تعريفاته الإجرائية.
- 6. الإطار النظري و الدراسات السابقة.
- 7. منهج البحث و إجراءاته.
- 8. عرض البحث و المناقشة والتحليل
- 9. نتائج البحث.
- 10. مقترحات البحث إن وجدت.
- 11. قائمة المصادر والمراجع.
- 7- يجب اعتماد الإعدادات الآتية أثناء طباعة البحث على الكمبيوتر:
 - أ- قياس الورق 25×17.5 B5.
 - ب- هوامش الصفحة: أعلى 2.54- أسفل 2.54 - يمين 2.5- يسار 2.5 سم
 - ت- رأس الصفحة 1.6 / تذييل الصفحة 1.8
 - ث- نوع الخط وقياسه: العنوان . Monotype Koufi قياس 20
- . كتابة النص Simplified Arabic قياس 13 عادي . العناوين الفرعية Simplified Arabic قياس 13 عريض.
- ج . يجب مراعاة أن يكون قياس الصور والجداول المدرجة في البحث لا يتعدى 12سم.
- 8- في حال عدم إجراء البحث وفقاً لما ورد أعلاه من إشارات فإن البحث سيهمل ولا يرد البحث إلى صاحبه.
- 9- تقديم أي بحث للنشر في المجلة يدل ضمناً على عدم نشره في أي مكان آخر، وفي حال قبول البحث للنشر في مجلة جامعة البعث يجب عدم نشره في أي مجلة أخرى.
- 10- الناشر غير مسؤول عن محتوى ما ينشر من مادة الموضوعات التي تنشر في المجلة

11- تكتب المراجع ضمن النص على الشكل التالي: [1] ثم رقم الصفحة ويفضل استخدام التهميش الإلكتروني المعمول به في نظام وورد WORD حيث يشير الرقم إلى رقم المرجع الوارد في قائمة المراجع.

تكتب جميع المراجع باللغة الانكليزية (الأحرف الرومانية) وفق التالي:

آ . إذا كان المرجع أجنبياً:

الكنية بالأحرف الكبيرة . الحرف الأول من الاسم تتبعه فاصلة . سنة النشر . وتتبعها معترضة (-) عنوان الكتاب ويوضع تحته خط وتتبعه نقطة . دار النشر وتتبعها فاصلة . الطبعة (ثانية . ثالثة) . بلد النشر وتتبعها فاصلة . عدد صفحات الكتاب وتتبعها نقطة . وفيما يلي مثال على ذلك:

-MAVRODEANUS, R1986- Flame Spectroscopy. Willy, New York, 373p.

ب . إذا كان المرجع بحثاً منشوراً في مجلة باللغة الأجنبية:

. بعد الكنية والاسم وسنة النشر يضاف عنوان البحث وتتبعه فاصلة، اسم المجلد ويوضع تحته خط وتتبعه فاصلة . المجلد والعدد (كتابة مختزلة) وبعدها فاصلة . أرقام الصفحات الخاصة بالبحث ضمن المجلة . مثال على ذلك:

BUSSE,E 1980 Organic Brain Diseases Clinical Psychiatry News , Vol. 4. 20 – 60

ج . إذا كان المرجع أو البحث منشوراً باللغة العربية فيجب تحويله إلى اللغة الإنكليزية و التقيد

بالبنود (أ و ب) ويكتب في نهاية المراجع العربية: (المراجع In Arabic)

رسوم النشر في مجلة جامعة البعث

1. دفع رسم نشر (20000) ل.س عشرون ألف ليرة سورية عن كل بحث لكل باحث يريد نشره في مجلة جامعة البعث.
2. دفع رسم نشر (50000) ل.س خمسون ألف ليرة سورية عن كل بحث للباحثين من الجامعة الخاصة والافتراضية .
3. دفع رسم نشر (200) مئتا دولار أمريكي فقط للباحثين من خارج القطر العربي السوري .
4. دفع مبلغ (3000) ل.س ثلاثة آلاف ليرة سورية رسم موافقة على النشر من كافة الباحثين.

المحتوى

الصفحة	اسم الباحث	اسم البحث
50-11	بهاء الحمدان د. ماهر عباس د. محسن عبود	جدولة موفرة للطاقة ومتسامحة مع الأعطال للتطبيقات المتوازية في أنظمة الوقت الحقيقي الموزعة
80- 51	إبراهيم حمد د.م. طلال حمود د.م. ماجد حيبا	تطوير نهج صيانة تنبؤية قائم على معالجة الأمواج الصوتية بخوارزمية فورييه متعددة التناقص
102-81	م. أبي سلوم د.م. نزار الحافظ	<i>Stable Matching Algorithm</i> للجدولة المتعددة النوى المتباينة
128-103	تيسير العيسى د.م.م. يونس د. غددير ماضي	تصميم معذل نبضي خطي عالي الاستطاعة اعتماداً على ترانزستورات الحالة الصلبة
150-129	م. زينب ددع د. م. ألفت جولحة	كشف نويات الصرع من إشارات الدماغ <i>EEG</i> باستخدام <i>LPC</i> و <i>LS-SVM</i>

جدولة موفرة للطاقة ومتسامحة مع الأعطال للتطبيقات

المتوازية في أنظمة الوقت الحقيقي الموزعة

طالب الدكتوراه: بهاء الحمدان كلية الهندسة المعلوماتية - جامعة البعث

إشراف الدكتور: ماهر عباس + د. محسن عيود

المخلص

تعتبر قضية تخفيض الطاقة المستهلكة إحدى أهم قيود تصميم الأنظمة المضمنة، ومن أجل ذلك قدم الباحثون تقنية " تدرج الجهد والتردد الديناميكي (DVFS)" والتي تعتبر من أشهر تقنيات خفض الطاقة المستهلكة وأكثرها شيوعاً . حيث تعمل هذه التقنية على خفض تردد المعالج المستخدم في تنفيذ المهمة، وبالتالي تخفيض الطاقة المستهلكة. لكن عملية خفض التردد هذه أدت إلى أضعاف موثوقية النظام من خلال زيادة الأخطاء العابرة التي يتعرض لها المعالج. وهذا شكل تحدياً جديداً لأن الموثوقية قضية جوهرية وأساسية في أنظمة الزمن الحقيقي الحرجة للسلامة، وتنفيذ تطبيق بشكل غير موثوق قد يؤدي إلى عواقب وخيمة. تهدف هذه الدراسة لتنفيذ جدولة موفرة للطاقة ومتسامحة مع الأخطاء لتطبيق متوازي على أنظمة الزمن الحقيقي الموزعة غير المتجانسة، حيث يتم وصف التطبيق المتوازي بواسطة رسم بياني لا يحتوي حلقات موجه (DAG). لتحقيق ذلك تقترح هذه الدراسة خوارزمية جدولة مهام نظام زمن حقيقي موفرة للطاقة مع تحقيق متطلبات الموثوقية (EESARR). للتحقق من كفاءة وقدرة الخوارزمية المقترحة، تمت مقارنة الخوارزمية المقترحة مع خوارزمية (ESRG)، التي تسعى لنفس الهدف لكن بأسلوب مختلف. تؤكد النتائج التجريبية أن استهلاك الطاقة انخفض بواسطة خوارزمية EESARR المقترحة بشكل أكبر من خوارزمية ESRG المدروسة.

الكلمات المفتاحية: رسم بياني لا يحتوي حلقات موجه (DAG)، تدرج الجهد والتردد الديناميكي (DVFS)، كفاءة الطاقة، الجدولة المتسامحة مع الأخطاء، الأنظمة الموزعة غير المتجانسة.

Energy-efficient Fault-tolerant Scheduling of Parallel Applications on Distributed Real-time Systems

Abstract

The issue of reducing energy consumption is one of the most important limitations of the design of embedded systems, and for this researchers introduced the technique of "dynamic voltage and frequency Scaling (DVFS)", which is considered one of the most popular technologies for reducing energy consumption. As this technology works to reduce the frequency of the processor used to execute the task, and thus reduce the energy consumed. However, this downscaling reduced the reliability of the system by increasing the processor's transient errors. This poses a new challenge because reliability is a fundamental issue in real-time safety-critical systems, and implementing unreliable application can lead to dire consequences. This paper aims to implement energy-efficient fault-tolerant scheduling for a reliable parallel application on heterogeneous distributed real-time systems, where the parallel application is described by a directed acyclic graph (DAG). To achieve this, this paper proposes an energy-efficient real-time system tasks scheduling algorithm while meeting reliability requirements (EESARR). To verify the efficiency and capability of the proposed algorithm, The proposed algorithm has been compared with the ESRG algorithm, which seeks the same goal in a different manner. The experimental results confirm that the energy consumption was reduced by the proposed EESARR algorithm more than the studied ESRG algorithm.

Keywords :directed acyclic graph (DAG), dynamic voltage and frequency scaling (DVFS), energy-efficient, fault-tolerant scheduling, heterogeneous distributed systems.

1- مقدمة

مع تطور التطبيقات الحديثة وازدياد درجة تعقيدها، كان لا بد من تطور الأنظمة الحاسوبية واتخاذها مساراً مختلفاً بهدف تلبية المتطلبات الحاسوبية لهذه الأنظمة [1]. حيث ظهرت أنظمة المعالجات المتعددة والتي قدمت تطوراً هائلاً من حيث تحسين الأداء والقوة الحاسوبية للأنظمة الحاسوبية، لكن هذا التحسين أدى إلى ظهور قضايا ومشاكل جديدة، فبغض النظر عن زيادة الكلفة المادية، ظهرت قضية هامة وهي قضية استهلاك الطاقة، والتي أصبحت تعتبر أحد قيود التصميم الأساسية بالنسبة لأنظمة الحاسوب عامةً والأنظمة المضمنة خاصةً [3]. قضية الطاقة المستهلكة جذبت اهتمام الباحثين في العقد الأخير ليس بسبب الكلفة المادية المترتبة عن زيادة استهلاكها فقط، بل أيضاً بسبب تأثيرها على أداء النظام نفسه. من أجل ذلك قدم الباحثين العديد من التقنيات في سبيل تخفيض استهلاك الطاقة وخصوصاً في الأنظمة المضمنة التي تعتمد على مورد طاقة محدود، لعل أشهر هذه التقنيات هي تقنية DVFS (Dynamic Voltage and Frequency Scaling) والمستخدمة من قبل مصنعي المعالجات الدقيقة حالياً مثل Intel, ARM, and AMD. وعلى الرغم من نجاح هذه التقنية على صعيد توفير الطاقة الديناميكية المستهلكة، إلا أن هذه العملية قد تؤدي إلى إضعاف موثوقية الأنظمة بسبب الارتفاع الحاد في نسبة الفشل العابر "transient failures" للمعالجات التي قد تسببه [2,3-5].

بالنسبة لأنظمة الزمن الحقيقي من النوع الحساس لقضية السلامة تعتبر الموثوقية من القضايا الأساسية والحرجة التي لا يمكن تجاهلها، فعلى الرغم من أن التسامح مع الأعطال القائم على النسخ المتماثل آلية مهمة لتعزيز الموثوقية [1,2]، لا يمكن أن يكون أي تطبيق موثقاً به بنسبة 100% في الممارسة العملية. لذلك إذا كان التطبيق يفى بهدف الموثوقية المعتمد، فإنه يعتبر موثقاً به وفقاً لمعايير السلامة الوظيفية، مثل ISO 26262 لأنظمة السيارات [26]، DO-178B لأنظمة إلكترونيات الطيران، وIEC 61508 لجميع أنواع أنظمة البرامج الصناعية [2].

لكن استخدام التسامح مع الأعطال بهدف تلبية متطلبات موثوقية التطبيق سيسبب زيادة في كمية الطاقة المستهلكة من قبل المعالجات لتنفيذ مهام التطبيق، لذلك يجب الانتباه جيداً إلى علاقة الترابط بين الموثوقية والطاقة المستهلكة [4]. من ناحية، يمكن تأمين متطلبات و هدف الموثوقية من خلال التسامح مع الأعطال لضمان أن التحكم بالمخاطر عند مستوى مقبول لتطبيق السلامة الحرجة. من ناحية أخرى، لا يأتي التسامح مع الأعطال بكلفة مجانية ويتضمن عمومًا نفقات إضافية من موارد النظام أبرزها الطاقة [4].

بالإضافة إلى ما سبق يجب الانتباه بحذر أيضاً إلى أن استخدام تقنية النسخ المتماثل النشط من أجل ضمان الموثوقية، سيؤدي إلى زيادة عدد نسخ المهام المستخدمة وبالتالي زيادة الوقت اللازم لتنفيذ هذه النسخ، كما أن استخدام تقنية DVFS من أجل توفير الطاقة المستهلكة ستؤدي إلى خفض التردد المستخدم وبالتالي زيادة زمن التنفيذ، لكن في أنظمة الزمن الحقيقي الصارمة من النوع الحساس لقضية السلامة تجاوز القيد الزمني المفروض على التطبيق قد يؤدي إلى حدوث كوارث [2]، وبناءً على ما سبق يمكننا الاستنتاج بوضوح أن عملية تحسين أي من العوامل الثلاثة في جدولة المهام (الوقت، الموثوقية والطاقة) يؤدي إلى إضعاف العاملين الباقين، وعليه أن أي عملية تحسين لأي عامل من العوامل الثلاثة يجب أن تتم مع مراعاة العاملين الباقين، وهنا تكمن صعوبة المشكلة.

2- الغرض من البحث

الهدف الرئيسي من هذا البحث هو العمل على بناء خوارزمية جدولة مهام نظام زمن حقيقي صارم ، تعمل هذه الخوارزمية على جدولة مهام تطبيق يتألف من عدد من المهام المرتبطة ببعضها بعلاقة أسبقية، ويتم تمثيل هذا التطبيق من خلال مخطط DAG(Directed Acyclic Graph)، تعمل خوارزمية الجدولة هذه على ضمن بيئة معالجات غير متجانسة بهدف إيجاد أفضل عملية جدولة ممكنة لمهام التطبيق، مع تلبية متطلبات موثوقية هذا التطبيق، وتخفيض الطاقة الديناميكية المستهلكة من قبل مهام هذا التطبيق، مع ضمان عدم تجاوز القيد الزمني المفروض على التطبيق.

3- مفهوم الحوسبة المتسامحة مع الأعطال

الحوسبة المتسامحة مع الأعطال تعني الحوسبة بشكل صحيح على الرغم من وجود أخطاء في النظام. بالنسبة لأنظمة المعالجات المتعددة فإن تقنية تكرار المهام تعد من أهم تقنيات التسامح مع الأعطال الشائعة:

• تكرار المهام (Task Replication):

تعتبر هذه التقنية من أكثر التقنيات البرمجية للتسامح مع الأعطال. فكرة هذه التقنية هي في حال فشل المعالج بتنفيذ مهمة ما فإن ذلك يجب ألا يؤدي إلى فشل النظام ككل، وذلك من خلال توافر نسخة احتياطية أو أكثر يتم تنفيذها في حال فشل المهمة الرئيسية [10]، يوجد نوعين رئيسيين من هذه التقنية وهما:

✓ النسخ المتماثل السلبي (Passive Replication Schema):

في هذا النوع يقوم المجدول بإنشاء نسخة احتياطية من كل مهمة من مهام التطبيق، لكن لا يقوم بإسنادها إلى معالج من المعالجات المتاحة، إلا في حال حدوث فشل في تنفيذ المهمة الأساسية المسندة [10].

✓ النسخ المتماثل النشط (Active Replication Schema):

يقوم المجدول في هذا النوع بإنشاء نسخة واحدة أو أكثر من كل مهمة من مهام التطبيق، ويتم تنفيذ هذه النسخ مع المهمة الرئيسية بشكل متزامن وبنفس اللحظة الزمنية، فإذا حدث فشل في تنفيذ أي المهمة الرئيسية أو نسخها فإنه سيتم تنفيذ المهمة مرة واحدة على الأقل [4].

4- مفهوم الطاقة وأهم تقنيات تخفيض استهلاك الطاقة

يشير مفهوم الطاقة إلى الكمية القياسية التي تصف قدرة العمل الذي يمكن أن يؤديه النظام [6]. وتعتبر عملية استهلاك الطاقة قضية أساسية في تصميم الأنظمة المدمجة التي تعاني من محدودية الموارد مثل الطاقة المحدودة أو تلك التي تعتمد على البطاريات كمصدر للطاقة. ولعل أشهر تقنيات تخفيض استهلاك الطاقة على مستوى المعالجات تقنية تدرج التردد والجهد الديناميكي (Dynamic Voltage Frequency Scaling (DVFS). حيث تعمل هذه التقنية على تخفيض الطاقة الديناميكية المستهلكة من قبل المعالجات من خلال تخفيض التردد (أي الجهد المستخدم) ذلك عن طريق ضبط تردد المعالج حسب الاحتياجات الفعلية، من أجل الحفاظ على الطاقة. تساعد تقنية DVFS في الحفاظ على البطارية على الأجهزة المحمولة [6] وتقليل تكلفة التبريد نتيجة تخفيض درجة الحرارة إضافة لخفض الطاقة الديناميكية المستهلكة. لكن مع ملاحظة أن استخدام تقنية DVFS، تؤدي على زيادة زمن تنفيذ المهام بسبب عملية خفض التردد المستخدم لتنفيذ المهام كما أنها تؤدي إلى أضعاف موثوقية النظام، وكلا القضيتين تعتبران قضايا محورية وجوهرية في تصميم أنظمة الزمن الحقيقي الحرجة للسلامة، لذلك يجب توخي الحذر عند استخدام هذه التقنية.

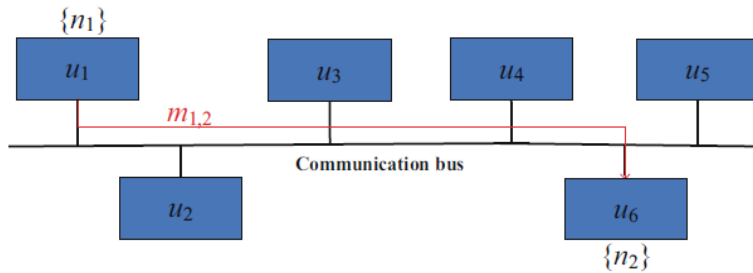
ملاحظة: بما أن العلاقة بين الجهد والتردد علاقة خطية، حيث أن زيادة التردد تؤدي إلى زيادة الجهد، والعكس صحيح، سنقوم باستخدام مصطلح التردد للإشارة إلى كلا المصطلحين التردد والجهد أي عندما نقول خفض التردد فهذا يعني خفض كل من التردد والجهد المستخدم والعكس صحيح.

5- بنية النظام System Architecture:

قمنا باختيار بنية معمارية موزعة شائعة جداً [2] لتمثيل النظام، حيث يتكون النظام من مجموعة من المعالجات يتم تركيبها على نفس الناقل، أي أن الناقل يكون مشترك بين جميع المعالجات. كما هو موضح في الشكل 1. يحتوي كل معالج على وحدة معالجة مركزية وذاكرة وصول عشوائي (RAM) وذاكرة غير متطايرة، وبطاقة واجهة الشبكة. يتم تنفيذ

المهمة بالكامل على معالج واحد، والذي يقوم بإرسال رسائل نتيجة التنفيذ إلى المهام اللاحقة جميعها، والتي قد تكون موجودة في معالجات مختلفة. على سبيل المثال، يتم تنفيذ المهمة n_1 على المعالج u_1 ، ثم يرسل رسالة $m_{1,2}$ إلى المهمة اللاحقة n_2 الموجودة في u_6 (الشكل 1).

بفرض $U = \{u_1, u_2, \dots, u_{|U|}\}$ تمثل مجموعة من المعالجات غير المتجانسة، حيث $|U|$ تمثل حجم المجموعة U . لأي مجموعة X ، نستخدم في هذا البحث التعبير $|X|$ للدلالة على حجمها [3].



الشكل (1) بنية نظام موزع متعدد المعالجات غير متجانس [2].

5-1 نموذج التطبيق المتوازي Parallel Application Model:

يتم تمثيل التطبيق المتوازي من خلال مخطط DAG كما يلي: $DAG G = (N, W, M, C)$. [1,3,4,5]

1. تمثل N مجموعة من العقد في G ، وكل عقدة $n_i \in N$ تمثل مهمة من مهام التطبيق. يمثل $pred(n_i)$ مجموعة المهام السابقة المباشرة للمهمة n_i . أما $succ(n_i)$ يمثل مجموعة المهام اللاحقة المباشرة للمهمة n_i . المهمة التي ليس لها مهمة سابقة يُشار إليها ب n_{entry} بمعنى مهمة دخل، والمهمة التي ليس لها مهمة لاحقة تدعى مهمة خرج ويُشار إليها ب n_{exit} . إذا كان التطبيق يحتوي على عدة مهام دخل n_{entry} أو عدة مهام خرج n_{exit} ، تتم إضافة مهمة دخل أو خرج وهمية

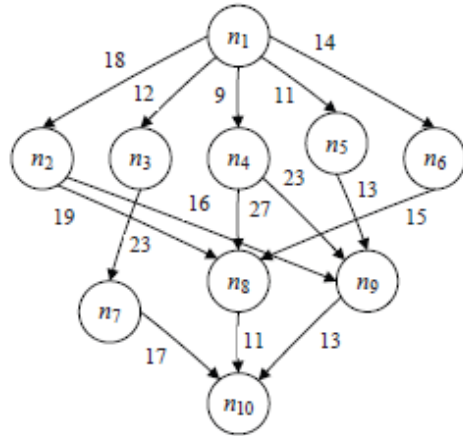
- بكلفة تنفيذ صفر وبعلاقات أسبقية قيمتها (وزنها) صفر، بحيث يبدأ التطبيق بمهمة دخل واحدة وينتهي بمهمة خرج واحدة.
2. W هي مصفوفة $|U| \times |N|$ ، حيث تشير $w_{i,k}$ إلى وقت التنفيذ بأسوأ الأحوال (Worst Case Execution Time WCET) للمهمة n_i عند عملها على المعالج u_k بأقصى تردد للمعالج. كل مهمة $n_i \in N$ لها قيمة تنفيذ WCET مختلفة على معالجات مختلفة بسبب عدم تجانس المعالجات. WCET للمهمة هي أكبر وقت تنفيذ بين جميع قيم وقت التنفيذ الحقيقي الممكنة عند تنفيذ المهمة على معالج محدد بأقصى تردد. جميع قيم WCETs للمهام معروفة ويتم تحديدها من خلال إجراء طرق التحليل (أي تحليل WCET) خلال مرحلة التحليل.
3. عملية الاتصال بين المهام المسندة إلى معالجات مختلفة يتم من خلال تمرير الرسائل عبر الناقل المشترك. M عبارة عن مجموعة من حواف الاتصال، وكل حافة $m_{i,j} \in M$ تمثل رسالة من n_i إلى n_j . أي أن المهمة n_j هي مهمة لاحقة مباشرة للمهمة n_i ، ولا يمكنها أن تبدأ التنفيذ قبل وصول خرج المهمة n_i إليها، وفي حال كان للمهمة n_j أكثر من مهمة سابقة مباشرة فيجب عليها أن تنتظر خرج جميع المهام السابقة لها حتى تستطيع بدء التنفيذ.
4. تمثل C مصفوفة كلف نقل الرسائل، أي أن $c_{i,j} \in C$ هي كلفة نقل الرسالة من المهمة n_i إلى المهمة n_j ، أي أسوأ وقت استجابة ممكن (Worst Case WCRT Response time) إذا لم يتم اسناد المهمة n_i و المهمة n_j إلى نفس المعالج. WCRT لرسالة هي أكبر وقت استجابة بين جميع قيم وقت الاستجابة الممكنة عندما يتم إرسال الرسالة على عتاد مادي معين (الناقل المشترك). إذا تم تعيين n_i و n_j على نفس المعالج، فإن قيمة وقت WCRT تكون صفر. جميع قيم WCRTs للرسائل تكون معروفة أيضاً ومحددة من خلال طريقة تحليل WCRT خلال مرحلة التحليل.

يوضح الشكل 2 تطبيقاً موازياً [5-1]. التطبيق المتوازي في المثال يتكون من 10 مهام يتم تنفيذها على 3 معالجات $\{u_1, u_2, u_3\}$. يوضح الجدول 1 مصفوفة WCET للتطبيق في الشكل 2. على سبيل المثال زمن تنفيذ المهمة n_1 على المعالج u_1 هو 14 بأسوأ الأحوال ويشار إليها ب $w_{1,1} = 14$. وبما أن المعالجات غير متجانسة بالتالي فإن زمن تنفيذ المهمة n_1 على المعالج u_2 تختلف عن زمن تنفيذ المهمة على المعالج u_1 ، ويشار إليه ب $w_{1,2} = 16$ ويختلف عن زمن تنفيذ المهمة بأسوأ الأحوال عن المعالج u_3 ، ويشار إليه ب $w_{1,3} = 9$.

تمثل قيمة الوزن البالغة 18 لحافة الاتصال بين n_1 و n_2 الزمن (الكلفة) اللازم لإرسال رسالة من المهمة n_1 إلى المهمة n_2 ، ويشار لهذا الزمن ب $c_{1,2} = 18$ ، ذلك في حال تم اسناد المهمتين n_1 و n_2 إلى معالجات مختلفين، لكن في حال تم اسناد المهمتين لنفس المعالج تكون كلفة الاتصال بينهما $c_{1,2} = 0$.

الجدول (1) قيم WCET للمهام.

Task	u_1	u_2	u_3
n_1	14	16	9
n_2	13	19	18
n_3	11	13	19
n_4	13	8	17
n_5	12	13	10
n_6	13	16	9
n_7	7	15	11
n_8	5	11	14
n_9	18	12	20
n_{10}	21	7	16



الشكل (2) مثال عن تطبيق الموازي بالاعتماد على مخطط DAG [3].

5-2 نموذج الطاقة والاستطاعة Power and Energy Model:

العلاقة بين الجهد والتردد هي علاقة خطية [9]، أي أن تقليل الجهد يؤدي إلى خفض التردد والعكس صحيح، يتم تقليل الجهد والتردد بواسطة تقنية DVFS بهدف توفير الطاقة. على غرار [2,4,10]، في هذا البحث سنستخدم مصطلح تغيير التردد للإشارة إلى التغيير المتزامن في الجهد والتردد. بالنسبة للأنظمة القادرة على تفعيل واستخدام تقنية DVFS، فإن نموذج طاقة النظام المستخدم على نطاق واسع [2,4,10] يستخدم أيضاً في هذا البحث، حيث يتم حساب الطاقة المستهلكة من قبل النظام أثناء استخدام التردد f على النحو التالي [4]:

$$P(f) = P_s + g(P_{ind} + P_d) = P_s + g(P_{ind} + C_{eff}f^m) \quad (1)$$

تمثل P_s الطاقة الساكنة وهي الطاقة التي تمر عبر الدارات الإلكترونية للنظام (في بحثنا المعالجات) حتى لو لم يكن النظام ينفذ أي عمل أو مهمة، وبالتالي يكفي أن يكون النظام بحالة تشغيل حتى يستهلك هذه الطاقة، ويمكن إزالتها فقط عن طريق إيقاف تشغيل النظام بأكمله.

تمثل P_{ind} الطاقة الديناميكية المستقلة عن التردد، ويقصد بها الطاقة التي تستهلكها الدارات الإلكترونية للنظام أثناء تنفيذ عمل أو مهمة ما بغض النظر عن قيمة التردد المستخدم في النظام.

أما P_d فهو يمثل الطاقة المستهلكة الديناميكية المعتمدة على التردد. ويقصد بها الطاقة التي تستهلكها الدارات الإلكترونية للنظام أثناء تنفيذ عمل أو مهمة ما، وتتغير هذه القيمة بتغير قيمة التردد المستخدم في النظام.

يمثل المتحول البوليني g حالة النظام ويشير إلى ما إذا كانت الطاقة الديناميكية يتم استهلاكها حالياً في النظام. عندما يكون النظام نشط، فإن $g = 1$ ، أي النظام يقوم بتنفيذ مهمة أو عمل معين. خلاف ذلك فإن $g = 0$. فيما يمثل المتحول C_{eff} السعة أو القدرة التبديلية الفعالة للمعالج أي عند انتقاله من تردد لأخر، ويمثل المتحول m أس القوة الديناميكية، الذي يجب ألا يقل عن 2. كل من المتحولين C_{eff} و m هي ثوابت تعتمد على

المعالج، وبما أن النظام المعتمد في هذا البحث غير متجانس فإن قيمة المتحولين قد تختلف من معالج لآخر. كما قد تختلف الترددات التي يدعمها كل معالج وبالتالي عند تنفيذ نفس المهمة على معالجين مختلفين، فإن قيم الطاقة الديناميكية المستقلة عن التردد P_{ind} والطاقة المستهلكة المعتمدة على التردد P_d تكون مختلفة حتى من أجل نفس المهمة.

تكلفة الحمل الزائد (الطاقة المستهلكة) الناتج عن عملية تشغيل/إيقاف تشغيل النظام ليست قليلة وتجعل من استهلاك النظام للطاقة P_s أمر لا يمكن إدارته [4]. أيضاً التقنيات المستخدمة في صناعة المعالجات الحديثة جعلت الطاقة الثابتة المستهلكة اقل ما يمكن. على غرار الدراسات السابقة، تركز دراستنا المقدمة على إدارة القوة الديناميكية (أي P_{ind} و P_d). بالنظر إلى كون P_{ind} مستقل عن التردد، فإن تخفيض P_d لا يعني بالضرورة تقليل استهلاك الطاقة. لذلك، فإن الحد الأدنى للتردد الموفر للطاقة والذي يرمز له بـ f_{ee} (energy-efficient frequency) يتم التعبير عنه على النحو التالي [4]:

$$f_{ee} = \sqrt[m]{\frac{P_{ind}}{(m-1)C_{ef}}} \quad (2)$$

أي بمعنى تخفيض التردد لقيمة أقل من قيمة f_{ee} لن يؤدي إلى تخفيض استهلاك الطاقة، لذلك تعتبر القيمة f_{ee} هي الحد الأدنى المسموح به الذي يمكن أن تعمل به المعالجات. لكن المعالجات تدعم مجموعة محددة من الترددات تتراوح قيمها من f_{min} الذي يمثل أصغر تردد يمكن أن يدعمه المعالج إلى القيمة f_{max} الذي يمثل أعلى تردد يمكن أن يدعمه المعالج، بالتالي فإن أصغر تردد يمكن أن يعمل عليه المعالج ويُشار إليه بـ f_{low} يُعطى على النحو التالي [4]:

$$f_{low} = \max(f_{min}, f_{ee}) \quad (3)$$

أي أن تخفيض التردد إلى قيمة أقل من قيمة f_{ee} لن يؤدي إلى تخفيض استهلاك الطاقة، كما أن التردد الأصغر الذي يمكن أن يدعمه المعالج هو f_{min} ، ولا يمكن تخفيض التردد إلى قيمة أصغر من هذه القيمة لذلك يصبح الحد الأدنى للتردد الذي يمكن أن يعمل عليه المعالج

هو أكبر قيمة بين القيمتين f_{ee} و f_{min} . لذلك فإن أي تردد فعال f_h يمكن أن يعمل عليه المعالج يجب أن يكون ضمن المجال التالي $f_{low} \leq f_h \leq f_{max}$.

ليكن $E_d(n_i, u_k, f_{k,v})$ يمثل الطاقة الديناميكية المستهلكة نتيجة تنفيذ المهمة n_i على المعالج u_k باستخدام التردد $f_{k,v}$. بالتالي يمكن حساب هذا التعبير كما يلي [5]:

1. مجموعة الترددات المستقلة عن التردد للمعالجات: $\{P_{1,ind}, P_{2,ind}, \dots, P_{|U|,ind}\}$
2. مجموعة الترددات المعتمدة على التردد للمعالجات: $\{P_{1,d}, P_{2,d}, \dots, P_{|U|,d}\}$
3. مجموعة أسس الطاقة الديناميكية للمعالجات: $\{m_1, m_2, \dots, m_{|U|}\}$
4. مجموعة قدرات التبديل الفعالة للمعالجات: $\{C_{1,ef}, C_{2,ef}, \dots, C_{|U|,ef}\}$
5. مجموعة أخفض تردد يمكن أن يعمل عليه المعالج: $\{f_{1,low}, f_{2,low}, \dots, f_{|U|,low}\}$
6. مجموعة الترددات الفعالة للمعالجات :

$$\left\{ \begin{array}{l} \{f_{1,low}, f_{1,a}, f_{1,b}, \dots, f_{1,max}\} \\ \{f_{2,low}, f_{2,a}, f_{2,b}, \dots, f_{2,max}\} \\ \vdots \\ \{f_{|U|,low}, f_{|U|,a}, f_{|U|,b}, \dots, f_{|U|,max}\} \end{array} \right\}$$

بالتالي فإن $E_d(n_i, u_k, f_{k,v})$ تحسب على النحو التالي [5]:

$$E_d(n_i, u_k, f_{k,v}) = (P_{k,ind} + C_{k,ef} \times (f_{k,v})^{m_k}) \times w_{i,k} \times \frac{f_{k,max}}{f_{k,v}} \quad (4)$$

في هذه الدراسة، الكلفة الناتجة عن تغير التردد تعتبر مقدار ضئيل جداً مقارنة بالطاقة الديناميكية المستهلكة ولذلك تهمل [11].

5-3 نموذج الموثوقية والتسامح مع الأعطال :

بالنسبة للأنظمة التي لا تعمل بتقنية DVFS، اقترح Shatz و Wang أولاً أن احتمالية موثوقية المعالج تخضع لتوزيع Poisson [12]. هذه الفكرة مستخدمة على نطاق واسع في

الدراسات السابقة [1,5,10,12]. حيث يُشار إلى موثوقية حدث ما خلال وحدة الزمن t كما يلي [12]:

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (5.1)$$

بفرض λ_k يمثل ثابت معدل فشل المعالج u_k خلال وحدة الزمن. بالتالي يتم حساب موثوقية المهمة n_i المنفذة على المعالج u_k باستخدام التعبير التالي [12]:

$$R(n_i, u_k) = e^{-\lambda_k w_{i,k}} \quad (5.2)$$

في الأنظمة القادرة على تفعيل واستخدام تقنية DVFS، تنتج الترددات المختلفة معدلات فشل مختلفة وفقاً لملخصات الأبحاث ذات الصلة [4,5,10]. بفرض $\lambda_{k,max}$ تمثل معدل فشل المعالج u_k عندما يعمل بأقصى تردد، و $\lambda_{k,v}$ يمثل معدل فشل المعالج u_k باستخدام التردد $f_{k,v}$ ويتم حسابه على النحو التالي [5]:

$$\lambda_{k,v} = \lambda_{k,max} \times 10^{\frac{d(f_{k,max}-f_{k,v})}{f_{k,max}-f_{k,min}}} \quad (6)$$

حيث d قيمة ثابتة، تمثل حساسية معدلات الفشل لتغير الجهد.

ثم يتم بناء العلاقة بين موثوقية المهمة والتردد الذي سيعمل عليه المعالج الذي سينفذ المهمة حسب المعادلات: (5) و (6)، أي أن موثوقية المهمة n_i المنفذة على المعالج u_k باستخدام التردد $f_{k,v}$ تحسب على النحو التالي :

$$R(n_i, u_k, f_{k,v}) = e^{-\lambda_{k,max} \times 10^{\frac{d(f_{k,max}-f_{k,v})}{f_{k,max}-f_{k,min}}} \times \frac{w_{i,k} \times f_{k,max}}{f_{k,v}}} \quad (7)$$

في المعادلة (7) العلاقة بين الموثوقية والتردد تتزايد باستمرار على نفس المعالج. لذلك، تقليل الجهد والتردد بهدف تقليل استهلاك الطاقة الديناميكية ينتج عنه تخفيض موثوقية التطبيق.

أن التقنية المستخدمة في هذا البحث هي تقنية النسخ المتماثل النشط المتغير من أجل التسامح مع الأعطال، وكما ذكرنا سابقاً فإن هذه التقنية تتميز بعدد متغير من النسخ المكررة من أجل كل مهمة، أي أن عدد النسخ من أجل المهمة n_1 يختلف عن عدد النسخ

المستخدمة من أجل المهمة n_2 ، لذلك نعرف المتحول $(num_i \leq |U|)$ والذي يشير إلى عدد النسخ الخاصة بالمهمة n_i في تقنية النسخ المتماثل النشط. وطالما أنه لا يمكن أسناد نسختين إلى نفس المعالج يكون لدينا مجموعة النسخ الخاصة بالمهمة n_i هي $\{n_i^1, \dots, n_i^\beta, \dots, n_i^{num_i}\}$ حيث n_i^1 هي النسخة الأساسية، وباقي عناصر المجموعة تمثل النسخ الاحتياطية. وبما أن موثوقية المهمة n_i على المعالج u_k تعطى في المعادلة (5). فإن احتمالية فشل المهمة n_i على المعالج u_k تحسب كما يلي [12]:

$$1 - R(n_i, u_k) = 1 - e^{-\lambda_k w_{i,k}} \quad (8)$$

بالتالي مع استخدام أكثر من نسخة من المهمة n_i تصبح موثوقية المهمة n_i كما يلي [12]:

$$R(n_i) = 1 - \prod_{\beta=1}^{num_i} (1 - R(n_i^\beta, u_{pr(n_i^\beta)}, f_{pr(n_i^\beta), hz(n_i^\beta)})) \quad (9)$$

حيث يشير المتحول $u_{pr(n_i^\beta)}$ إلى المعالج الذي أسندت إليه النسخة β من المهمة n_i أي n_i^β ، أما المتحول $f_{pr(n_i^\beta), hz(n_i^\beta)}$ فيشير إلى التردد المستخدم من قبل المعالج لتنفيذ النسخة β من المهمة n_i .

بالنظر إلى أن موثوقية التطبيق هي نتاج قيم الموثوقية لجميع مهامه [12,2]، بالتالي فإن قيمة موثوقية التطبيق تحسب كما يلي [12]:

$$R(G) = \prod_{n_i \in N} R(n_i) \quad (10)$$

الطاقة الديناميكية المستهلكة من قبل المهمة n_i هي مجموع الطاقة الديناميكية المستهلكة من قبل كل نسخة من نسخ المهمة n_i [12]:

$$E_d(n_i) = \sum_{x=1}^{num_i} E_d(n_i^\beta, u_{pr(n_i^\beta)}, f_{pr(n_i^\beta), hz(n_i^\beta)}) \quad (11)$$

وبالتالي فإن الطاقة الديناميكية المستهلكة من قبل التطبيق هي مجموع الطاقة الديناميكية المستهلكة من قبل جميع مهام التطبيق وتحسب كما يلي [12]:

$$E_d(G) = \sum_{i=1}^{|N|} E_d(n_i) \quad (12)$$

4-5 توصيف المشكلة:

يمكن وصف المشكلة التي سنقوم بتناولها في هذه الدراسة كآلاتي. بفرض أنه لدينا تطبيق متوازي G ، يتألف هذا التطبيق من مجموعة من المهام المترابطة مع بعضها البعض N ، ولدينا مجموعة من المعالجات غير المتجانسة U ، هذه المعالجات تدعم مستويات تردد مختلفة (تدعم تقنية DVFS). تتضمن المشكلة اسناد نسخ المهمة المتماثلة للمعالج المناسب بالتردد المناسب بحيث يتم تقليل إجمالي الطاقة المستهلكة قدر الإمكان، والتأكد من أن الموثوقية التي تم الحصول عليها للتطبيق $R(G)$ أكبر من أو تساوي هدف الموثوقية $R_{goal}(G)$ [2,1,4]. الهدف هو تحديد المعالج والتردد المناسب لجميع نسخ المهام لتقليل الطاقة المستهلكة [4,5]:

$$E_{total}(G) = E_d(G) + E_s(G) \quad (13.1)$$

والتأكد من أن هدف الموثوقية محقق [4,5]:

$$R(G) = \prod_{n_i \in N} R(n_i) \geq R_{goal}(G) \quad (13.2)$$

5-5 تحديد أولويات المهام (Prioritizing Tasks):

في قسم توصيف المشكلة، تكون الخطوة الأولى هي تحديد أولويات المهام. مشكلة تحديد أولويات المهام مشكلة مهمة لجدولة التطبيق المتوازي المعتمد على مخطط DAG في أنظمة المعالجات المتعددة غير المتجانسة. لا يوجد ما يثبت أن طريقة من طرق تحديد أولويات مهام أفضل من باقي الطرق [1,2,4,5]. ترتيب المهام حسب طريقة قيمة الترتيب التصاعدي

(Ranku) (المعادلة (14)) تعتبر من أكثر الطرق شيوعاً في تحديد أولويات المهام المترابطة في التطبيقات المتوازية المعتمدة على مخطط DAG في أنظمة المعالجات المتعددة غير المتجانسة، وقد تم استخدامها في كثير من الدراسات منها [4]. لذلك سنستخدم طريقة قيمة الترتيب التصاعدي في هذه الدراسة أيضاً. وبالتالي، سيتم ترتيب المهام بترتيب تنازلي لقيمة Ranku، والتي يتم الحصول عليها باستخدام المعادلة التالية:

$$\text{rank}_u(n_i) = \bar{w}_i + \max_{n_j \in \text{succ}(n_i)} \{c_{i,j} + \text{rank}_u(n_j)\} \quad (14)$$

حيث \bar{w}_i هو متوسط زمن التنفيذ الأسوأ WCET للمهمة n_i باستخدام الترددات القصوى للمعالجات وتحسب كالتالي:

$$\bar{w}_i = \left(\sum_{k=1}^{|U|} w_{i,k} \right) / |U| \quad (15)$$

يوضح الجدول (2) قيم الترتيب التصاعدي لجميع المهام في الشكل (2). إذا تم إسناد جميع المهام السابقة المباشرة للمهمة n_i ، عندئذ يمكن إسناد المهمة n_i للمعالج. بفرض لدينا مهمتين n_i و n_j وكان $\text{rank}_u(n_i) > \text{rank}_u(n_j)$. إذا لم يكن هناك قيد أسبقية موجود بين n_i و n_j فإنه من غير الضروري أن تأخذ المهمة n_i الأسبقية في الإسناد والتخصيص. لذلك، فإن ترتيب الإسناد و التخصيص لمهام التطبيق G هو $\{n_1, n_3, n_4, n_2, n_5, n_6, n_9, n_7, n_8, n_{10}\}$.

الجدول (2) قيمة Ranku لمهام التطبيق G في الشكل (2) [4].

Task	n_1	n_2	n_3	n_4	n_5	n_6	n_7	n_8	n_9	n_{10}
$\text{rank}_u(n_i)$	108	77	80	80	69	63.3	42.7	35.7	44.3	14.7

6- الدراسة المرجعية :

عدد قليل من الأبحاث أهتم بمناقشة مشكلة جدولة مهام الزمن الحقيقي في المعالجات المتعددة غير المتجانسة بهدف توفير الطاقة مع مراعاة قيد الموثوقية. منها الخوارزمية التي

قدمها الباحث Xie في [4] وذلك بهدف جدولة مجموعة من المهام مرتبطة مع بعضها بعلاقة الأسبقية، لكن الخوارزمية المقدمة أهملت القيود الزمنية المفروضة على التطبيق المتوازي. الباحث Pop في الورقة البحثية [18] عنون مشكلة الجدولة في انظمة الزمن الحقيقي مع توفير الطاقة وقيود الموثوقية من خلال تكييف خوارزمية RAPM المقترحة في [20] لتتناسب مع منصات المعالجات المتعددة غير المتجانسة، باستخدام مجموعة من المهام المستقلة. أيضاً Guo في [19] قام بالتعديل على خوارزمية RAPM، بهدف جدولة التطبيقات المتوازية المؤلفة من مجموعة من المهام المرتبطة ببعضها بعلاقة الموثوقية، من أجل توفير الطاقة المستهلكة وتحقيق قيد الموثوقية المطلوبة من التطبيق، كما أن الخوارزمية المقدمة تستطيع جدولة المهام بطريقة استباقية Offline أو آنية Online. تحقيق الموثوقية في الخوارزمية المقترحة يتم من خلال أسلوب يعتمد على الاسترداد واستغلال مساحات الخمول لدى المعالجات، هذا الأسلوب يعاني من مشكلة في حال حدوث خطأ النقل في وقت متأخر من زمن تنفيذ البرنامج وعدم وجود فراغ لدى المعالجات ليتم اسناده للمهمة المستردة، هذا حتماً سيؤدي إلى فشل في تنفيذ التطبيق. بالاعتماد على [22] قدم الباحث Zhang في [23] خوارزمية لجدولة المهام الصارمة المرتبطة مع بعضها بعلاقة الأسبقية في أنظمة المعالجات المتعددة غير الصارمة بهدف توفير الطاقة مع مراعاة قيد الموثوقية، الموثوقية المطلوبة من التطبيق يتم تحقيقها من خلال استخدام تقنية الاسترداد وتحديداً كتلة الاسترداد والتي يجب أن تكون موجودة على كل معالج، وحجمها هو زمن تنفيذ المهمة الأكبر من بين المهام المسندة لهذا المعالج وبالتالي تختلف من معالج لأخر، الخوارزمية المقترحة تعتبر مثالية في حال كان هناك متسع كبير من الوقت ما بين الموعد النهائي وما بين زمن تنفيذ آخر مهمة على المعالج، ناهيك عن أن لا يوجد أي اثبات علمي أنه في حال حدوث خطأ نقل على معالج ما أثناء تنفيذ مهمة ما فإنه لن يحدث خطأ نقل أيضاً أثناء استرداد هذه المهمة (أعادة تنفيذها) سواءً على نفس المعالج أو على معالج آخر. أيضاً باستخدام فراغات الخمول بعد اسناد المهام المرتبطة ببعضها إلى المعالجات المتعددة غير المتجانسة قدم الباحثون في [24]

خوارزمية تحاول توفير الطاقة الديناميكية المستهلكة مع تحقيق القيد الزمني، لكن بشكل مميز عن جميع الخوارزميات السابقة تحاول الخوارزمية المقدمة تخفيض درجة حرارة المعالجات من خلال طريقة اسناد المهام وليس من خلال التقنيات المادية (العتاد الصلب). أما الورقة البحثية [25] تعتبر أول مقالة تقدم خوارزمية لجدولة مهام الزمن الحقيقي وتحاول تخفيض الطاقة المستهلكة الديناميكية والطاقة الساكنة سوياً مع مراعاة قيد الموثوقية، لكنها تتعامل مع مهام مستقلة وأنظمة أحادية المعالج.

بشكل عام الأبحاث المقدمة في مجال جدولة مهام نظام الزمن الحقيقي الصارم بالاعتماد على الموثوقية مع مراعاة القيد الزمني المفروض على التطبيق المتوازي من النوع DAG، في بيئة المعالجات المتعددة غير المتجانسة تنقسم إلى نوعين أساسيين:

- في النوع الأول لا يتم ذكر القيد الزمني بشكل واضح وصريح، إنما يتم ذكره بشكل ضمني. وعلى الرغم من ذكر الموعد النهائي للتطبيق بشكل ضمني فإن الباحثون في هذا الدراسات يفترضون أن التطبيق يملك وقت كاف ليتم تنفيذه حتى مع استخدام التسامح مع الأعطال بهدف تحقيق الموثوقية المطلوبة من التطبيق، من أشهر الأمثلة عن هذه الدراسات الأوراق البحثية المقدمة في [4,5,13,14]. هذا النوع هو محور هذا البحث.
- النوع الثاني من الدراسات يقوم الباحثون بذكر القيد الزمني بشكل واضح وصريح، ويتم مراعاته في كل خطوة من خطوات تنفيذ الخوارزمية، في هذه الحالة يفترض الباحثون أن التطبيق قد لا يملك الوقت الكاف ليتم تنفيذه مع تحقيق هدف الموثوقية، وبناءً على ذلك فإن تحقيق الموثوقية المطلوبة من التطبيق أو تخفيض استهلاك الطاقة تتم بشرط تحقيق القيد الزمني، من أشهر الأمثلة عن هذه الدراسات الأوراق البحثية المطروحة في [2]. هذا النوع سيتم تناوله بشكل مفصل في بحث مستقل.

6-1 خوارزمية ESRG (Energy-Efficient Scheduling With Reliability Goal):

قدمت هذه الخوارزمية من قبل مجموعة من الباحثين في الورقة البحثية [4]. وتهدف هذه الدراسة إلى مناقشة موضوع العلاقة ما بين الموثوقية واستهلاك الطاقة في جدولة مهام نظم الزمن الحقيقي لدرجة لقضية السلامة مع وجود علاقة أسبقية بين المهام في بيئة المعالجات المتعددة غير المتجانسة. حيث تهدف خوارزمية ESRG إلى تخفيض الطاقة الديناميكية المستهلكة قدر الإمكان لكن مع تحقيق متطلبات الموثوقية في التطبيقات المتوازية لدرجة للسلامة والممثلة من خلال مخطط DAG. عملية تخفيض الطاقة الديناميكية المستهلكة لتنفيذ مجموعة مهام التطبيق المتوازي تتم من خلال استخدام تقنية DVFS المعروفة. أما تحقيق الموثوقية فيتم من خلال التسامح مع الأعطال واستخدام تقنية النسخ المتماثل النشط مع عدد متغير من النسخ.

6-1-1 مبدأ وطريقة عمل خوارزمية ESRG:

الهدف الأساسي من هذه الخوارزمية هو تخفيض كمية الطاقة المستهلكة قدر المستطاع مع الحفاظ على تحقيق متطلبات الموثوقية. يتم ذلك من خلال مرحلتين:

1- المرحلة الأولى هي تحديد أوليات المهام (prioritizing tasks): من اجل ذلك يتم استخدام تقنية تدعى قيمة الترتيب التصاعدي upward rank value والتي قمنا بشرحها مسبقاً.

2- المرحلة الثانية هي اسناد المهام إلى المعالجات غير المتجانسة (allocating tasks): هذه المرحلة يمكن تقسيمها إلى مسألتين فرعيتين:

- المسألة الأولى: تحديد المعالج المناسب لتنفيذ المهمة بحيث يتم تحقيق متطلبات أو هدف الموثوقية.
- المسألة الثانية: تحديد المعالج المناسب لتنفيذ المهمة والذي يحقق متطلبات الموثوقية ويخفض من الطاقة الديناميكية المستهلكة.

6-1-2 تحقيق هدف الموثوقية في خوارزمية ESRG :

بما أن قيمة موثوقية تطبيق ما هي نتاج قيمة موثوقية كل مهام هذا التطبيق، لذلك في البداية يتم حساب الحد الأعلى لموثوقية كل مهمة $R_{up_goal}(n_i)$ من خلال إيجاد الجذر النوني لقيمة الموثوقية المطلوبة من التطبيق، كما يلي [3]:

$$R_{up_goal}(n_i) = \sqrt[|N|]{R_{goal}(G)} \quad (16.1)$$

بالتالي، إذا كانت قيم الموثوقية لجميع المهام تتجاوز قيم الحد الأعلى لكل مهمة من مهام التطبيق، يجب أن تتجاوز قيمة موثوقية التطبيق الناتجة قيمة هدف الموثوقية.

بفرض أن المهمة المراد اسنادها لأحدى المعالجات غير المتجانسة هي $n_{s(y)}$ ، حيث $n_{s(y)}$ تمثل المهمة التي ترتيبها j ، لدينا $\{n_{s(1)}, n_{s(2)}, \dots, n_{s(y-1)}\}$ مجموعة المهام المسندة للمعالجات، كما لدينا المجموعة $\{n_{s(y+1)}, n_{s(y+2)}, \dots, n_{s(|N|)}\}$ تمثل مجموعة المهام غير المسندة للمعالجات. من ثم يتم استخدام المعادلة التالية لحساب الموثوقية الجزئية المطلوبة من كل مهمة من مهام التطبيق [4]:

$$R_{goal}(n_{s(y)}) = \frac{R_{goal}(G)}{\prod_{x=1}^{y-1} R(n_{s(x)}) \times \prod_{z=y+1}^{|N|} R_{up_goal}(n_{s(z)})} \quad (16.2)$$

بذلك، يتم نقل هدف الموثوقية للتطبيق لكل مهمة. طالما أن كل مهمة تحقق متطلبات أو هدف الموثوقية المطلوبة منها، فإنه أيضاً يتم تحقيق هدف موثوقية التطبيق ككل [4].

6-1-3 تخفيض استهلاك الطاقة الديناميكية في خوارزمية ESRG:

تستخدم خوارزمية ESRG تقنية DVFS من أجل تخفيض الطاقة الديناميكية المستهلكة لتنفيذ مهام التطبيق، وبما أن الموثوقية الكلية للتطبيق يتم تحويلها لموثوقية جزئية خاصة بكل مهمة، أيضاً عملية تخفيض الطاقة الديناميكية المستهلكة يتم تحويلها لتصبح خاصة بكل مهمة، وفق الاستراتيجية التالية:

لتنفيذ أي مهمة من مهام التطبيق، يتم أولاً حساب الموثوقية المطلوبة من هذه المهمة، ثم يتم المرور على جميع المعالجات والترددات، ويتم حساب قيمة الموثوقية عند كل معالج وكل تردد يدعمه هذا المعالج، فإذا كانت قيمة الموثوقية عند المرور على الثنائية (معالج، تردد) تحقق قيمة الموثوقية المطلوبة يتم اختيار هذه الثنائية، أما إذا لم تكن تحقق هدف الموثوقية يتم الانتقال إلى الثنائية التالية. في حال عدم وجود نسخة واحدة تحقق الموثوقية المطلوبة من المهمة يتم اختيار الثنائية التي تحقق أكبر نسبة موثوقية ممكنة، ثم يعاد الاختيار مرة أخرى وهكذا حتى يتم الوصول إلى الموثوقية المطلوبة [4].

7- خوارزمية (EESARR) المقترحة (Energy-Efficient Scheduling Algorithm) : (with Reliability Requirements)

الهدف من هذه الخوارزمية هو توفير الطاقة الديناميكية المستهلكة من قبل المهام، أثناء عملية جدولة مهام تطبيقات نظم الزمن الحقيقي الصارمة الحرجة للسلامة المرتبطة مع بعضها البعض بعلاقة الأسبقية والممثلة من خلال مخطط DAG، في بيئة المعالجات المتعددة غير المتجانسة. مع الحفاظ على هدف الموثوقية، أي الوصول إلى هدف الموثوقية المطلوب من التطبيق.

تستخدم خوارزمية EESARR المقترحة تقنية النسخ المتماثل النشط من أجل تحقيق التسامح مع الأعطال بهدف الوصول إلى متطلبات الموثوقية المطلوبة من التطبيق، حيث يتم التعامل مع قضية الموثوقية على أنها شرط من الواجب تحقيقه شأنه شأن شرط القيد الزمني (الموعد النهائي) المفروض في تطبيقات نظم الزمن الحقيقي الصارمة. أيضاً من أجل تحقيق أقصى قدر ممكن من توفير الطاقة الديناميكية المستهلكة من قبل مهام التطبيق المتوازي، فإن خوارزمية EESARR المقترحة تستخدم تقنية DVFS المشهورة، حيث تأمن هذه التقنية ترددات مختلفة وبالتالي اختلاف في كمية الطاقة الديناميكية المستهلكة من أجل نفس المهمة على نفس المعالج عند استخدام ترددات تنفيذ مختلفة، كما ذكرنا سابقاً.

تكمن الفكرة الأساسية لخوارزمية EESARR المقترحة في نقل الموثوقية الكلية المطلوبة من التطبيق إلى موثوقية جزئية خاصة بكل مهمة، فإذا استطاعت كل مهمة من مهام التطبيق المتوازي تحقيق الموثوقية الجزئية المطلوبة منها، فإن التطبيق ككل يستطيع تحقيق الموثوقية الكلية المطلوبة منه. من أجل تحقيق ذلك تقترح خوارزمية EESARR طريقة تجريبه، تقوم على الاختيار الأمثل للنسخ المتماثلة والمعالجات التي تنفذها وأيضاً الترددات المستخدمة في تنفيذها. من خلال هذه الطريقة التجريبية تستطيع خوارزمية EESARR المقترحة الوصول إلى حد الموثوقية المطلوبة مع توفير للطاقة الديناميكية المستهلكة، أي طالما أن التطبيق يحقق هدف الموثوقية المطلوبة منه فإن التطبيق ككل يعتبر موثوق كما ذكرنا سابقاً، بالتالي يجب الاستفادة من تخفيض نسبة الموثوقية التي يحققها التطبيق طالما أنه يحقق هدف الموثوقية من أجل تأمين أكبر قدر ممكن من التوفير في الطاقة الديناميكية المستهلكة.

7-1 آلية عمل خوارزمية EESARR:

تنقسم خوارزمية EESARR لمرحلتين أساسيتين وهما:

1- مرحلة نقل الموثوقية الكلية للتطبيق إلى موثوقية جزئية:

تقوم EESARR بنقل الموثوقية الكلية للتطبيق إلى موثوقية جزئية خاصة بكل مهمة، فإذا استطاعت كل مهمة تحقيق الجزء الخاص بها من الموثوقية، فإن الخوارزمية تستطيع تحقيق متطلبات موثوقية التطبيق ككل. ويتم حساب الموثوقية الجزئية الخاصة بكل مهمة من مهام التطبيق بشكل مشابه للطريقة المستخدمة في خوارزمية ESRG. أي من خلال المعادلة التالية (Eq. (16.2)).

أي أن خوارزمية EESARR يحاول تخفيض الموثوقية الجزئية المطلوبة من كل مهمة، وبالتالي تخفيض عدد النسخ المتماثلة أو تخفيض ترددات النسخ المتماثلة المطلوبة لتحقيق الموثوقية الجزئية الخاصة بكل مهمة، وبالمحصلة تخفيض كمية الطاقة الديناميكية المستهلكة لتنفيذ مهام التطبيق مع تحقيق هدف موثوقية التطبيق.

2- مرحلة اختيار النسخ المتماثلة للمهام:

الهدف الأساسي من هذه المرحلة هو تحديد المهام التي سيتم تكرارها وعدد النسخ المتماثلة المطلوب تنفيذها لكل مهمة، وترددات هذه النسخ، والمعالجات التي ستقوم بتنفيذ هذه النسخ، ويتم ذلك وفقاً للخطوات التالية:

1- من أجل كل مهمة متاحة من مهام التطبيق n_i يتم المرور على كل معالج متاح $u_{pr}(n_i^x)$ وعلى كل تردد ممكن $f_{pr}(n_i^x), hz(n_i^x)$ ويتم حساب قيم موثوقية النسخ المنفذة $R(n_i^x)$ من المهمة n_i . يتم تخزين هذه القيم ضمن مصفوفة خاصة بكل مهمة تدعى مصفوفة "موثوقية النسخ المتماثلة" للمهمة المحددة، أبعاد هذه المصفوفة هي عدد المعالجات وعدد الترددات التي يدعمها كل معالج.

2- يتم المرور على جميع عناصر مصفوفة موثوقية النسخ المتماثلة الخاصة بالمهمة المحددة، ويتم اختيار النسخة المتماثلة الوحيدة n_i^x التي تملك أصغر كمية طاقة ديناميكية مستهلكة (بغض النظر عن التردد الذي تستخدمه طالما أن المعالج متاح) وقيمة موثوقيتها أكبر من أو تساوي قيمة الموثوقية الجزئية المطلوبة من المهمة المحددة $R(n_i^x) \geq R_{goal}(n_i)$ (في حال تواجدها) و يتم الانتقال للخطوة (3).

3- في حال وجود أو عدم وجود نسخة واحدة قادرة على تحقيق شرط الموثوقية الجزئية المطلوبة من المهمة يتم اختيار نسختين متماثلتين على معالجين متاحين، بحيث تكون قيمة الموثوقية التي تحققها هاتين النسختين أكبر من أو تساوي قيمة الموثوقية المطلوبة من المهمة، وتلكان أصغر كمية طاقة ديناميكية مستهلكة. وفي حال وجود نسخة وحيدة تحقق شرط موثوقية المهمة، يجب أن يكون مجموع كميتي الطاقة الديناميكية المستهلكة من قبلها أصغر من كمية الطاقة الديناميكية المستهلكة من قبل النسخة الوحيدة. أي بمعنى أوضح يتم المرور على جميع المعالجات المتاحة وجميع الترددات الممكنة واختيار النسختين اللتين تملكان أصغر كمية طاقة ديناميكية مستهلكة ومجموع كميتي الطاقة الديناميكية المستهلكة أقل من كمية الطاقة الديناميكية

المستهلكة من قبل النسخة الوحيدة المختارة من الخطوة (2)، وقيمة الموثوقية الناتجة عنهما أكبر من أو تساوي قيمة الموثوقية الجزئية المطلوبة من المهمة. في حال عدم وجود مثل هاتين النسختين يتم الانتقال للخطوة (4).

4- في حال عدم إيجاد نسخة وحيدة كما هو مطروح في الخطوة (2)، أو عدم وجود نسخين كما هو مطروح في الخطوة (3)، يتم اختيار النسخة التي تحقق أكبر قيمة موثوقية ممكنة، وتكرر الخطوة (3) وهكذا حتى يتحقق شرط الموثوقية الجزئية الخاص بالمهمة المحددة.

5- عندما تنتهي جميع المهام من تحديد عدد النسخ المتماثلة لكل مهمة وتردداتها والمعالجات التي سيتم اسناد النسخ لها، تقوم الخوارزمية بحساب العدد الكلي للنسخ المطلوبة $NR(G)$ ، موثوقية التطبيق ككل $R(G)$ ، الطاقة الديناميكية المستهلكة من قبل جميع مهام التطبيق $E_d(G)$.

2-7 ترميز خوارزمية EESARR المقترحة:

سنعرض فيما يلي ترميز خوارزمية EESARR المقترحة:

The EESARR Algorithm

Input: $G = (N, W, M, C), U, R_{goal}(G)$

Output: $R(G), E_{total}(G)$ and its related values

- 1: Sort the tasks in a list *PriorityList* by descending order of $rank_u$ values.
 - 2: while (there are tasks in *PriorityList*) do
 - 3: $n_i \leftarrow PriorityList.out()$
 - 4: Calculate $R_{goal}(n_i)$ using Eq. (16.2)
 - 5: while ($R(n_i) < R_{goal}(n_i)$) do
 - 6: for (each processor $u_k \in U$ and u_k is available) do
 - 7: for (each frequency $f_{k,v}$ in from $f_{k,low}$ and $f_{k,max}$) do
 - 8: Calculate $R(n_i^x, u_{pr}(n_i^x), f_{pr}(n_i^x), hz(n_i^x))$ for the task n_i and save it in n_i replica matrix.
- # chose the one replica with minimum dynamic energy and reach reliability Goal.

```

9:   if  $\left( R \left( n_i^x, u_{pr}(n_i^x), f_{pr}(n_i^x), hz(n_i^x) \right) \geq R_{goal} \left( n_i \right) \right)$  then
10:       $R(n_i) \leftarrow R \left( n_i^x, u_{pr}(n_i^x), f_{pr}(n_i^x), hz(n_i^x) \right)$ 
11:       $E_d(n_i) \leftarrow E_d \left( n_i^x, u_{pr}(n_i^x), f_{pr}(n_i^x), hz(n_i^x) \right)$  using Eq. (11).
12:      if  $( E_d(n_i) < min\_replica\_dynamic\_energy )$  then
13:          $min\_replica\_dynamic\_energy = E_d(n_i)$ 
14:      end if
15:   end if
# chose the tow replica with minimum dynamic energy and reach reliability
Goal if the tow replica have minimum dynamic energy less than the one
Replica.
16:   if  $\left( R \left( n_i^{x1+x2}, u_{pr}(n_i^{x1+x2}), f_{pr}(n_i^{x1+x2}), hz(n_i^{x1+x2}) \right) \geq R_{goal} \left( n_i \right) \right)$  then
17:      if  $( E_d(n_i^{x1}) + E_d(n_i^{x2}) < min\_replica\_dynamic\_energy )$  then
18:          $min\_replica\_dynamic\_energy = E_d(n_i^{x1}) + E_d(n_i^{x2})$ 
19:          $R(n_i) = R \left( n_i^{x1+x2}, u_{pr}(n_i^{x1+x2}), f_{pr}(n_i^{x1+x2}), hz(n_i^{x1+x2}) \right)$ 
20:          $E_d(n_i) \leftarrow E_d(n_i^{x1}) + E_d(n_i^{x2})$ 
21:      end if
22:   else
23:      chose the one replica with maximum reliability value and set
       $u_k$  is not available
24:   end if
25: end for
26: end for
27: end while
28: end while
29: Calculate  $R(G)$  using Eq. (10)
30: Calculate  $E_d(G)$  using Eq. (12)
31: Calculate  $NR(G)$ 

```

وفيما يلي شرح لأهم تفاصيل ترميز خوارزمية EESARR المقترحة:

- 1- في السطر الأول، تقوم خوارزمية EESARR بترتيب مهام التطبيق بترتيب تنازلي لقيم ال $rank_u$ ، وتخزينها في قائمة أو شعاع يدعى " PriorityList ".
- 2- في السطور 2-28، تختار خوارزمية EESARR النسخة المتماثلة بشكل متكرر والمعالج المتاح بهدف تحقيق متطلبات موثوقية التطبيق. على وجه التحديد، يتم إجراء التفاصيل التالية:

- (1) الأسطر 2-4: يتم التحقق من وجود مهام ضمن قائمة PriorityList التي تحوي مهام التطبيق والمرتبة حسب الأولوية، في حال وجود أي مهمة متبقية ولتكن n_i ، يتم حساب قيمة الموثوقية الجزئية المطلوبة من المهمة $R_{goal}(n_i)$ من خلال المعادلة (16.2) Eq.
- (2) السطر 5: تتم مقارنة قيمة موثوقية التطبيق الفعلية مع قيمة شرط موثوقية التطبيق.
- (3) الأسطر 6-8: من أجل كل مهمة n_i يتم المرور على جميع المعالجات المتاحة، ومن أجل كل معالج يتم المرور على جميع الترددات التي يدعمها، ويتم حساب موثوقية المهمة على كل معالج وكل تردد ممكن ويتم تخزين قيمة الموثوقية ضمن مصفوفة خاصة بكل مهمة تدعى replica matrix
- (4) الأسطر 9-15: يتم اختيار النسخة التي تملك أقل طاقة ديناميكية مستهلكة، وتحقق شرط الموثوقية الخاصة بالتطبيق.
- (5) الأسطر 16-21: يتم المرور على عناصر المصفوفة replica matrix، ويتم اختيار النسختين اللتين تملكان أقل طاقة ديناميكية مستهلكة، وموثوقية هاتين النسختين أكبر من أو تساوي شرط موثوقية المهمة، ومجموع الطاقة الديناميكية المستهلكة من قبل هاتين النسختين أقل من كمية الطاقة الديناميكية المستهلكة من قبل النسخة الوحيدة المختارة (في حال تواجدها).
- (6) الأسطر 22-23: في حال عدم وجود نسخة وحيدة أو نسختين تحققان شرط موثوقية المهمة، يتم اختيار النسخة التي تحقق أكبر قيمة موثوقية ممكنة، وتكرر الخطوات السابقة.
- 3- الأسطر 29-31، تقوم خوارزمية EESARR بحساب موثوقية التطبيق ككل، الطاقة الديناميكية الكلية المستهلكة من قبل مهام التطبيق جميعها، والعدد النهائي لنسخ التطبيق المتماثلة بالترتيب.

8- نموذج المخطط المتوازي المستخدم في المحاكاة

استخدمنا في هذا البحث برنامج Matlab 2015Rb 64bit الغني عن التعريف كبيئة لمحاكاة عمل الخوارزميات المقترحة وتحليل نتائجها، ويهدف تقييم أداء خوارزمية جدولة مهام نظم الزمن الحقيقي الصارمة المقترحة في هذا البحث، سنستخدم ثلاثة نماذج أساسية من

المخططات المتوازية التي ترتبط فيها المهام بعلاقة الأسبقية و يتم تمثيلها من خلال مخطط DAG. وهذه النماذج هي:

1- نموذج التطبيق البسيط "Sample Application Model":

يتألف هذا النموذج من عشر مهام فقط ترتبط هذه المهام مع بعضها البعض من خلال علاقة الأسبقية، المهمة الأولى من هذه المهام هي مهمة الدخل، أما المهمة العاشرة هي مهمة الخرج، يتم تنفيذ هذه المهام على ثلاثة معالجات غير متجانسة. وهو نفس النموذج الممثل في الشكل 2 والذي قمنا بشرحه في الفقرات السابقة.

2- نموذج تطبيق مركبات متحركة حقيقي "Real-life Automotive Model Application":

تم طرح نموذج المركبات المتحركة هذا في أطروحة الدكتوراه [16] المقدمة من قبل J. Gan, P. Pop, and J. Madsen عام 2014. كما تم استخدامه في العديد من الأوراق البحثية منها [3].

يتألف نموذج تطبيق المركبات المتحركة هذا من ستة كتل وظيفية كما هو واضح في الشكل 3 وهذه الكتل هي [3]:

1- التحكم بالمحرك (Engine Controller): تتألف هذه الكتلة من سبعة مهام $(n_1 - n_7)$.

2- صندوق تغيير السرعة (Automatic Gear Box): مؤلفة من أربعة مهام $(n_8 - n_{11})$.

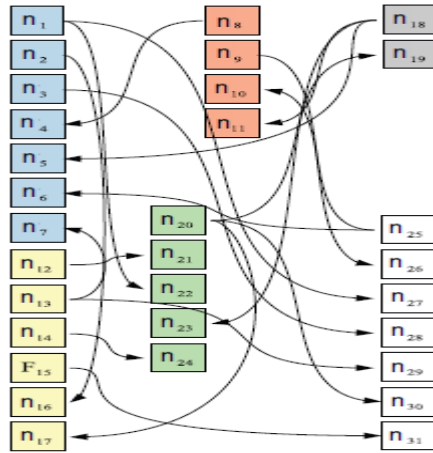
3- نظام الفرامل (Anti-Locking Brake System): وتتألف من ستة مهام $(n_{12} - n_{17})$.

4- مستشعر زاوية العجلة (Wheel Angle Sensor): تتألف من مهمتين فقط $(n_{18} - n_{19})$.

5- التحكم بالتوقف عن العمل (Suspension Controller): تتألف هذه الكتلة من خمسة مهام $(n_{20} - n_{24})$.

6- كتلة عمل جسم المركبة المتحركة (Body Work): وتتألف من سبعة مهام $(n_{25} - n_{31})$.

تظهر كل كتلة من كتل التطبيق الستة في الشكل 3 بلون مختلف، كما يظهر في الشكل علاقة الأسبقية ما بين مهام التطبيق. علماً أن المهام يتم تنفيذها على ثلاثة معالجات غير متجانسة وبالتالي زمن تنفيذ المهمة يختلف من معالج لآخر وهي قيم عشوائية تتبع التوزيع الاحتمالي ضمن المجال $100ms \leq w_{i,k} \leq 400ms$ ، كما أن كلفة نقل الرسالة من مهمة سابقة إلى مهمة لاحقة تم إسنادها لمعالج آخر هي أيضاً قيمة عشوائية تتبع التوزيع الاحتمالي وضمن المجال $100ms \leq c_{i,j} \leq 400ms$ [4].



الشكل 3 نموذج تطبيق مركبات متحركة حقيقي [4].

3- نموذج التطبيقات المتوازية المولدة عشوائياً " Randomly Generated Parallel Applications Model":

من أجل اختبار قدرات وفوائد خوارزميات جدولة مهام نظم الزمن الحقيقي الصارمة المقترحة على نطاق واسع، قمنا باختبار هذه الخوارزميات على التطبيقات المتوازية الممثلة بمخطط DAG، والتي يتم إنشاؤها عشوائياً بواسطة برنامج [17] 3.6 TGFF (Task For Free) Graphs. أما عدد العقد (المهام) في المخطط المولد عشوائياً، وبشكل مشابه للورقة البحثية [3]،

سنقوم بتوليد مخططات عشوائية مؤلفة من تدرج من عدد العقد يبدأ هذه التدرج من 50 عقدة (حجم صغير) وينتهي ب 500 عقدة (حجم كبير) وبمقدار زيادة يبلغ 50 عقدة، وهذه العقد ترتبط ببعضها بعلاقة الأسبقية، بحيث يتم إظهار أداء الخوارزميات بشكل واضح عند تطبيقها على المخططات المولدة عشوائياً.

9- المقاييس التجريبية وقيم المعاملات:

تم اختيار مقياسين لمقارنة الخوارزميتين المدروستين في هذه الدراسة بهدف اختبار قدرة وكفاءة هاتين الخوارزميتين، وتحديد إمكانية وقدرة الخوارزمية المقترحة EESARR على تحقيق الهدف المرجو منها . وهذه المقاييس هي:

1- موثوقية التطبيق:

الموثوقية المطلوب من التطبيق ليس عامل تحسن بقدر ما هي شرط لازم في تطبيقات نظم الزمن الحقيقي الصارمة من النوع الحساس لقضية السلامة، حيث أن فشل الجدولة في هذا النوع من التطبيقات قد يؤدي لنتائج كارثية. بالتالي فإن هدف الخوارزمية المقترحة في هذا البحث ليست تحسين الموثوقية بقدر ما هو تحقيق شرط أو هدف موثوقية التطبيق. في هذا البحث سنقوم بالمقارنة ما بين الخوارزميتين من أجل متطلبات موثوقية (هدف الموثوقية) تتراوح من 0.9 حتى 0.99 وبمعدل زيادة يبلغ 0.01، أي من 90% إلى 99%، وذلك من أجل نموذج التطبيق البسيط و نموذج تطبيق المركبات المتحركة الحقيقي، كما في الدراسات [4,2,15,7]، أما من أجل نموذج التطبيقات المتوازية المولدة عشوائياً فنقوم بمقارنة الخوارزميات المدروسة من أجل ثلاثة قيم لهدف الموثوقية، وهي أما موثوقية منخفضة تبلغ 0.9 (أي 90%)، موثوقية متوسطة تبلغ 0.95 (أي 95%)، وموثوقية عالية تبلغ 0.99 (أي 99%) [3]. أما بالنسبة لثابت معدل الأخطاء لكل معالج فهو قيمة عشوائية ضمن المجال $0.0010 \leq \lambda_k \leq 0.0020$ ويختلف من معالج لآخر بسبب الطبيعة غير المتجانسة للمعالجات [4].

2- الطاقة الديناميكية المستهلكة:

يقصد بها الطاقة التي تستهلكها مهام التطبيق أثناء عملية التنفيذ على المعالجات المتعددة وغير المتجانسة.

أما بالنسبة لمعاملات الطاقة العامة (المشتركة ما بين نماذج التطبيقات الثلاثة المقترحة) التي سيتم استخدامها في المقارنة فهي موضحة في الجدول التالي:

الجدول (3) معاملات الطاقة المستخدمة في التجارب [4].

الرمز	الشرح	القيمة
C_{ef}	السعة أو القدرة التبديلية الفعالة للمعالج أي عند انتقاله من تردد لأخر.	قيمة عشوائية تتراوح ضمن المجال $0.5 \leq C_{k,ef} \leq 1.0$
m_k	أس القوة الديناميكية، الذي يجب ألا يقل عن 2.	قيمة عشوائية تتراوح ضمن المجال $2.00 \leq m_k \leq 3.00$
P_{ind}	الطاقة الديناميكية المستقلة عن التردد.	قيمة ثابتة لكل المعالجات وتبلغ 0.005
f_{min}	أصغر تردد يمكن أن يدعمه المعالج.	قيمة عشوائية تتراوح ضمن المجال $0.25 \leq f_{min} \leq 0.30$
f_{max}	أكبر تردد يمكن أن يدعمه المعالج.	قيمة ثابتة لكل المعالجات وتبلغ 1

هذا البحث يهتم فقط بمرحلة التصميم، وبالتالي جميع القيم التي قمنا بذكرها ضمن هذه الفقرة هي قيم معروفة خلال مرحلة التحليل، وتم تبنيها في العديد من الأوراق البحثية والمقالات العلمية المحكمة والمنشورة عالمياً.

10- الاختبارات:

تهدف الاختبارات في هذا البحث إلى مقارنة أداء خوارزمية (Energy-Efficient)
EESARR وخوارزمية ESRG (Scheduling With Reliability Goal
(Energy-Efficient Scheduling Algorithm with Reliability Requirements)
من حيث الموثوقية المحققة والطاقة المستهلكة من قبل مهام التطبيق.

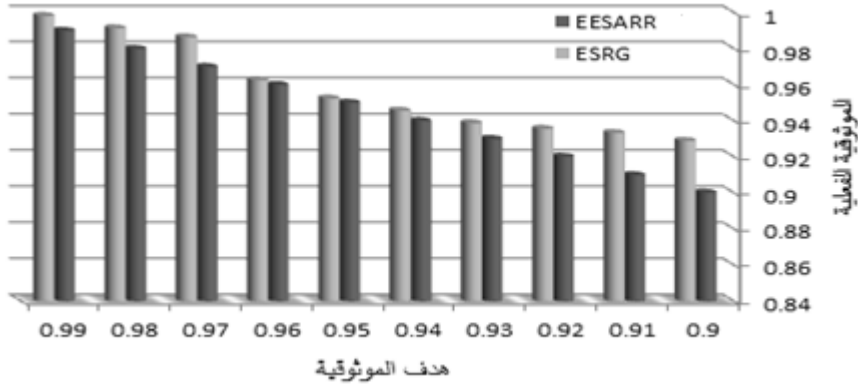
10-1 توصيف وتحقيق الاختبار الأول:

يمكن تلخيص معاملات الاختبار من خلال الجدول التالي :

الجدول (4) معاملات الاختبار الأول.

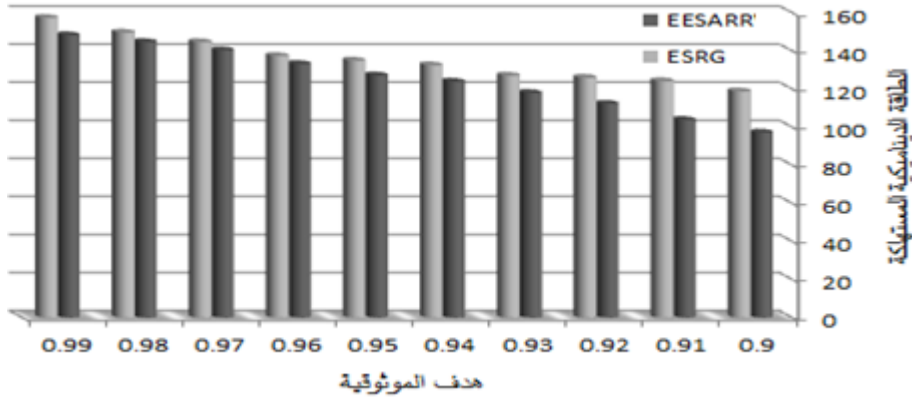
النموذج المستخدم	نموذج التطبيق البسيط
عدد العمليات	10 عمليات
عدد المعالجات	3 معالجات
متطلبات الموثوقية	من 0.9 حتى 0.99 بمعدل زيادة يبلغ 0.01
ثابت معدل أخطاء المعالج	$0.0010 \leq \lambda_k \leq 0.0020$
زمن تنفيذ العملية	$5 s \leq w_{i,k} \leq 21 s$
زمن نقل الرسالة من عملية لأخرى	$9 s \leq c_{i,j} \leq 27 s$
معاملات الطاقة المستخدمة	من الجدول 2
عدد مرات تكرار التجربة	10

نتائج هذا الاختبار تظهر من خلال المخططين التاليين، حيث يظهر في الشكل (4) موثوقية التطبيق في الخوارزميتين المذكورتين، ومن خلال هذا المخطط نستطيع أن نرى بوضوح أن قيمة الموثوقية الفعلية في خوارزمية ESRG أكبر من قيمة الموثوقية الفعلية المحققة بواسطة خوارزمية EESARR، على أية حال فإن خوارزمية EESARR تحقق هدف الموثوقية.



الشكل (4) قيمة الموثوقية الفعلية في تجربة النموذج البسيط.

أما الشكل (5) يظهر الطاقة الديناميكية المستهلكة من قبل مهام التطبيق، وكما هو واضح أن كمية الطاقة الديناميكية المستهلكة من قبل المهام عند استخدام خوارزمية ESGR أكبر من قيمة الطاقة الديناميكية المستهلكة عند استخدام خوارزمية EESARR.



الشكل (5) قيمة الطاقة الديناميكية المستهلكة في تجربة النموذج البسيط.

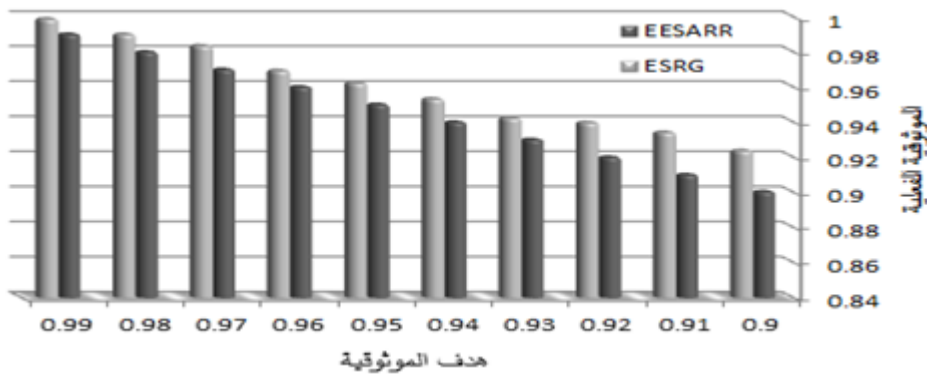
10-2 توصيف وتحقيق الاختبار الثاني:

يمكن تلخيص معاملات الاختبار من خلال الجدول التالي :

الجدول (5) معاملات الاختبار الثاني.

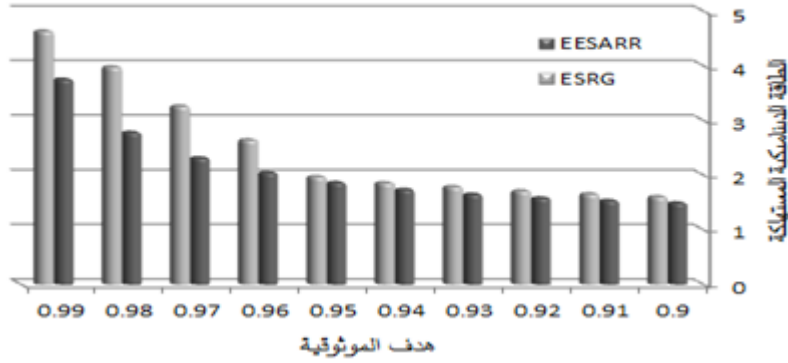
النموذج المستخدم	نموذج تطبيق مركبات متحركة حقيقي
عدد العمليات	31 عملية
عدد المعالجات	3 معالجات
متطلبات الموثوقية	من 0.9 حتى 0.99 بمعدل زيادة يبلغ 0.01
ثابت معدل أخطاء المعالج	$0.0010 \leq \lambda_k \leq 0.0020$
زمن تنفيذ العملية	$100 \text{ ms} \leq w_{i,k} \leq 400 \text{ ms}$
زمن نقل الرسالة من عملية لأخرى	$100 \text{ ms} \leq c_{i,j} \leq 400 \text{ ms}$
معاملات الطاقة المستخدمة	من الجدول 2
عدد مرات تكرار التجربة	10

نتائج هذا الاختبار تظهر من خلال الشكلين التاليين، حيث يظهر في الشكل (6) موثوقية التطبيق في الخوارزمتين المذكورتين، ومن خلال هذا الشكل، كما في التجربة السابقة نستطيع أن نرى بوضوح أن قيمة الموثوقية الفعلية في خوارزمية ESRG أكبر من قيمة الموثوقية الفعلية المحققة بواسطة خوارزمية EESARR، مع ذلك فإن خوارزمية EESARR تحقق هدف الموثوقية وهو المطلوب.



الشكل (6) قيمة الموثوقية الفعلية في تجربة نموذج تطبيق المركبات المتحركة الحقيقي.

أما الشكل (7) يظهر الطاقة الديناميكية المستهلكة من قبل مهام التطبيق، وكما هو واضح أن كمية الطاقة الديناميكية المستهلكة من قبل المهام عند استخدام خوارزمية EESARR أقل من كمية الطاقة الديناميكية المستهلكة عند استخدام خوارزمية ESRG.



الشكل (7) قيمة الطاقة الديناميكية المستهلكة في تجربة نموذج تطبيق المركبات المتحركة الحقيقي.

10-3 توصيف وتحقيق الاختبار الثالث:

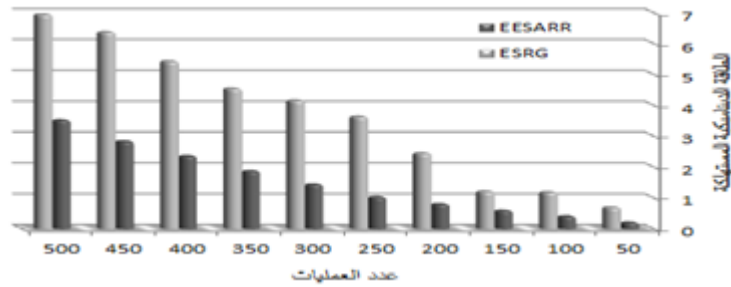
يمكن تلخيص معاملات الاختبار الثالث من القسم الأول من خلال الجدول التالي :

الجدول (6) معاملات الاختبار الثالث.

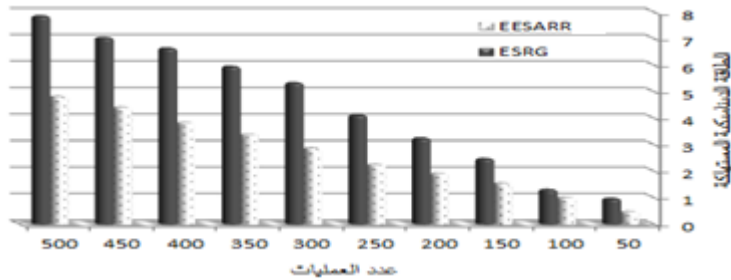
نموذج التطبيقات المتوازية المولدة عشوائياً	النموذج المستخدم
تدرج من 50 حتى 500 عملية بمقدار زيادة 50 عملية	عدد العمليات
10 معالجات	عدد المعالجات
من 0.9 حتى 0.99 بمعدل زيادة يبلغ 0.05	متطلبات الموثوقية
$0.0010 \leq \lambda_k \leq 0.0020$	ثابت معدل أخطاء المعالج
$10 \text{ ms} \leq w_{i,k} \leq 50 \text{ ms}$	زمن تنفيذ العملية
$10 \text{ ms} \leq c_{i,j} \leq 50 \text{ ms}$	زمن نقل الرسالة من عملية لأخرى
من الجدول 2	معاملات الطاقة المستخدمة
10	عدد مرات تكرار التجربة

يمكن أن نرى نتائج هذا الاختبار من خلال الأشكال الثلاثة التالية، حيث يظهر في الأشكال 8,9,10 كمية الطاقة الديناميكية المستهلكة عند هدف موثوقية يبلغ 90%، 95%، 99% على التوالي.

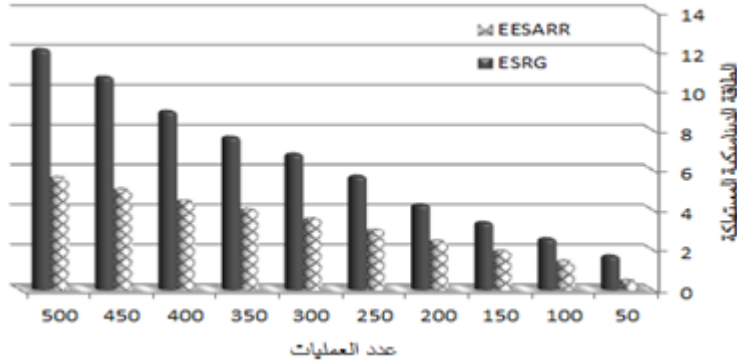
ومن خلال هذا الأشكال الثلاثة، نستنتج أن كمية الطاقة الديناميكية المستهلكة من قبل المهام عند استخدام خوارزمية EESARR أقل من كمية الطاقة الديناميكية المستهلكة عند استخدام خوارزمية ESRG.



الشكل (8) كمية الطاقة الديناميكية المستهلكة في تجربة نموذج التطبيقات المتوازية المولدة عشوائيًا عند هدف موثوقية 90%.



الشكل (9) كمية الطاقة الديناميكية المستهلكة في تجربة نموذج التطبيقات المتوازية المولدة عشوائيًا عند هدف موثوقية 95%.



الشكل (10) كمية الطاقة الديناميكية المستهلكة في تجربة نموذج التطبيقات المتوازية المولدة عشوائياً عند هدف موثوقية 99%.

11- الخلاصة والنتائج :

من خلال نتائج الاختبارات السابقة يمكننا أن نرى بوضوح أن خوارزمية EESARR استطاعت تحقيق الهدف المرجو منها، وهو تخفيض كمية الطاقة الديناميكية المستهلكة من قبل مهام التطبيق المتوازي الممثل من خلال مخطط DAG، مع تحقيق هدف الموثوقية المطلوبة من التطبيق. ذلك بغض النظر عن نموذج التطبيق المستخدم، أي سواء كان التطبيق عشوائياً، حقيقياً، أو بسيطاً. ويعود السبب في ذلك إلى أن خوارزمية ESRG تعمل على إيجاد نسخة المهمة التي تحقق الموثوقية الجزئية المطلوبة منها والتي تملك أقل تردد ممكن، ونظرياً ذلك سيؤدي إلى انخفاض استهلاك الطاقة، لكن بسبب الطبيعة غير المتجانسة للمعالجات فإن التردد المستخدم على معالج ما قد يستهلك طاقة أقل أو أكثر من معالج آخر عند استخدام نفس التردد، كما أن المهمة نفسها تملك زمن تنفيذ مختلف عند إسنادها على معالج مختلف، وبالتالي فإن خوارزمية EESARR المقترحة تعمل على إيجاد وإسناد نسخة المهمة التي تحقق الموثوقية المطلوبة وتكون الأقل استهلاكاً للطاقة بغض النظر عن التردد المستخدم في تنفيذ هذه المهمة.

أما من ناحية الموثوقية، من خلال التجارب السابقة نستنتج أن خوارزمية ESRG تحقق قيمة موثوقية أعلى من خوارزمية EESARR، وذلك أفضل بالطبع، لكنه مترافق مع زيادة في كمية الطاقة الديناميكية المستهلكة، ويعود السبب في ذلك إلى أن استخدام التردد الأقل الذي

ينفذ المهمة بالموثوقية المطلوبة قد يؤدي إلى اختيار نسخ موثوقيتها أكبر من الموثوقية المطلوبة، لأن خوارزمية ESRG تأخذ النسخة ذات التردد الأقل، بغض النظر عن الموثوقية المحققة طالما هي أكبر من هدف الموثوقية الجزئية للمهمة، أما بالنسبة لخوارزمية EESARR المقترحة تبحث عن النسخة الأقل استهلاكاً للطاقة طالما تحقق الموثوقية المطلوبة، وعملياً تختار النسخة التي تملك أقل طاقة مستهلكة وأقل موثوقية أكبر من هدف الموثوقية الجزئية المطلوبة من المهمة، أي أن زيادة الموثوقية لا تأتي بكلفة مجانية، لكن طالما أن خوارزمية EESARR استطاعت تحقيق هدف الموثوقية المرجو من التطبيق، بالتالي تعتبر عملية الجدولة موثوقة، أي أن خوارزمية EESARR موثوقة وهي أفضل في مجال تخفيض الطاقة الديناميكية المستهلكة، وهو المطلوب.

المراجع:

- 1- Xiao, X., Xie, G., Li, R., Li, K.: "Minimizing schedule length of energy consumption constrained parallel applications on heterogeneous distributed systems". In: Proceedings of the 14th IEEE International Symposium on Parallel Distributed Processing with Applications, pp. 1471–1476. IEEE Computer Society (2016).
- 2- Scheduling Parallel Applications on Heterogeneous Distributed Systems by Guoqi Xie, Gang Zeng, Renfa Li, Keqin Li. Springer ,2019.
- 3- G. Xie, Y. Chen, Y. Liu, Y. Wei, R. Li, and K. Li, "Resource consumption cost minimization of reliable parallel applications on heterogeneous embedded systems," IEEE Trans. Ind. Informat., vol. 13, no. 4, pp. 1629–1640, Aug. 2017.
- 4- G. Xie, Y. Chen, X. Xiao, C. Xu, R. Li, and K. Li, "Energy-efficient fault-tolerant scheduling of reliable parallel applications on heterogeneous distributed embedded systems," IEEE Transactions on Sustainable Computing, vol. PP, no. 99, pp. 1–1, Jun. 2017.
- 5- G. Xie, J. Jiang, Y. Liu, R. Li, and K. Li, "Minimizing energy consumption of real-time parallel applications on heterogeneous systems," IEEE Trans. Ind. Informat., vol. PP, pp. 1–1, Mar. 2017.
- 6- Hermann Kopetz ,Real-Time Systems Design Principles for Distributed Embedded Applications ,Second Edition,2011.
- 7- Tian Guo, Jing Liu,Wei Hu, and MengxueWei. "Energy-Aware Fault-Tolerant Scheduling Under Reliability and Time Constraints in Heterogeneous Systems". Springer, 36–46. 2018.
- 8- RELIABILITY OF COMPUTER SYSTEMS AND NETWORKS , Fault Tolerance, Analysis, and Design by MARTIN L. SHOOMAN,2002.
- 9- B. Zhao, H. Aydin, and D. Zhu, "Shared recovery for energy efficiency and reliability enhancements in real-time applications with precedence constraints," ACM Trans. Des. Autom. Electron. Sys, vol. 18, no. 2, pp. 1–21, 2013.

- 10– Samal, A.K.; Mall, R.; Tripathy, C.: Fault tolerant scheduling of hard real-time tasks on multiprocessor system using a hybrid genetic algorithm. *Swarm Evol. Comput.* 14, 92–105 (2014).
- 11– Xiao, X., Xie, G., Li, R., Li, K.: Minimizing schedule length of energy consumption constrained parallel applications on heterogeneous distributed systems, pp. 1471–1476. *IEEE Computer Society* (2016).
- 12– Li, K. Scheduling precedence constrained tasks with reduced processor energy on multiprocessor computers. *IEEE Trans. Comput.* 61(12), 1668–1681 (2012).
- 13– Laiping Zhao, Yizhi Ren, Yang Xiang, Sakurai, K., "Fault-tolerant scheduling with dynamic number of replicas in heterogeneous systems", *IEEE International Conference on High Performance Computing and Communications (HPCC)*, PP. 434 – 441, 2010.
- 14– Zhao, L., Ren, Y., Sakurai, K.: Reliable workflow scheduling with less resource redundancy. *Parallel Comput.* 39 (10), 567–585 (2013).
- 15– M. Wei, J. Liu, T. Li, X. Xu, W. Hu, and D. Zhao, "Fault-tolerant scheduling of real-time tasks on heterogeneous systems," in *IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*, pp. 1006–1011, 2017,.
- 16– J. Gan, P. Pop, and J. Madsen, "Tradeoff analysis for dependable real-time embedded systems during the early design phases," Ph.D. dissertation, Technical University of Denmark Danmarks Tekniske Universitet, Department of Informatics and Mathematical Modeling Institut for Informatik og Matematisk Modellering, 2014.
- 17– R. P. Dick, D. L. Rhodes, and W. Wolf, "Tgff: task graphs for free," in *Proc. 6th int. workshop on Hardware/software codesign*. *IEEE Computer Society*, 1998, pp. 97–101.
- 18– P. Pop, V. Izosimov, and P. Eles, "Scheduling and voltage scaling for energy/reliability trade-offs in fault-tolerant time-triggered embedded systems," in *IEEE/ACM Int. Conf. Hardware/software Code and Syst Synth*, 2007, pp. 233–238.
- 19– Y. Guo, D. Zhu, and H. Aydin, "Reliability-aware power management for parallel real-time applications with precedence constraints," in *Proc. Int. Conf. Green Comput*, 2011, pp. 1–8.
- 20– D. Zhu and H. Aydin, "Reliability-aware energy management for periodic real-time tasks," *IEEE Trans. Comput*, vol. 58, no. 10, pp. 1382–1397, 2009.

- 21– Z. Zong, A. Manzanares, X. Ruan, and X. Qin, “Ead and pebd: two energy-aware duplication scheduling algorithms for parallel tasks on homogeneous clusters,” *IEEE Trans. Comput.*, vol. 60, no. 3, pp. 360–374, Jan. 2011.
- 22– and D. Zhu, “Enhanced reliability-aware power management through shared recovery technique,” in *IEEE/ACM Int. Conf. Comput. Aided Design (ICCAD)*, 2009, pp. 63–70.
- 23– L. Zhang, K. Li, K. Li, and Y. Xu, “Joint optimization of energy efficiency and system reliability for precedence constrained tasks in heterogeneous systems,” *Int. J. Electron. Power & Energy Syst*, vol. 78, pp. 499–512, 2016.
- 24– A. Abdi and H. R. Zarandi, “Hystery: a hybrid scheduling and mapping approach to optimize energy consumption and lifetime reliability of heterogeneous multiprocessor systems,” *Journal of Supercomputing*, vol. 74, no. 5, pp. 2213–2238, 2018.
- 25– M. Lin, Y. Pan, L. Yang, M. Guo, and N. Zheng, “Scheduling co-design for reliability and energy in cyber-physical systems,” *IEEE Trans. Emerg. Topics. Comput*, vol. 1, no. 2, pp. 353–365, 2014.
- 26– ISO, “Iso 26262–road vehicles–functional safety,” International Organization for Standardization in ISO 26262, 2011.

تطوير نهج صيانة تنبؤية قائم على معالجة الأمواج الصوتية بخوارزمية فورييه متعددة التناقص

م. إبراهيم حمد *

د.م. ماجد حيبا ***

د.م. طلال حمود **

* طالب دكتوراه، قسم الإلكترونيات والاتصالات، كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية،
جامعة دمشق.

** أستاذ مساعد في قسم الإلكترونيات والاتصالات، كلية الهندسة الميكانيكية
والكهربائية، جامعة دمشق.

*** باحث رئيسي في المعهد العالي للعلوم التطبيقية والتكنولوجيا، دمشق.

الملخص

يُقدّم البحث الحالي نهج صيانة تنبؤية قائم على تسجيل نماذج من الأمواج الصوتية الصادرة عن الآلات المطلوب التنبؤ بأعطالها، ومن ثم تحول بيانات الأمواج المسجلة من المجال الزمني إلى المجال الترددي، وذلك باستخدام تحويل فورييه متعددة التناقص Fourier Multi-Tapering، على أن تقارن ترددات المطالات الأعظمية الظاهرة بمنحنيات الاستجابة الترددية الناتجة عن التحويل مع الترددات المرجعية المميزة لكافة الأعطال المحتمل حصولها بالآلة المعنية، وبحيث تشير التطابقات المسجلة بالترددات لحالة أو لحالات تعطل محددة تماماً. ولاختبار جدوى العمل بالنهج المقدم تم تطبيقه على محركات كهربائية تحريضية مجهولة الحالة الفنية، وبالنتيجة تحققت إمكانية التنبؤ بالعديد من الأعطال القائمة بتلك المحركات. وحيث أن تحويل فورييه متعددة التناقص لم يدرج ضمن أي نهج صيانة تنبؤية

الكلمات المفتاحية: الصيانة التنبؤية، مراقبة الحالة، التنبؤ بأعطال المحركات التحريضية، الصيانة القائمة على معالجة الأصوات، الصيانة القائمة على تحويل فورييه، تحويل فورييه للأمواج الصوتية، تحويل فورييه متعدد التناقص، تحليل أعطال المحركات الكهربائية.

Development of a Predictive Maintenance Process Based on Fourier Multi-Tapering of Acoustic Waves

Eng. Ibrahim Hamad *

Dr. Talal Hammod **

Dr. Majed Haiba ***

* PhD Student, Department of Electronics and Communications Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Damascus University.

** Assistant Teacher, Department of Electronics and Communications Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Damascus University.

*** Main Researcher, Higher Institute of Science and Technology, Damascus, Syria.

Abstract

The current research presents a predictive maintenance process based on recording of acoustic waves emitted from machines, then the recorded waves are transmitted from time to frequency domain using Fourier multi-tapering algorithm, then, frequencies of maximum amplitudes resulted from frequency responsive curves are compared with the theoretical frequencies of the expected faults, thus every matching indicates a specific fault or faults. For validating the presented process, it was applied on three induction motors which are in unknown technical conditions. As a result, the possibility of predicting several faults was achieved indicating the validity of the process. Since Fourier Multi-tapering has not been used previously in any known predictive maintenance process, to the best of the researcher's knowledge, it's current used can be seen as original contribution to the field of knowledge.

Key words: Predictive maintenance, Condition Monitoring, Fault prediction of induction motors, Acoustic based maintenance, Fourier transformation of acoustic waves, Multi-Tapering Fourier transformation, Fault analysis of electrical motors.

1. مقدمة:

تعتبر الصيانة التنبؤية Predictive Maintenance أحد أساليب إدارة الصيانة الحديثة والتي بدأ تطبيقها في الدول المتقدمة مع نهايات السبعينات وبدايات الثمانينات من القرن العشرين. تعتمد الصيانة التنبؤية على مبدأ مراقبة الحالة Condition Monitoring وذلك بهدف الحصول على معلومات عن الحالات الفنية للآلات والتنبؤ بأنواع ومواعيد الأعطال قبل حدوثها، ما يساعد على اتخاذ القرارات المناسبة بخصوص التوقيت الأنسب لتنفيذ الصيانات، وتنفيذ تلك الصيانات دون التأثير على خطط الإنتاج، ودون ترتيب خسائر بسبب التوقفات الناتجة عن الأعطال المفاجئة [1,2]. من بين التقانات المتاحة لتنفيذ الصيانة التنبؤية تعد تقانة قياس وتحليل الأمواج الصوتية من بين الأهم والأكثر انتشاراً [3,4,5]. ووفقاً لما هو مبين بالشكل (1) تقوم تلك التقانة على تحصيل الأمواج الصوتية ومعالجتها بشكل دوري بهدف استنتاج التغيرات الحاصلة على سمات مميزة (التغيرات الحاصلة على البصمات الصوتية)، حيث تحدد خطط الصيانة بناءً على نتائج المقارنة بين البصمات اللاحقة والبصمات المرتبطة بتشغيل الآلات وهي بوضعها المثالي [6].

تسجيل ومعالجة نماذج من الأمواج الصوتية الصادرة عن الآلات حال وضعها بالاستثمار (وهي جديدة) وذلك بهدف استخلاص السمات المميزة المستهدفة

التسجيل والمعالجة الدورية لنماذج من الأمواج الصوتية الصادرة عن نفس الآلات وذلك بهدف استخلاص السمات المميزة لتلك الأمواج

تقييم التغيرات الحاصلة على الحالات الفنية للآلات من خلال دراسة التغيرات الحاصلة على السمات، وتحديد برامج الصيانة بناءً على النتائج

الشكل (1): المخطط الانسيابي العام لتحليل أعطال الآلات بالاعتماد على الأمواج الصوتية

أما فيما يتعلق بالمعالجات الرياضية التي تنفذ عند العمل بمرجعية المخطط الانسيابي أعلاه، فتشير المراجع المختصة إلتوفر عدد كبير من الطرق المتاحة، حيث تؤكد تلك المراجع على تميز طرق المعالجة القائمة على تحويل نماذج الأمواج الصوتية المسجلة إلى المجال الطيفي [7] Spectrum Analysis، ما يسمح باستنتاج التغيرات الحاصلة على الحالات الفنية للآلات من خلال دراسة التغيرات الحاصلة على منحنيات الاستجابة الترددية الخاصة بها. ولتنفيذ التحويل أعلاه لا بد من استعمال خوارزمية تحويل فورييه السريع Fast Fourier Transform إن كانت المعطيات المطلوب معالجتها مستقرة Stationary، واستعمال أحد خوارزميات التحويل التالية إن كانت المعطيات المطلوب معالجتها غير المستقرة Non-stationary، علماً بأن المعطيات غير المستقرة تتميز عن المعطيات المستقرة بكون سماتها الإحصائية الأساسية، مثل المتوسط والانحراف المعياري، متغيرة مع الزمن [8]:

- Fourier Segmented Data (FSD): عبارة عن خوارزمية تحويل قائمة على حساب متوسط الأطياف الترددية الناتجة عن تطبيق تحويل فورييه السريعة على نوافذ متعددة متساوية الأطوال من المعطيات الجاري معالجتها، كلاً على حدة، أخذين بعين الاعتبار وجود تراكب overlapping من مرتبة معينة بين تلك النوافذ.
- Fourier Multi-Taper (FMT): عبارة عن خوارزمية قائمة على حساب متوسط الأطياف الترددية الناتجة عن تطبيق تحويل فورييه السريعة على نوافذ متعددة متناقصة بشكل تدريجي بأطوالها من المعطيات الجاري معالجتها.
- التحويل المويجي Wavelet Transform.

والسؤال الذي يطرح نفسه ضمن السياق أعلاه هو: هل تتميز أحد خوارزميات التحويل أعلاه عن باقي الخوارزميات من حيث قدرتها على الوصول للتمثيل الطيفي الأكثر دقة، وبالتالي من حيث قدرتها على التنبؤ بالأعطال القائمة بالآلات بدقة أكبر؟ وحيث أن المراجع المختصة لا تشمل على إجابة صريحة عن هذا السؤال، فقد ظهرت الحاجة للبحث عن تلك الإجابة من خلال عمل بحثي مناسب، وهذا ما حَرَّضَ فكرة البحث الحالي الهادف لتطوير مرجعية ما تمكن من تحديد الخوارزمية الأنسب للتحويل الطيفي

للمعطيات الصوتية المسجلة بهدف تحليل وكشف الأعطال، أخذين بعين الاعتبار أن الأعمال التجريبية اللازمة لذلك ستنفذ على محركات كهربائية تحريضية من الأنواع المستعملة بآلات التشغيل المبرمج.

2. الآلية المُعتمَدة لتحقيق أهداف البحث:

تقوم الآلية المُعتمَدة لتحقيق الهدف الأساسي لهذا البحث على مقارنة النتائج المستخلصة من خلال تطبيق أحد خوارزميات التحويل أعلاه على نموذجي أصوات مسجلين لمحرك بحالة سليمة ولنفس المحرك بعد تعطيله بشكل مفتعل، وبعد ذلك تحويل البيانات لكل تسجيل على حدة إلى المجال الترددياً أخذين بعين الاعتبار تكرار هذه الخطوة باستعمال خوارزميات التحويل المذكورة أعلاه كافة، ومن ثم العمل على دراسة منحنيات الاستجابة الترددية الناتجة عن عمليات التحويل بهدف تحديد المنحني الأكثر احتواءً على المركبات الترددية المميزة لحالة التعطل المفتعل (وفقاً للقيم المرجعية التي تحسب بمعادلات معتمدة، وفقاً لما سيقدم بفقرة لاحقة)، وبحيث يتم التعامل مع خوارزمية التحويل المولدة لذلك المنحني على أنها الأنسب لتنفيذ عملية التحويل الطيفي للمعطيات الصوتية المسجلة بهدف تحليل وكشف الأعطال، ويبين الشكل (2) المراحل التفصيلية للآلية المعتمدة.

سجل نموذج من الأمواج الصوتية الصادرة عن محرك كهربائي تحريضي سليم، ونموذج من الأمواج الصوتية الصادرة عن نفس المحرك بعد تعديله من خلال إحداث عطل مفتعل بأحد رولماناته



تحويل نموذجي الأمواج الصوتية من الصيغة التماثلية إلى الصيغة الرقمية ومن ثنائي القناة إلى أحادي القناة وتمرير البيانات الناتجة على فلتر مناسب لتخليصها من



نموذجي الأمواج الناتجين عن المعالجات أعلاه إلى المجال الطيفي، وذلك باستخدام أحد خوارزميات التحويل بالفقرة الأولى من هذه الورقة البحثية، وبحيث يتم الحصول على منحنيني الاستجابة الترددية لنموذجي الأمواج



يد الترددات المرجعية الموافقة لحالة العطل المفتعل برولمان المحرك، وذلك بمرجعية المعادلات ملاحظات الإرشادية التي تقدمها المراجع المختصة، وفقاً لما هو مدرج بالفقرة (3) من هذه الورقة البحثية



تحديد المركبات الترددية الموافقة لتغيرات ملحوظة بمطالات منحنى الاستجابة الترددية العائد للمحرك المعدل، وذلك من خلال المقارنة بين ذلك المنحني والمنحني الموافق العائد للمحرك السليم



مقارنة المركبات الترددية الموافقة للتغيرات الملحوظة بمطالات منحنى الاستجابة الترددية العائد للمحرك المعدل مع الترددات المرجعية الموافقة لحالة العطل المفتعل برولمان المحرك، فإن توافقت فالخوارزمية المستعملة بالتحويل مناسبة وتعطي نتائج يمكن من خلالها تحديد الأعطال القائمة



الخطوات أعلاه أخذين بعين الاعتبار تغيير الخوارزمية المستعملة لتحقيق التحويل إلى المجال الترددي، فإن هذه الخطوة حتى استعمال كافة خوارزميات التحويل المتاحة، وبحديث يتم التعامل مع كل خوارزمية من التنبؤ بالأعطال القائم على أنها مناسبة لمعالجة التسجيلات الصوتية المسجلة بهدف التنبؤ بالأعطال

الشكل (2): الخطوات الخاصة بتحقيق الآلية المعتمدة لتحقيق أهداف البحث الحالي

3. أعطال المحركات التحريضية وتردداتها المرجعية: تصنف أعطال المحركات الأكثر

شيوفاً إلى ما يلي:

i. أعطال الرولمانات: يعتبر هذا النوع من الأعطال الأكثر انتشاراً حيث تعاني الرولمانات من أنواع الأعطال التالية، والتي يرتبط كل منها بقيمة تردد مرجعي يميزها عن غيرها من الأعطال، ما يتيح إمكانية التعرف على ذلك العطل بمرجعية تردده المميز:

• **عطل المدرج الخارجي (BPFO):** عبارة عن تشقق أو تكسر بجسم المدرج الخارجي أو اهتراء موضعي أو عام بمساره. ووفقاً لما هو مبين بالشكل (3)، يتميز الطيف الترددي الخاص بهذا النوع من الأعطال بوجود مطالات أعظمية متخادمة عند ترددات موافقة لمضاعفات التردد المميز لعطل المدرج الخارجي، أي عند 1BPFO، وعند 2BPFO، وهكذا...، حيث:

$$BPFO = \frac{N}{2} * F * (1 - \frac{B}{P} * \text{Cos}\theta) \dots (1)$$

حيث: N عدد كرات أو دحارجالرولمان، F سرعة دوران المحرك بالثانية، B قطر الكرة أو الدحروج، P قطر دائرة خطوةالرولمان، و θ زاوية تماسالرولمان.

- **عطل المدرج الداخلي (BPFI):** عبارة عن تشقق أو تكسر بجسم المدرج الداخلي أو اهتراء موضعي أو عام بمساره. ووفقاً لما هو مبين بالشكل (3)، يتميز الطيفالترددى الخاص بهذا النوع من العيوب بظهور مطالات أعظميةمتخامدة عند ترددات موافقة لمضاعفات التردد المميز لعطل المدرج الداخلي، أي عند 1BPFI، وعند 2BPFI، وهكذا...،بالإضافة لظهور توافقيات ترددها 1XRPM عند كل توافقيةBPFI،حيث:

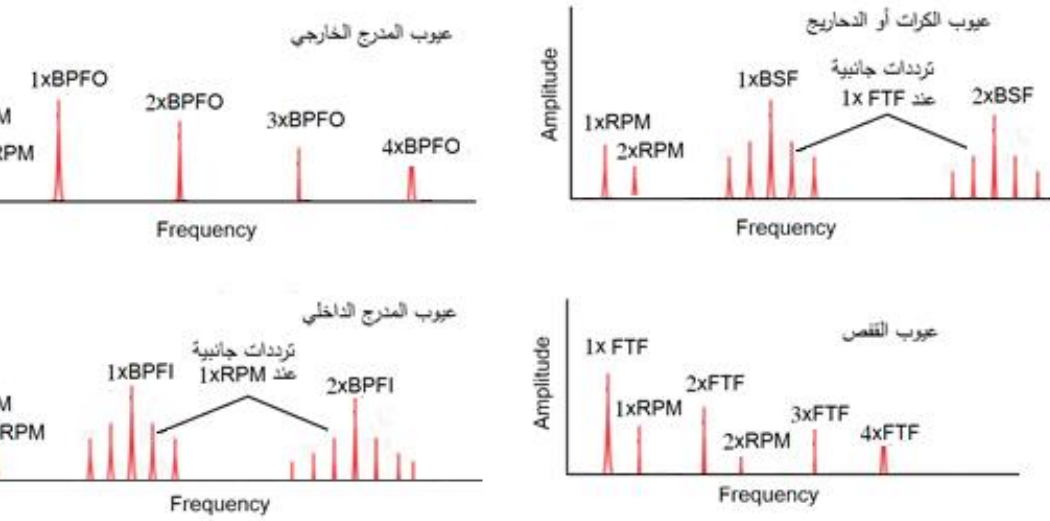
$$BPFI = \frac{N}{2} * F * (1 + \frac{B}{P} * \text{Cos}\theta) \dots (2)$$

- **عطل القفص (FTF):** عبارة عن تشوه أو تكسر أو اهتراء موضعي أو عام بجسم القفص، ووفقاً لما هو مبين بالشكل (3)، يتميز الطيفالترددى الخاص بهذا النوع من العيوب بظهور مطالات أعظميةمتخامدة عند ترددات موافقة لمضاعفات التردد المميز لعيب القفص، أي عند 1FTF، وعند 2FTF، وهكذا، حيث:

$$FTF = \frac{F}{2} * (1 - \frac{B}{P} * \text{Cos}\theta) \dots (3)$$

- **عطل الدحارج (BSF):** عبارة عن تشوه أو اهتراء موضعي أو عام بدحارج الرولمان، ووفقاً لما هو مبين بالشكل (3)، يتميز الطيفالترددى الخاص بهذا النوع من العيوب بظهور مطالات أعظمية متخامدة عند ترددات موافقة لمضاعفات التردد المميز لعيب الدحارج، أي عند 1BSF، وعند 2BSF، وهكذا...، بالإضافة لظهور توافقيات ترددها 1xFTF عند كل توافقية BSF، حيث:

$$BSF = \frac{P}{2B} * F * [1 - (\frac{B}{P} * \text{Cos}\theta)^2] \dots (4)$$



الشكل (3): الترددات المميزة لبعض الأعطال الشائعة بالرولمانات

ii. أعطال الارتخاء: يمكن تمييز الحالات التالية:

- **خلوص كبير داخل الرولمان:** تتميز الاستجابة الترددية الخاصة بهذا النوع من العيوب بوجود مطالات أعظمية تردداتها من مضاعفات 0.5 RPM، وتقع ضمن المجال 2 to 10 RPM.
- **خلوص كبير بين الرولمان والمحور:** تتميز الاستجابة الترددية الخاصة بهذا النوع من العيوب بوجود مطالات أعظمية متعددة تردداتها متزامنة مع سرعة الدوران، وعادة ما ترتبط القمة الأعلى بينها بتردد قيمته 3 RPM.
- **خلوص زائد بين الرولمان والحاضن الخارجي:** تتميز الاستجابة الترددية الخاصة بهذا النوع من العيوب بوجود مطالات أعظمية متعددة تردداتها متزامنة مع سرعة الدوران، وعادة ما ترتبط القمتين الأعلىين بينها بترددين قيمتهما 1 RPM و 4 RPM.

iii. الأعطال الكهربائية: كما هو الحال بالنسبة للأعطال أعلاه، يمكن الحصول على

معلومات مهمة عن طبيعة الأعطال الكهربائية من خلال دراسة منحنيات الاستجابة الترددية. بالعادة، تتسبب الأعطال الكهربائية بعدم انتظام بالقوى المتولدة

عن الحقل المغناطيسي المؤثرة على الجزء الدوار و/أو على الجزء الثابت [7]،
وفيما يلي بعض المصطلحات اللازم معرفتها عند العمل على معالجة الاهتزازات
المرتبطة بأعطال كهربائية:

- FL: تردد خط التغذية (50 or 60 Hz).

- NS: سرعة التزامن، بوحدة RPM، تحسب بالمعادلة التالية، حيث المتغير
Poles No. مساوي لعدد أقطاب المحرك:

$$NS = (120 FL) / \text{Poles No.} \quad \dots(5)$$

- FS: تردد الانزلاق (Hz)، يحسب بالمعادلة التالية حيث:

$$FS = (Ns \times RPM) / 60 \quad \dots(6)$$

- PF: تردد عبور الأقطاب (Hz)، يحسب بالمعادلة التالية:

$$PF = \text{Poles No.} \times FS \quad \dots(7)$$

- RPF: تردد عبور قضبان الدوار، يحسب بالمعادلة التالية، حيث
متغير Bars No. مساوي لعدد قضبان الدوار:

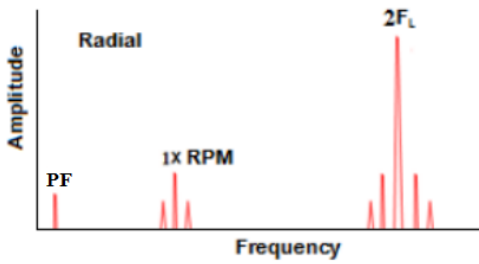
$$RPF = \text{Bars No.} \times NS \dots(8)$$

وفيما يلي عرض للأعطال الكهربائية الأساسية وللمركبات الترددية الدالة عليها ضمن
طيف إشارة الاهتزاز:

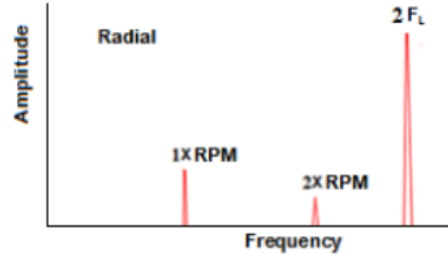
- **عطل الثابت:** كما هو مبين بالشكل (4/a)، يظهر هذا العطل على شكل مطالات أعظمية متعددة متخامدة تردداتها متزامنة مع سرعة الدوران، بالإضافة لمطال أعظمي إضافي بقيمة أكبر بشكل ملحوظ عند تردده مساوي لـ 2FL ضمن منحنى الاستجابة الطيفية لإشارة الاهتزاز.
- **دوار غير متمركز:** كما هو مبين بالشكل (4/b)، يظهر هذا العطل على شكل مطال أعظمي تردده مساوي لـ 2FL، مترافق مع مطالات جانبية أعظمية تردداتها مزاحة عن التردد 2FL بقيم ثابتة مقدارها PF، أي عند ترددات مساوية لـ $2FL \pm PF$ و $2FL \pm 2PF$ ، ومطال أعظمية أخر عند 1RPM، مترافق مع مطالات جانبية أعظمية تردداتها مزاحة عن

التردد 1RPM بقيم ثابتة مقدارها PF، أي عند ترددات مساوية لـ $1RPM \pm PF$ ، وأخيراً كمطال أعظمي ثالث عند PF.

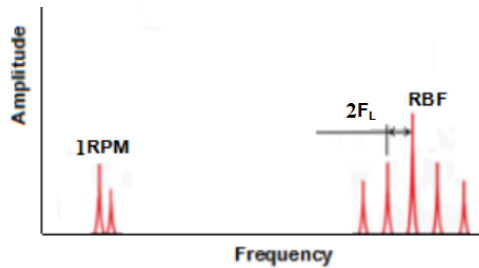
- أعطال تكسر القضبان: يتسبب الاضطراب الحاصل بالتيار المتدفق عبر قضبان الدوار الخاصة بمحرك تحريضي (والناتج عن التشقق أو التكسر) بتغير طيف الاهتزاز المرافق بحيث تظهر توافقيات جانبية للمطال الاعظمي الموافق لتردد عبور قضبان الدوار، علماً بأن ترددات تلك التوافقيات مساوية لـ $RPF \pm 2FL$ و $RPF \pm 4FL$ ، وفقاً لما هو مبين بالشكل (4/C).



(4/b) حالة دوار غير متمركز



(4/a) تعطل الجزء الثابت



(4/C) تكسر قضبان الدوار

الشكل (4): أطياف الاستجابات الترددية المميزة لحالات تعطل الثابت والدوار غير المتمركز وتكسر قضبان

4. التجهيزات المستعملة بتنفيذ البحث الحالي: ضمن سياق العمل بالبحث الحالي تم استعمال التجهيزات التالية:

أ. لاقط صوتي باستجابة ترددية منتظمة، ونمط عمل حقيقي غير اتجاهي، طراز ECM8000، من إنتاج الشركة الألمانية Behringer، ممانعته 600 Ohms، وحساسيته -60dB، ومجال عملها الترددي من 15 إلى 20 kHz.

ب. بطاقة تحصيل صوت مجهزة بما يلزم بوصلها مع حاسب شخصي، من إنتاج الشركة اليابانية Roland، طرازها UA-1010، واستجاباتها الترددية وفق التالي:

- عند تردد تحصيل 96 KHz : 20 Hz to 40 kHz (+0/-2 dB)
 - عند تردد تحصيل 48 KHz : 20 Hz to 22 kHz (+0/-2 dB)
 - عند تردد تحصيل 44.1 KHz : 20 Hz to 20 kHz (+0/-2 dB)
- ت. ثلاثة محركات كهربائية تحريضية ثلاثية الطور، متطابقة من حيث المواصفات، ومختلفة من حيث الحالات الفنية (الأول مستخدم لمدة 700 ساعة، والثاني مستخدم لمدة 18300 ساعة، والثالث مستخدم لمدة 19200 ساعة)، وللتمييز بينها أعطيت الرموز M1 و M2 و M3 بالترتيب. المواصفات الاسمية لكل منها وفق الآتي:
- الاستطاعة الاسمية للمحرك مساوية لـ 7.5 KW، وتيار تشغيله الأعظمي مساوي لـ 9.2A، وسرعة دورانه الاسمية مساوية لـ 1440 RPM.
 - عدد أقطاب المحرك مساوي لـ 4، وعدد قضبان دواره مساوي لـ 34، ونوع الرولمانات المدمجة بتركيبته هو SKF 6206.

ث. وحدة تحكم طراز 5442-25/570 DSV، من إنتاج الشركة الألمانية Dietz Electronic، للتحكم بسرعة دوران المحرك ضمن المجال من 0 وحتى 4000 RPM.

ج. حاسب محمول مجهز ببرمجيتي Matlab R2014a و Autosignal V1.7، علماً بأن البرمجية الثانية مجهزة بواجهة تخاطبيه تسمح بتنفيذ كافة أنواع المعالجات اللازمة للبحث، بالمجالين الزمني والترددي، ذلك من خلال أوامر جاهزة، متاحة ضمن قوائم منسدلة، وهذا ما يميزها عن البرمجية الأولى التي تستلزم العمل على وضع ترميز برمجية (كودات) لتنفيذ المعالجات المطلوبة.

5. أبحاث ودراسات مرجعية:

ضمن سياق العمل على تحديد الأعطال بالاعتماد على التحليل الطيفي لتسجيلات صوتية مأخوذة باستخدام هاتف محمول لرولماناتمحرك ذو استطاعة منخفضة قام الباحثان M. Oman و K. Krishnamoorthi بتطوير واستخدام تطبيق قائم على إخضاع الأمواج الصوتية المسجلة لتحويل هلدريت وطيف كورتسس Hilbert transform and Spectral kurtosis، ما مكن من تمييز الترددات المرتبطة بمطالاتأعظمية، ومن ثم تحديد الأعطال القائمة من خلال المقارنة بين تلك الترددات والترددات المرجعية الموافقة لحالات تعطل معروفة للرولمانات [9]. أكدت النتائج المستخلصة على أن إمكانية التنبؤ بأعطال الرولمانات من خلال تسجيل ومعالجة الأمواج الصوتية بالتطبيق المطور قائمة على الرغم من انعدام قدرة اللاقط الصوتي للهاتف المستخدم على تمييز الترددات التي تقل عن 200 Hz، على الرغم من أن المجال الترددي المميز لأعطال الرولمانات يقل عن تلك القيمة. أما الباحث F. Hemmati وزملاؤه [10] فقد عملوا على تطوير تقانة صيانة تنبؤية فعالة من حيث القدرة على التنبؤ بأعطال المحركات الكهربائية. التقانة المطورة قائمة على تسجيل الأمواج الصوتية الصادرة عن المحركات الكهربائية ونقلها للمجال الطيفي باستخدام التحويل المويجي، ذلك لأن المعالجات البديلة القائمة على تحويل فورييه السريع وتحويل فورييه قصير الأمد لم تكن كافية للوصول لنتائج إيجابية وفقاً للنتائج التي استخلصت من قبلهم. وفيما يتعلق بالباحث علي محمد وزملاؤه [11] فقد عملوا على تطوير خوارزمية صيانة تنبؤية قائمة على تسجيل الأمواج الصوتية الخاصة بضغط هواء ومعالجتها باستخدام التحويل المويجي المستمر، ذلك لان إمكانية الحصول على نتائج إيجابية لم تكن قائمة من خلال العمل بمرجعية تحويل فورييه السريع. وفيما يتعلق بالباحثان A. Glowacz و Z. Glowacz فقد عملا على تطوير تقانة تشخيص أعطال لمحركات التيار المستمر [12]. التقانة المطورة قامت على إخضاع المقاطع الصوتية الخاصة بمحركات معروفة الحالة الفنية (واحد سليم والباقي بحالات تعطل معروفة) لتحويل فورييه السريع، حيث استخلصا من نتائج ذلك التحويل أشعة السمات المستهدفة (Nearest neighbor و Nearest mean)، وباستخدام خوارزمية ذكاء صناعي محددة

حصلا على الأنماط المرجعية Template patterns الخاصة بالمحركات السليمة والمعطلة، وباستخدام تلك الأنماط تم تحديد حالات التعطل لمحركات إضافية غير معروفة الحالة الفنية بدقة %84. أما عمل الباحثان N.Saraswat و P.Sharma فقد كان مشابهاً لعمل الباحثين السابقين من حيث اعتماده على خوارزمية ذكاء صناعي (الشبكات العصبونية) للوصول للأنماط المرجعية وبالتالي استنتاج حالات التعطل، ومختلف عنه من حيث استخدامه للتحويل المويجي بدلاً من تحويل فورييه، ومن حيث التطبيق حيث أنه طبق على مراوح كهربائية بدلاً من محركات التيار المستمر [13]. أما الباحث Adam Glowacz فقد طبق التقانة المعروضة بالمرجع [12] (وفقاً لما عرض أعلاه) على أربعة محركات تحريضية ثلاثية الطور، الأول بحالة سليمة والثاني بتكسر قضيب دوار واحد والثالث بتكسر قضيب دوار والرابع بحلقة قفص سنجابي معطلة، ما مكنه من استنتاج الأنماط المرجعية الموافقة لتلك الحالات، ومن ثم استعمال النتائج للتنبؤ بأعطال محركات مدرجة ضمن برنامج صيانة تنبؤية [14]. أما الباحث باسل محمد سعيد وزملاؤه [15] فقد عملوا على كشف عطل تكسر قضبان الجزء الدوار للمحرك التحريضي. وضمن ذلك السياق حصلوا إشارات التيار والاهتزاز والصوت عند أحمال متعددة لمحرك سليم ولآخر ثلاثة من قضبانه مكسورة، وعالجوا تلك الإشارات بالمجالين الزمني والطيفي. السمات الزمنية التي استعملت هي متوسط الجذر التربيعي والقيمة الأعظمية لإشارة التيار وقيمة الذروة لإشارتي الاهتزاز والصوت. ولمعالجة النتائج بالمجال الطيفي استخدموا الطريقة التقليدية القائمة على حساب الترددات الاسمية الخاصة بعطل تكسر القضبان ومن ثم تحديد المطالات الموافقة لتلك الترددات بمنحنيات الاستجابة الترددية الناتجة عن تحليل فورييه السريع. بينت النتائج أن التنبؤ بعطل تكسر القضبان لم يكن ممكناً باستخدام السمات الزمنية، وكان ممكناً باستخدام المعالجة الترددية لإشارتي التيار وسرعة الاهتزاز الموافقة لحالة الحمل الكامل فقط، كما انه لم يكن ممكناً باستخدام المعالجة الترددية للأمواج الصوتية، وعزي السبب لضعف استجابة متحسسات الصوت المستخدمة.

ولمناقشة الأعمال أعلاه، يمكن أن توزع على صنفين، الأول قائم على التنبؤ بالأعطال من خلال تحديد الترددات الموافقة لمطالات أعظمية واضحة ومقارنة النتائج المستخلصة مع

الترددات المرجعية لحالات تعطل معروفة، الأبحاث [9,11,15]، حيث يشير كل تطابق لحالة تعطل محددة، أما الصنف الثاني فيعتمد على معالجة نتائج التحليل الطيفي باستخدام خوارزميات ذكاء صناعي، الأبحاث [10,12,13,14]، ما يُمكن من الحصول على أنماط مرجعية وبالتالي استنتاج حالات التعطل بمرجعية تلك الأنماط. ما يميز الصنف الثاني عن الأول أن الحاجة غير قائمة لا للبحث عن آلية معالجة تمكن من التمييز المنفرد للمطالات الأعظمية ضمن منحنى الاستجابة الترددية، ولا للمعرفة المسبقة بالترددات المرجعية الموافقة لكافة الأعطال المحتملة. وبالمقابل ما يميز الصنف الأول عن الثاني عدم حاجته لعدد كبير من الآلات المختبرة، وهو أمر مطلوب وضروري لضمان الحصول على نتائج موثوقة وشاملة عند العمل بأحد طرق الصنف الثاني، حيث الحاجة قائمة لما لا يقل عن آلة واحدة بوضع فني جيد وآلة واحدة تعاني من نوع عطل محدد، وبحيث يتم تغطية كل أنواع الأعطال الممكنة منفردة ومتقاطعة (للحصول على المعطيات اللازمة لاستنتاج كافة الأنماط المرجعية)، وهو أمر يستحيل تحقيقه بمعظم بيئات العمل الواقعية. ويغض النظر عن الاختلافات القائمة بين الصنفين أعلاه يمكن القول بأن نتائج الأبحاث أعلاه تفيد بأن التنبؤ بالأعطال بمرجعية نتائج مستخلصة بتحويل فورييه السريع منفرداً غير ممكن نظراً لانعدام إمكانية تمييز المطالات الموافقة للترددات الاسمية للأعطال [15]، ولا بد من إتباع ذلك التحويل بمعالجات لفترة إضافية، وفق ما تم بالبحث [9]، أو النقل إلى المجال الطيفي باستخدام تقانة التحويل المويجي، وفق ما تم بالبحثين [10,11]، وإتباع تحويل فورييه بمعالجة إضافية باستخدام خوارزميات ذكاء صناعي، وفق ما تم بالبحثين [12,14]، وإتباع التحويل المويجي بذكاء صناعي، وفق ما تم بالبحث [13]، أو بالبحث عن خوارزمية تحويل بديلة قادرة على تمييز الترددات الموافقة لمطالات أعظمية دون الحاجة لمعالجات رياضية إضافية، وفقاً لما هو قائم بطريقة التناقص التدريجي المتعدد [16] Multitapering، والتي استعملت بالبحث الحالي، علماً بأنها لم تستخدم سابقاً بمجال التنبؤ بالأعطال، وفقاً لما أُتيح للباحث التأكد منه.

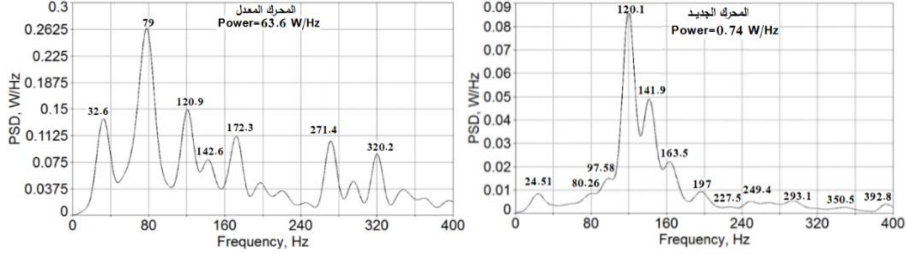
6. الأعمال المنجزة والنتائج المستخلصة:

1.6 تحديد الخوارزمية الأنسب للتنبؤ بالأعطال من خلال التحويل إلى المجال الطيفي:

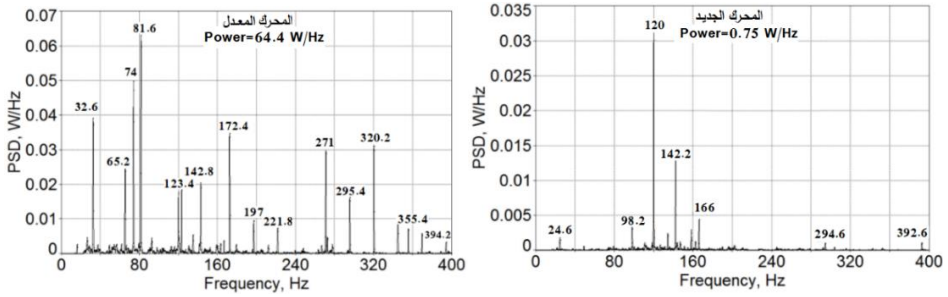
وفقاً لما ذكر أعلاه، فإن المراجع العلمية المعنية بموضوع هذا البحث تشير إلى إمكانية تنفيذ عملية التحويل من المجال الزمني إلى المجال الطيفي من خلال مجموعة من الخوارزميات المعروفة، كما تشير أيضاً إلى ضرورة استخدام الخوارزمية الأنسب للتحويل وبما يتوافق مع طبيعة البيانات المطلوب معالجتها. ولتحديد الخوارزمية الأنسب للعمل الحالي ظهرت الحاجة لتحصيل معطيات صوتية لمحرك بعطل مفتعل ومن ثم معالجة معطيات ذلك المحرك باستخدام عدد من الخوارزميات ومحاولة التنبؤ بالعطل المفتعل من خلال النتائج المستخلصة، على أن يُقَر بالخوارزمية الأنسب من خلال تقييم مدى قدرتها على التنبؤ بالعطل المفتعل، وفقاً لآلية العمل المبينة بالخوارزمية المدرجة بالشكل (2). وضمن ذلك السياق، حصلت الأمواج الصوتية¹ الصادرة عن المحرك M1 بعد استقرار عمله على سرعة دوران مساوية لـ 1470RPM، ثم عدل أداء ذلك المحرك من خلال إحداث عيب أسطواني مصطنع، قطره 1.5mm وعمقه 0.4mm، على مسار المدرج الخارجي لآحد رولماناته، وحُصِلت الأمواج الصوتية الناتجة عن تشغيله عند نفس السرعة من جديد، علماً بأن الترددات المميزة للعطل المفتعل وتوافقياته الأساسية، محددة بمرجعية المعلومات المرجعية المدرجة بالفقرة (3)، مساوية لـ 87.6 و 175.2 و 262.8 و 350.4. ولتحديد خوارزمية التحويل الأنسب إلى المجال الطيفي، حُوِلت المعطيات المسجلة للمحرك M1 قبل وبعد التعديل إلى المجال الطيفي باستخدام الخوارزميات FSD و FMT و Wavelet وعُرِضت النتائج المستخلصة ككثافة طيف طاقي (Power Spectral Density (PSD)، وتبين الأشكال (5) و (6) و (7) ما تم الحصول عليه، أخذين بعين الاعتبار أن عمليات التحويل

¹ باستخدام اللاقط الصوتي وبطاقة التحصيل التي وصلت مع الحاسب المستخدم، ما سمح بتحصيل البيانات الصوتية من خلال ترميز برمجيات Matlab، وما سمح بتحويل تلك البيانات لصيغة يمكن قراءتها ومعالجتها بالبرمجية Autosignal.

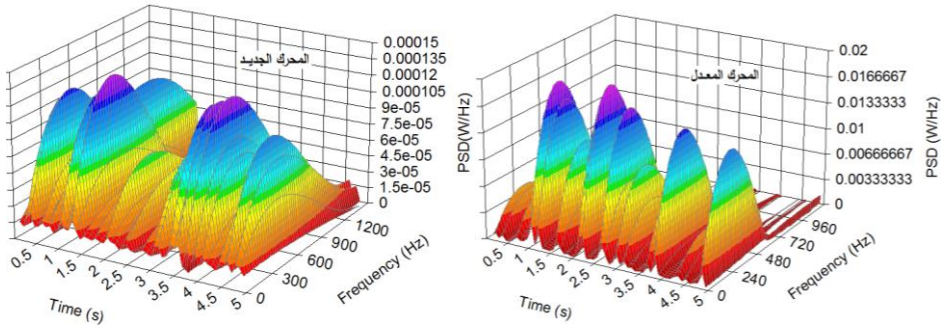
نفذت بالبرمجية Autosignal²، وأنه تم الاكتفاء بعرض النتائج المرتبطة بترددات لا تزيد عن 400 Hz، ذلك أن الترددات المميزة لأعطال الرولمانات لا تزيد عن تلك القيمة.



الشكل (5): منحنى الاستجابة الترددية للأمواج صوتية خاصة بالمحرك M1 قبل وبعد التعديل، مستنتجة باستخدام تحويل الـFSD



الشكل (6): منحنى الاستجابة الترددية للأمواج صوتية خاصة بالمحرك M1 قبل وبعد التعديل، مستنتجة باستخدام تحويل الـFMT



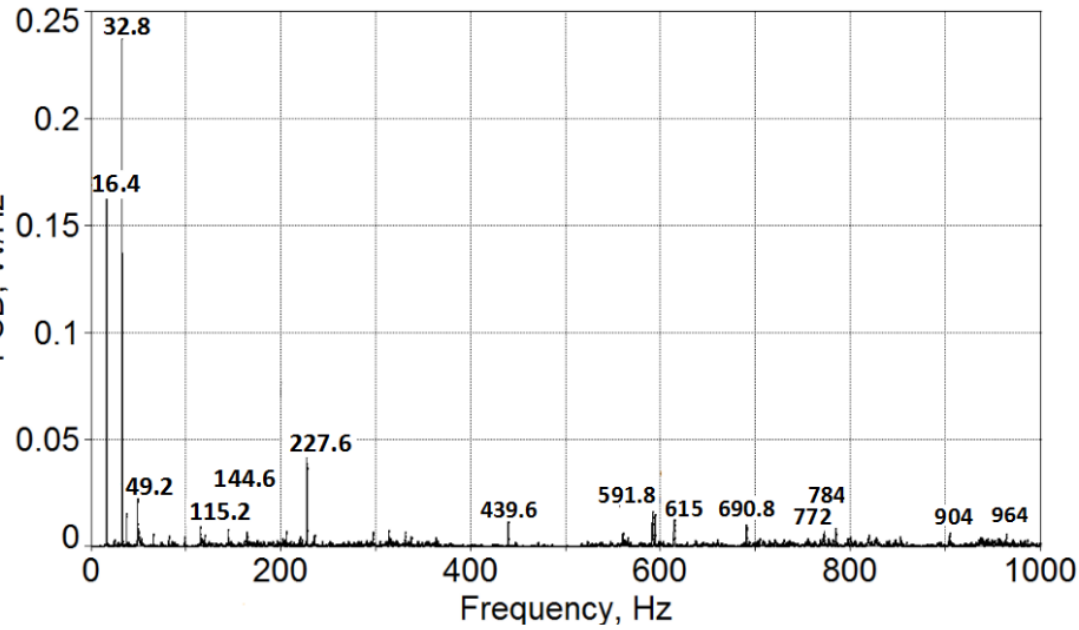
² التي تتيح إمكانية تنفيذ المعالجات المستهدفة دون الحاجة لوضع أي ترميز برمجي.

الشكل (7): منحنى الاستجابة الترددية لموج صوتية خاصة بالمحرك M1 قبل وبعد التعديل، مستنتجة باستخدام تحويل Wavelet

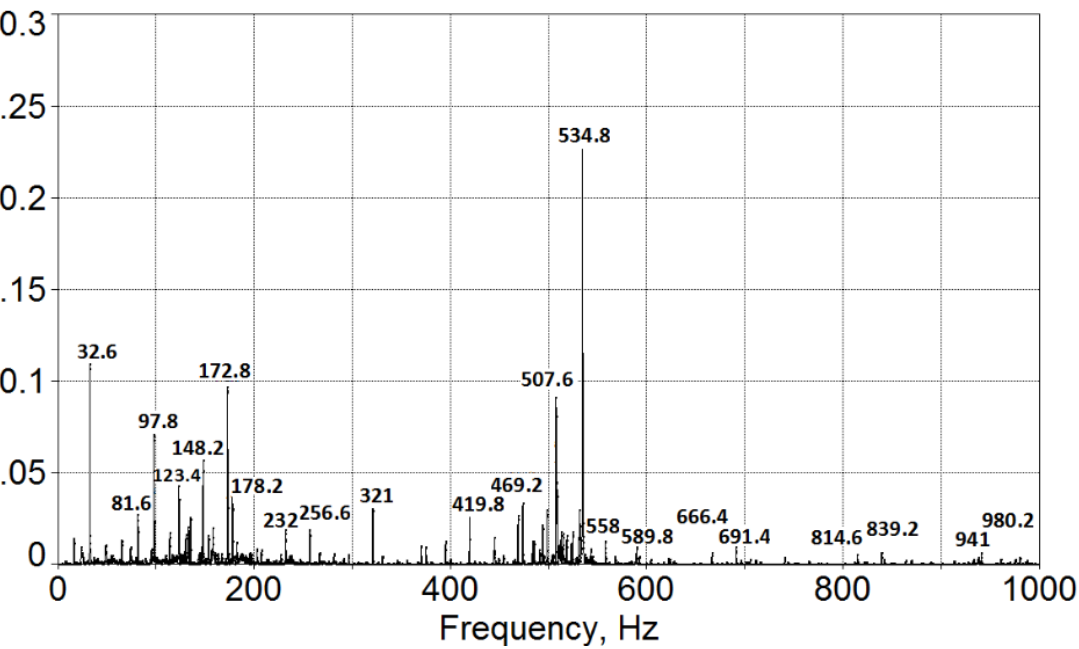
2.6 استعمال خوارزمية التحويل الأنسب للتنبؤ بأعطال المحركين M2 و M3:

ضمن سياق السعي للتنبؤ بأعطال المحركين M2 و M3، ذات الأوضاع الفنية غير المعروفة، والتي لم يسبق أن أُخضعت لبرنامج صيانة تنبؤية، عُمِلَ بمرجعية تسلسل مختلف قليلاً عن ما هو مدرج بالشكل (2)، حيث حُصِّلت نماذج من الأصوات الناتجة عن المحركين بوضعهما الفني القائم وهما مشغلين عند سرعات دوران مساوية لـ 1470 RPM، ثم حُوِّلت النماذج المُحصَّلة من الصيغة التماثلية إلى الصيغة الرقمية ومن ستيريو إلى أحادي وبعد ذلك مُرِّرت البيانات الناتجة على فلتر خاص بتخليصها من الضجيج، ومن ثم حُوِّلت إلى المجال الطيفي باستخدام خوارزمية الـ FMT³، (الخوارزمية الأنسب من حيث احتواء نتائجها على المعطيات اللازمة للتنبؤ بأعطال المحركات الكهربائية بنجاح، وفقاً لما أكدته النقاشات المدرجة بالفقرة السابقة من هذا البحث)، حيث عُرضت النتائج المستخلصة ككثافة طيف طاقي، وتبين الأشكال (8) و (9) ما تم الحصول عليه، أُخذين بعين الاعتبار الاكتفاء بعرض النتائج المرتبطة بترددات لا تزيد عن 1000 Hz، ذلك أن الترددات المميزة للأعطال الجاري تحديدها لا تزيد عن تلك القيمة، وفقاً لما تُوَكِّده المعطيات المدرجة بالجدول (1)، والتي حُسِبَت بمرجعية المعادلات والملاحظات الدليلية المدرجة بالفقرة (3) من هذه الورقة.

³ باستخدام التعليمات المعنية ببرنامج Autosignal.



الشكل (8): منحنى الاستجابة الترددية لنموذج أمواج صوتية خاصة بالمحرك M2، مستنتجة باستخدام تحويل FMT



الشكل (9): منحنى الاستجابة الترددية لنموذج أمواج صوتية خاصة بالمحرك M3، مستنتجة باستخدام تحويل FMT

7. مناقشة النتائج:

1.7 مناقشة النتائج الخاصة بتحديد الخوارزمية الأنسب:

وفقاً لما ذكر أعلاه فمعيار تحديد الخوارزمية الأنسب قائم على تقييم مدى احتواء نتائج التحويل بتلك الخوارزمية على مطالات أعظمية منفصلة عند ترددات إفرادية موافقة للأعطال القائمة. وبمرجعية ذلك المعيار يمكن تحديد خوارزمية التحويل الأنسب من بين الخوارزميات الثلاث المستعملة في البحث الحالي وذلك من خلال الرجوع للنتائج المدرجة بالأشكال (5) و (6) و (7)، والتي تؤكد على ما يلي:

أ. تؤكد منحنيات الاستجابة الترددية العائدة للمحرك غير المعدل، والمستنتجة باستخدام الخوارزميتين FSD و FMT، على أن سرعة الدوران الفعلية للمحرك تتراوح بين 1470 و 1476 RPM، وهو ما أستنتج من قيم التردد 24.51 و 24.6Hz الموافقين للمطالين الأعظميين الظاهرين في بداية المنحنيين المدرجين بالشكلين (5) و (6).

ب. منحنى الاستجابة المدرجين بالشكل (5)، والعائدين للمحرك M1 قبل وبعد التعديل، والمستنتجين باستعمال خوارزمية الـ FSD، مختلفين من حيث توزع مطالاتهما الأعظمية على المجال الترددي المأخوذ بالاعتبار، ومن حيث محتواهما الطاقى، حيث أن المحتوى الطاقى الخاص بالمحرك المعدل يزيد بحوالي 86 ضعف عن ذلك الخاص بالمحرك قبل التعديل، ما يشير إلى تراجع الحالة الفنية للمحرك M1 بنتيجة التعديل. وبالتالي فالتحويل بخوارزمية FSD أتاح إمكانية التنبؤ بتغير الحالة الفنية باتجاه الأسوأ، ولكنه لم يسمح بالتنبؤ بطبيعة العطل المفتعل الذي سبب ذلك التغير بمرجعية المعيار الذي أعتد بهذا البحث، ذلك لأن نتائجه لا تحتوي على مطالات أعظمية منفصلة عند الترددات الإفرادية المميزة للعطل المفتعل بالرولمان.

الجدول (1): قيم الترددات المميزة لأعطال نموذج المحركات المستعملة

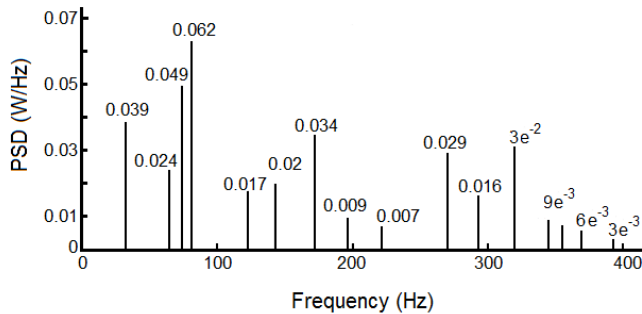
الترددات المميزة للأعطال (Hz)، محددة بمرجعية المعلومات المرجعية المدرجة بالفقرة (3)				أنواع الأعطال	
ملاحظات	التوافقيات الجانبية	التوافقيات الأساسية	التردد المحسوب		
التوافقيات الأساسية متخادمة المطالات	لا يوجد	262.8 و 175.2 و 350.4	87.6	المدرج الخارجي	أعطال الرولمانات
التوافقيات الأساسية متخادمة المطالات	±25 of 131.24 ±25 of	262.48 و 393.7	131.24	المدرج الداخلي	
التوافقيات الأساسية متخادمة المطالات	لا يوجد	40 و 30 و 20	10	القفص	
التوافقيات الأساسية متخادمة المطالات	±9.9 of 57.7 ±9.9 of 115.8	173.7 و 115.8	57.9	الدحارج	
-	لا يوجد	50 و 62.5 و 75 وهكذا حتى 250		داخل الرولمان	أعطال الارتخاء
المطال الأعظمي عند التردد 75 Hz	لا يوجد	25 و 50 و 75 و ... هكذا		بين الرولمان والمحور	
مطالين أعظميين عند التردد 25 و 100 Hz	لا يوجد	25 و 50 و 75 و ... هكذا		بين الرولمان والحاضن	
-	لا يوجد	لا يوجد	100	عطل الثابت	الأعطال الكهربائية
-	لا يوجد	لا يوجد	10	عطل عدم التمرکز	
	25 ±41.6	لا يوجد	25		
	100 ±41.6 100 ±83.2	لا يوجد	100		
-	850 ±100 850 ±200	لا يوجد	850	عطل تكسر القضبان	

ت. منحني الاستجابة المدرجين بالشكل (6)، والعائدين للمحرك M1 قبل وبعد التعديل، والمستنتجين باستعمال خوارزمية FMT، مختلفين من حيث توزع مطالتهما الأعظمية على المجال الترددي المأخوذ بالاعتبار، ومن حيث محتوَاهما الطاقوي، حيث أن المحتوى الطاقوي الخاص بالمحرك المعدل يزيد بحوالي 86 ضعف عن ذلك الخاص بالمحرك قبل التعديل، ما يشير إلى تراجع الحالة الفنية للمحرك M1 بنتيجة التعديل. ولبيان إمكانية التنبؤ بالعتل المفتعل من خلال التغيرات الحاصلة على المطالات الأعظمية قبل وبعد التعديل لا بد من طرح منحنى الاستجابة الترددية الخاص بالمحرك غير المعدل من المنحنى المكافئ العائد للمحرك المعدل، ويبين الشكل (10) المنحنى الناتج عن ذلك، أما المطالات الأعظمية الظاهرة بذلك المنحنى وتردداتها الموافقة فمدرجة بالجدول (2). وبمقارنة قيمة التردد المميز لعتل المدرج الخارجي للرولمان وتوافقياته الأساسية، أي الترددات 87.6 و175.2 و262.8 و350.4، وفقاً لما هو مبين بالجدول (1)، مع القيم الأقرب لها من تلك المدرجة بالجدول (2)، أي مع الترددات 81.6 و172.24 و271 و355.6، وبملاحظة أن التقارب القائم بينهما وبأن المطالات الموافقة للأخيرة متخامدة، وفقاً لما تؤكد المعطيات المدرجة بالجدول (2)، يمكن أن نؤكد على أن التحويل بخوارزمية FMT مكن من التنبؤ بالعتل المفتعل بالرولمان من جهة، ولكنه أكد على أن الظواهر الترددية المميزة لعتل المدرج الخارجي اعقد بكثير مما تحدده المراجع النظرية، ذلك أن:

- المطالات الأعظمية المتولدة نتيجة العتل المفتعل لا تقتصر فقط على تلك المحددة بالمراجع، بل تتعدى ذلك بكثير، حيث تظهر مطالات أعظمية كثيرة عند ترددات أخرى، وهذا راجع للاستجابات الترددية التي تبديها باقي عناصر المحرك عند انتشار وارتداد وتداخل أمواج الاهتزاز الناتجة عن الصدم العالي المتولد عن عتل الرولمان.

- قيم الترددات الحقيقية الموافقة للمطالات الأعظمية المميزة لعطل الرولمان لا يمكن أن تتطابق مع مكافئاتها النظرية لنفس السبب المذكور أعلاه، وهذا ما تؤكدته العديد من المراجع المختصة [7,17,20].
- المراجع التي قدمت نتائج تثبت تطابق الترددات الموافقة للمطالات الاعظمية المأخوذة من منحنيات الاستجابة الترددية مع الترددات النظرية المميزة للأعطال قامت على تجارب غير واقعية من حيث تنفيذها على تجهيزات اختبار بسيطة وبصورة لا تعكس السلوك الديناميكي الفعلي للتجهيزات الحقيقية [18].

ث. منحنيي الاستجابة المدرجين بالشكل (7)، والعائدين للمحرك M1 قبل وبعد التعديل، والمستنتجين باستعمال خوارزمية الـ Wavelet، مختلفين بشكل كبير من حيث محتواهما الطاقوي، وقيمة المطال الأعظمي العائدة للمحرك المعدل تزيد بحوالي 235 ضعف عن القيمة المكافئة الخاصة بالمحرك قبل التعديل، ما يشير إلى تراجع الحالة الفنية للمحرك M1 بنتيجة التعديل. وبالتالي فالتحويل بخوارزمية Wavelet أتاح إمكانية التنبؤ بتغير الحالة الفنية باتجاه الأسوأ، ولكنه لم يسمح بالتنبؤ بطبيعة العطل المفتعل بمرجعية المعيار الذي أُعتمد بهذا البحث، ذلك لأن نتائجه لا تحتوي على مطالات أعظمية منفصلة عند الترددات الإفرادية المميزة للعطل المفتعل بالرولمان، علماً بأنه استُعمل لتحديد الأعطال بنجاح بالعديد من الأبحاث التي قامت على معايير مختلفة عن ذلك المعتمد بالبحث الحالي.



الشكل (10): المنحني الناتج عن طرح منحني الاستجابة العائد للمحرك غير المعدل من المنحني المكافئ العائد للمحرك المعدل

الجدول (2): المطالات الأعظمية الناتجة عن تعديل المحرك وتردداتها الموافقة

لها

الترددات الموافقة Hz	المطالات W/Hz	الرقم	الترددات الموافقة Hz	المطالات ⁴ W/Hz	الرقم
197	9.5×10^{-3}	8	32.4	3.9×10^{-2}	1
222	7.3×10^{-3}	9	65.2	2.4×10^{-2}	2
271	3×10^{-2}	10	74	4.9×10^{-2}	3
293.6	9.1×10^{-2}	11	81.6	6.3×10^{-2}	4
320.2	3.1×10^{-2}	12	123	1.7×10^{-2}	5
355.6	7.2×10^{-3}	13	142.8	2×10^{-2}	6
369.6	5.9×10^{-3}	14	172.4	3.5×10^{-2}	7

2.7 مناقشة نتائج التنبؤ بأعطال المحركين M2 و M3:

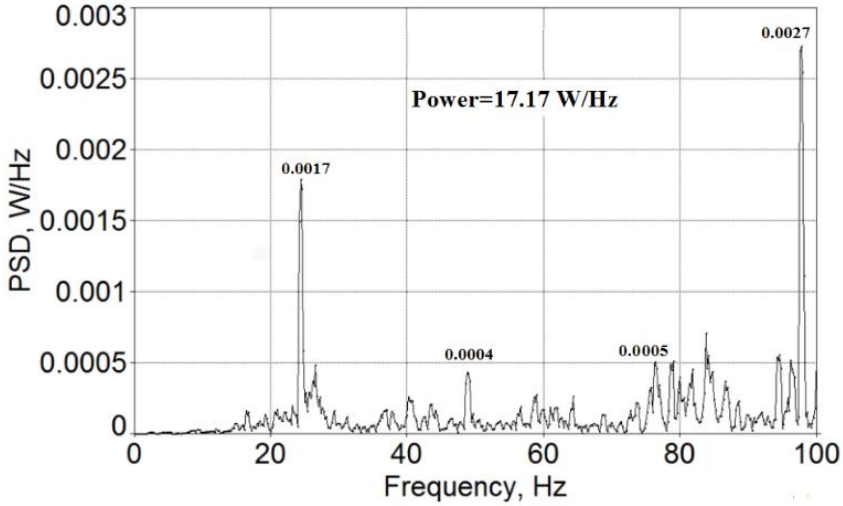
حيث أن كثافة المركبات الترددية المكوّنة للمنحنيين المدرجين بالشكلين (8) و (9) لا تسمح بالتنبؤ المباشر بأعطال المحركين M2 و M3 ظهرت الحاجة لتجزئة المجال الترددي الكلي الخاص بكلاً منهما إلى مجالات ترددية جزئية، وبحيث يُبحث ضمن كل منها عن المركبات الترددية النظرية المميزة لعيب منفرد ومحدد، وفقاً لما عمل عليه بالبحث [19]. وضمن ذلك السياق عُمِلَ على مجالات ترددية متعددة ما مكن من التنبؤ بالعيوب التالية التي حُدِدَت بمرجعية الترددات المميزة المعنية بها، والتوافقيات الأساسية الموافقة لها، وفقاً لما تؤكدُه النتائج المدرجة بالشكلين (11) و (12):

1. عطل الجزء الثابت بالمحرك M2، ذلك أن منحني الاستجابة الجزئي المعني الخاص بذلك المحرك، وفقاً لما هو مبين بالشكل (11)، يُظهر مطال أعظمي قيمته 0.0017 عند تردد قيمته مساوية لـ 1RPM، وتوافقيه أساسية مطالها 0.0004 عند تردد قيمته مساوية لـ 2RPM، كما يظهر أيضاً مطال أعظمي

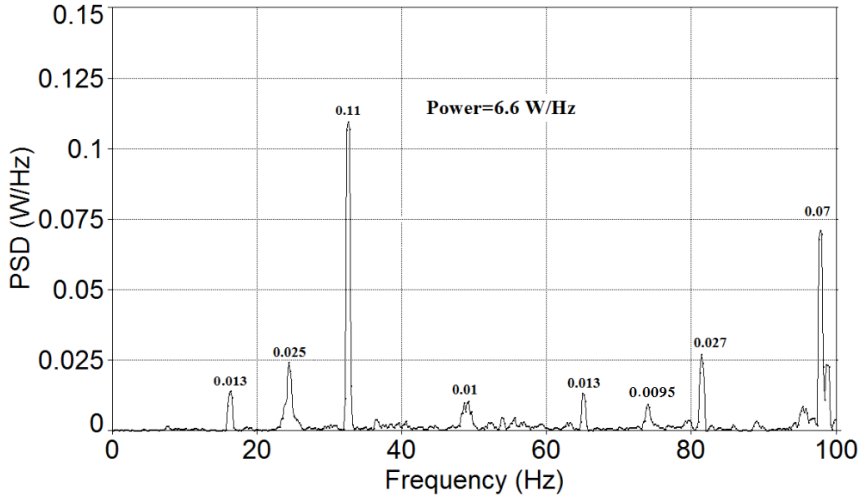
⁴مسلسلة من التردد الأقل إلى التردد الأعلى.

قيمته 0.0027 عند تردد قيمته مساوية لـ 2FL، وهذا ما يتطابق مع السمات المميزة لهذا النوع من الأعطال، وفقاً لما يؤكدده الشكل (4/a).

2. خلوص زائد بين الرولمان وحاضنه الخارجي بالمحرك M3، ذلك أن منحنى الاستجابة الجزئي المعني الخاص بذلك المحرك، وفقاً لما هو مبين بالشكل (12)، يُظهر مطال أعظمي قيمته 0.025 عند تردد قيمته مساوية لـ 1RPM، وتوافقية أساسية أولى مطالها 0.01 عند تردد قيمته مساوية لـ 2RPM، وثانية مطالها 0.0095 عند تردد قيمته مساوية لـ 3RPM، وثالثة مطالها 0.07 عند تردد قيمته مساوية لـ 4RPM، ويؤكد على أن المطالين الأعلىين بين المطالات الأربعة الملحوظة موافقين لترددات مساوية لـ 1RPM و 4RPM، وهذا ما يتطابق مع السمات المميزة لهذا النوع من الأعطال، وفقاً لما ذكر بالفقر (3) من هذه الورقة.



الشكل (11): منحنى الاستجابة الترددية الجزئي للأمواج صوتية خاصة بالمحرك M2، مستنتجة باستخدام تحويل FMT



الشكل (12): منحنى الاستجابة الترددية الجزئي لأمواف صوتية خاصة بالمحرك M3، مستنتجة باستخدام تحويل FMT

8. الخلاصة:

ضمن سياق البحث الحالي تم العمل بمرجعية تقانة صيانة تنبؤية قائمة على تسجيل نماذج من الأمواف الصوتية الصادرة عن الآلات، ومن ثم تحويل بيانات تلك الأمواف من المجال الزمني إلى المجال الترددي، وبحيث تقارن ترددات المطالات الأعظمية العائدة لمنحنيات الاستجابة الترددية الناتجة عن التحويل مع الترددات المرجعية المميزة لكافة الأعطال المحتملة، وبحيث تشير التطابقات المسجلة بالترددات لحالات تعطل محددة تماماً. المشكلة التي واجهت التطبيق الفعلي للتقانة المعمول بمرجعيتها تمثلت بعدم ملاحظة مطالات أعظمية منفردة وواضحة بمنحنيات الاستجابة الترددية المستنتجة من خلال التحويل ببعض خوارزميات التحويل شائعة الاستخدام، وبالتالي انعدام إمكانية التنبؤ بالأعطال. ولتجاوز هذه المشكلة عملاً لبحث الحالي على تطوير نهج قائمة على تجريب خوارزميات تحويل متعددة، وبحيث يتم التعامل مع الخوارزمية القادرة على إعطاء نتائج إيجابية من حيث القدرة على التنبؤ بالأعطال على أنها الأنسب لتنفيذ التحويل إلى المجال الترددي. وضمن ذلك السياق تم تجريب ثلاثة خوارزميات تحويل حيث تبين أن خوارزمية فوريبه متعددة التناقص Fourier Multi-Taper هي الأنسب، ذلك أن منحنيات

الاستجابة الترددية التي استنتجت باستخدامها مكنّت من التنبؤ بعطل مفتعل برولمان محرك كهربائي تحريضي. وللتأكد من القدرة على التنبؤ بأعطال محركات كهربائية تحريضية مجهولة الحالة الفنية، تم تطبيق النهج المقدم على نماذج أمواج صوتية عائدة لمحركين مجهولي الحالة الفنية، حيث تحققت إمكانية التنبؤ بالعديد من أعطالهما. وحيث أن تحويل فورييه متعددة التناقص لم يدرج ضمن أي نهج صيانة تنبؤية معروف، وفق ما أتيج للباحثين الاطلاع عليه، فيمكن القول بأن إدراجه ضمن النهج المقدم بهذا البحث يمثل مساهمة معرفية أصيلة بمجال الصيانة التنبؤية.

9. المراجع:

- [1] Hongxia Wang, Xiaohui Ye and Ming Yin, (2016), **Study on Predictive Maintenance Strategy**, International Journal of u- and e-Service, Science and Technology, Vol.9, No. 4, pp.295-300.
- [2] Chukwuekwe Douglas Okafor, (2016), **Condition Monitoring for Predictive Maintenance; a Tool for Systems Prognosis Within the Industrial Internet Application**, Master Thesis, Department of Production and Quality Engineering, Norwegian University of Science and Technology.
- [3] Syed Tafazzul Mahmood, (2011), **Use of Vibration Analysis Technique in Condition Based Maintenance**, Master Thesis, Department of Production Engineering, School of Industrial Engineering and Management, Royal Institute of Technology, Sweden.
- [4] Aleks Seppanen, (2016), **Utilizing Acoustic Measurements in Equipment Condition Monitoring**, Master Thesis, School of Science, Aalto University.
- [5] P. Henriquez, J. B. Alonso, M. A. Ferrer, C. M. Travieso and G. Gomez, (2012), **Fault Diagnosis using Audio and Vibration Signals in a Circulating Pump**, 25th International Congress on Condition Monitoring and Diagnostic Engineering.
- [6] Teemu Tossavainen, (2015), **Sound Based Fault Detection System; General Method for Fault Detection**, Master's Thesis, School of Science, Aalto University.
- [7] Json Maisy, **Spectrum Analysis the key Features of Analyzing Spectra**, SKF, Condition Monitoring Center, San Diego, California, 92123 USA

- [8]Kin Ming Kam,(2014),**Stationary and Nonstationary Time Series Prediction Using State Space Model and Pattern-Based Approach**, University of Texas at Arlington.
- [9]M. Oman, K. Krishnamoorthi,(2015),**Bearing Fault Detection with the Use of Acoustic Signals Recorded by a Hand-Held Mobile Phone**.
- [10]F. Hemmati, et al,(2016),**Roller Bearing Acoustic Signature Extraction by Wavelet Packet Transform, Application in Fault Detection and Size Estimation**, Applied Acoustic, Vol. 104, pp.101-118.
- [11]علي محمد عبد الشاهد، زبيدة سليم المنتصر، إبراهيم احمد بادي، (2019)،**التحويل المويجي المستمر في الكشف الآلي عن الأعطال**، جامعة مصراتة.
- [12]A. Glowacz and Z. Glowacz, (2017),**Recognition of Rotor Damage in a DC Motor Using Acoustic Signals**, Technical Science, Vol. 65, No. 2.
- [13]Pramod Sharma andNeelamSaraswat, (2015),**Diagnosis of Motor Fault Using Sound Signature Analysis**,International Journal of Innovative Research in Electrical,Electronics,Instrumentation and Control Engineering, Vol. 3, Issue 5.
- [14]Adam Glowacs,(2018),**Acoustic Based Fault Diagnosis of Three-Phase Induction Motor**, Applied Acoustic, Vol.137.
- [15]باسل محمد سعيد ، زبيدة سليم المنتصر، ياسر محمد يونس، محمد حامد سعود، (2011)،**كشف عطب تكسر قضبان الجزء الدوار للمحرك الحثي ثلاثي الطور**، جامعة الموصل.
- [16] AzadehMoghtaderi, (2009),**Multitaper Methods for Time-Frequency Spectrum Estimation and Unaliasing of Harmonic Frequencies**, Queen's University, Kingston, Ontario, Canada.
- [17] MilindNatu, (2013), **Bearing Fault Analysis Using Frequency Analysis andWavelet Analysis**, International Journal of Innovation, Management and Technology, Vol. 4, No. 1.
- [18] M. Saimurugan, R. Nithesh, (2016), **Intelligent Fault Diagnosis Model for Rotating Machinery Based on Fusion of Sound**

Signals, International Journal of Prognostics and Health Management, Vol. 018, ISSN 2153-2648.

[19] Galal A. Hassaan, (2014), **Frequency Spectrum Filtering for Machinery Fault Diagnostics**, International Journal of Scientific & Technology Research, Vol. 3, Issue 8.

[20] Vishal Jain, PravinSingru, (2015), **Development of Predictive Model for Vibro-acoustic Condition Monitoring of Lathe**, JVE International LTD Journal of vibroengineering, Volume 17, Issue 1, ISSN1392-8716

نحو مزيدٍ من تخفيض زمن الخوارزمية Stable Matching Algorithm للجدولة المتعددة النوى المتباينة

طالب الدراسات العليا: م. أبي سلوم كلية الهندسة المعلوماتية - جامعة دمشق
الدكتور المشرف: د.م. نزار الحافظ

1- ملخص

في البنى المتعددة النوى المتباينة والمتماثلة توجد مجموعة من خوارزميات الجدولة. من بين تلك الخوارزميات (SMA) Stable Matching Algorithm خوارزمية المطابقة المستقرة التي تُستخدم في البنى المتعددة النوى المتباينة وتعتمد على تصنيف المهام والنوى وفق قائمة أولويات [1].

في بحث سابق [11] قمنا بتحليل الأداء الزمني لخوارزمية SMA من حيث زمن تنفيذ المهام، وبيّنا أن استخدام SMA يحقق توفيراً زمنياً (بنسبة 74%) في بعض الحالات وزيادة في زمن التنفيذ (61%) في حالات أخرى.

نقدم في هذا البحث مساهمةً جديدةً تتمثل بتحقيق مزيد من التوفير في زمن التنفيذ بتعديل خوارزمية SMA. فقد أجرينا أربعة تعديلات على الطريقة التي تعتمد عليها الخوارزمية في إسناد المهام على النوى. أظهرت نتائج المحاكاة انخفاض زمن التنفيذ انخفاضاً هاماً في بعض الحالات، بنسبة 206%. نفذنا التجارب باستخدام المحاكاة sniper [10] لبيان متعدد النوى (متماثلة أو متباينة) مع تغيير ترددات عمل هذه النوى. وفي كل تجربة أجريناها، قارنّا بين النتائج الزمنية لكل من التعديلات الأربعة وأزمان التنفيذ في حالة الجدولة من دون اعتماد SMA وحالة الجدولة باعتماد SMA. وأتاحت هذه النتائج استنتاج خوارزميتين معدلتين من SMA تعطيان أفضل أداء زمني.

كلمات مفتاحية: خوارزمية SMA، المحاكاة Sniper، نوى متماثلة (homogeneous cores)، نوى متباينة (heterogeneous cores)، خوارزمية PSO، خوارزمية SFLA، خوارزمية LTF، خوارزمية DSR.

A further reduction in the time of the Stable Matching Algorithm in a heterogeneous multi-core architecture

1- Abstract

In heterogeneous and homogeneous multi-core architectures there is a set of scheduling algorithms. One such algorithm is the Stable Matching Algorithm (SMA), which is used in heterogeneous multi-core architectures and is based on the classification of tasks and cores according to a list of priorities[1].

In a previous paper [11], we analyzed the time performance of the SMA algorithm in terms of task execution time, and showed that using SMA achieves time savings (74%) in some cases and an increase in execution time (61%) in other cases.

In this paper, we present a new contribution, which is to achieve more savings in execution time by modifying the SMA algorithm. We've made four updates to the way that the algorithm depends on to assign tasks to cores. The simulation results showed a significant decrease in the execution time in some cases, by 206%. We carried out the experiments using the sniper simulator [10] of multi-core architecture (heterogeneous and homogeneous) with changing the working frequencies of these cores. In each experiment we conducted, we compared between the execution time of each of the four updates and the execution times of the case that we do not use SMA and of the case that we use SMA to schedule task. These results made it possible to deduce two modified algorithms of SMA algorithm those give the best timing performance.

Keywords: SMA algorithm, sniper simulator, homogeneous cores, heterogeneous cores, PSO algorithm, SFLA algorithm, LTF algorithm, DSR algorithm.

2- مقدمة

إن معظم المعالجات المتعددة النوى الموجودة هي أنظمة ذات نوى متماثلة (homogeneous cores)، وهذا يؤدي إلى وجود نقطة سلبية تتمثل في ضعف أداء هذه المعالجات عند استخدام التطبيقات المعقدة ذات مسلك التنفيذ الوحيد [1]. في المقابل، يتحسن الأداء باستعمال النوى ذات الحجم الكبير، لأن زيادة حجم النواة يمكن من تنفيذ مسالك أكثر في الوقت نفسه حتى لو كانت تلك المسالك ذات أولويات مختلفة. وهي أيضاً تقلل عدد مرات مقاطعة مسالك التنفيذ ذات الأولويات المنخفضة حتى عند وجود مسالك تنفيذ ذات أولويات أعلى منها [11]. وتبين مقارنة أجريت بين المعالجات المتعددة النوى المتماثلة والمعالجات المتعددة النوى المتباينة أن الأنظمة المتباينة النوى تتفوق في الأداء على الأنظمة المتماثلة النوى بمقدار 63% ([7]). لذلك تميل الأبحاث لاتجاه نحو استخدام المعالجات المتعددة النوى غير المتماثلة التي تدمج أنواع مختلفة من النوى في شريحة واحدة [11]، وهذا النوع من البنيان يؤدي إلى تحسين كبير في الأداء بتحقيق توازن حمل عمل بين النوى، وتخفيض تردد (frequency) المعالج لتخفيض استهلاك الطاقة (power).

توجد مجموعة من خوارزميات الجدولة للأنظمة المتباينة والأنظمة المتماثلة، وتبين نتائج الدراسات [2],[5],[6],[7],[8] أن لهذه الخوارزميات نقاط سلبية ونقاط إيجابية. فمثلاً معظم خوارزميات الجدولة على المعالجات المتعددة النوى المتباينة لا تهتم بمعدل استهلاك الطاقة، وبعضها يهتم بجدولة مهام زمن حقيقي فقط، وبعضها الآخر يهتم بجدولة مهام عادية لا تعمل في الزمن الحقيقي.

من ناحية أخرى، يتيح استعمال بعض خوارزميات الجدولة في المعالجات المتعددة النوى المتماثلة، مثل خوارزمية Dynamic Slack Reclamation (DSR) "استرداد الركود ديناميكياً" وخوارزمية Largest Task First (LTF) "المهمة الأكبر أولاً" [9] تحقيق توفير كبير في الطاقة مقارنة بباقي خوارزميات جدولة المهام في المعالجات المتعددة النوى المتماثلة.

تُستعمل خوارزمية SMA لجدولة المسالك في الأنظمة ذات النوى المتباينة. وسنقدم في هذا البحث تحليلاً لسلبية هذه الخوارزمية، ثم نعطي حلاً للتخلص من هذه السلبية. نفذنا تجاربنا باستعمال المحاكى Sniper على بنيان X86 متعدد النوى. يتيح Sniper إجراء محاكاة على النوى المتماثلة أو المتباينة على حد سواء، بخلاف محاكيات أخرى تعمل على أنظمة نوى متماثلة فقط. أيضاً يسمح Sniper بالمحاكاة على عشرات أو مئات النوى للتطبيقات ذات الذاكرة المشتركة، سواء للتطبيقات المتعددة المسالك أو التطبيقات ذات حمل العمل المختلف. وهو أسرع من باقي المحاكيات الموجودة [10]. ويولد Sniper مخططاً بيانياً يظهر عدد الدورات الحسابية المستهلكة في مكونات النظام المختلفة وفق فواصل زمنية محددة، وهذا يؤدي إلى فهم أفضل لتأثير هذه المكونات في أداء النظام ككل.

3- أعمال ذات صلة

من بين مجموعة خوارزميات الجدولة في المعالجات المتعددة النوى التي درسها الباحثون باهتمام كبير خوارزمية (SMA) Stable Matching Algorithm [1]، وخوارزمية [5] Particle Swarm Optimization Algorithm (PSO)، والخوارزمية الجينية (GA) genetic algorithm، وغيرها.

تقوم خوارزمية SMA على تحسين الانتقاء الديناميكي لنوى المعالج المتباينة (heterogeneous) باستخدام جدول، وذلك بغرض تحسين الأداء وتقليل استهلاك طاقة النوى.

وتقوم خوارزمية PSO بتخفيض كل من الطاقة المستهلكة وزمن أفضل جدولة لمهام الزمن الحقيقي في حالة وحدات المعالجة المتباينة. وتبين نتائج التجارب أن خوارزمية PSO توفر طاقة بمقدار 40% إلى 50% مقارنة بـ Shuffled Frog (SFLA) Leaping Algorithm (خوارزمية قفزات الضفدع المخلوطة).

تُستعمل الخوارزمية الجينية [6] لجدولة التنفيذ المتوازي على المعالجات المتعددة النوى المتباينة (heterogenous)، وتحقق كفاءة في استخدام النوى وفي تقليل زمن التنفيذ. أيضا تُستعمل خوارزمية probability based scheduling (PbS) (الجدولة الاحتمالية) [7] لجدولة مهام الزمن الحقيقي غير الدورية في الأنظمة المتعددة المعالجات المتماثلة، وتمتاز بانها تقلل عدد المعالجات المستخدمة، وترفع كفاءة استخدام المعالجات وتخفض الطاقة المستهلكة.

لخوارزمية Parallel Hierarchical Hungarian Algorithm (الجدولة الهرمية المتوازية الهنغارية) [8] ميزة قابلية التدرج، إذ تعمل على المعالجات التي تدعم تقنية التدرج الديناميكي للفولطية والتردد (dynamic voltage and frequency scaling) (DVFS). تُستعمل هذه الخوارزمية لجدولة مسالك التنفيذ على المعالجات المتعددة النوى المتباينة. وتبين التجارب أن هذه الخوارزمية أسرع في جدولة مسالك التنفيذ بمقدار 150 مرة من خوارزمية الجدولة الهنغارية غير المتوازية.

أخيرا تخفّض خوارزمية Dynamic Slack Reclamation(DSR) "استرداد الركود ديناميكيا" استهلاك الطاقة في المعالجات المتعددة النوى المتماثلة (homogeneous). وعند استعمالها مع خوارزمية Largest Task First(LTF) "المهمة الأكبر أولا" [9] يمكنها تحقيق أفضل توزيع لمهام الزمن الحقيقي على النوى وتخفيض استهلاك الطاقة بمقدار 60% إلى 90% مقارنة باستخدام أي من الخوارزميتين LTF, DSR على حدى.

4- خوارزمية المطابقة المستقرة (SMA) Stable Matching Algorithm

تُستعمل خوارزمية SMA لتوزيع المهام المتباينة الأحمال على النوى المتباينة (heterogeneous). في هذه الطريقة تمتلك كل من مجموعة المهام ومجموعة النوى قائمة أولويات خاصة بها. ويقوم الجدول وفق SMA باستقصاء أولويات وتوفر النوى، وذلك لاختيار أفضل زوج (مهمة - نواة) قبل إسناد مهمة على نواة معينة. يبيّن الشكل 1 خطوات الخوارزمية.

Stable Matching Algorithm(SMA) [1]:

- 1: Input: priority lists of tasks and cores
- 2: Initialize each core to be free.
- 3: while (some core is free and hasn't assigned to every task)
 {
- 4: Choose such a core c
- 5: $t =$ 1st core on c 's list to whom c has not yet assigned
- 6: if (t is not assigned)
- 7: choose c and t to be assigned
- 8: else if (t prefers c to its assigned task c' and c' is free)
- 9: choose c and t to be assigned, and c' to be free
- 10: else
- 11: t rejects c
- }
- 12: Output: stable tasks to cores mapping

الشكل 1. خوارزمية SMA.

تأخذ الخوارزمية قائمة الأولويات كدخل في الخطوة 1. وفي الخطوة 2 تقوم الخوارزمية بإخلاء كل النوى من أجل إسناد الأعمال وفقا لأولوياتها. تستمر حلقة while في الخطوة 3 حتى يكتمل الربط بين كل المهام والنوى. وفي الخطوة 4 يجري اختيار نواة، وفي الخطوة 5 تُجلب مهمة لتنفيذ على تلك النواة. في الخطوات 6، 8، 10 لدينا اختبار شرطي. إذا كانت نتيجة اختبار الشرط هي true (الخطوة 6)، والشرط هو أن المهمة لم تُسند إلى نواة أخرى، فإنه يجري إسناد المهمة t إلى النواة المختارة في الخطوة 7، وإذا وجدت المهمة نواة أخرى c أفضل من النواة c' ، فيجري إسناد المهمة t إلى النواة c

وإخلاء النواة c' (الخطوة 9). وإذا لم تتوافق أولويات المهمة مع النواة فإن المهمة سوف ترفض الإسناد إلى النواة (الخطوة 11).

4-1- التعديلات على خوارزمية SMA

للحصول على نتائج زمنية أفضل مما حصلنا عليه مع استخدام خوارزمية SMA لجدولة المهام في البنى المتعددة النوى المتباينة، قمنا بإجراء أربعة تعديلات على الطريقة التي تعتمد عليها خوارزمية SMA في إسناد المهام على النوى. في جميع هذه التعديلات الأربعة يقوم المسلك الذي ينهي تنفيذه بإرسال إشارة إلى باقي المسالك تدل على انتهاء تنفيذه، وبناء على تلك الإشارة تُنقل المسالك بطريقة معينة تختلف من تعديل لآخر. وفيما يلي هذه الطرق:

في التعديل الأول: عند استلام إشارة انتهاء التنفيذ، نقوم بالمرور على كل النوى التي تعمل بتردد أقل من تردد عمل نواة مرسل الإشارة فننقل المسلك الموجود عليها إلى النواة التي لها تردد عمل أعلى مباشرة من تردها.

في التعديل الثاني: تجري عملية النقل كما في التعديل الأول، لكن في حالة الجدولة التي لا نستخدم فيها خوارزمية SMA. فعند استلام إشارة انتهاء التنفيذ، نقوم بالمرور على كل النوى التي تعمل بتردد أقل من تردد عمل نواة مرسل الإشارة فننقل المسلك الموجود عليها إلى النواة التي لها تردد عمل أعلى مباشرة من تردد النواة التي كان يعمل عليها المسلك في حالة الجدولة من دون استعمال خوارزمية SMA.

في التعديل الثالث: تجري عملية نقل المسالك كما في التعديل الأول، لكن مع تحديد عتبة لحجم العمل الذي أنجزه المسلك، بحيث يُنقل المسلك الذي لم يتجاوز تلك العتبة. يُعدّ المسلك أنه وصل إلى العتبة المحددة إذا أنجز $4/3$ حجم العمل المسند له.

التعديل الرابع: هو مزيج من التعديلين الثاني والثالث. فيجري تحديد عتبة لحجم العمل الذي أنجزه المسلك، وعند استلام إشارة انتهاء التنفيذ، نقوم بالمرور على كل النوى التي تعمل بتردد أقل من تردد عمل نواة مرسل الإشارة فإن كان المسلك الموجود على النواة لم يتجاوز إنجازها العتبة المحددة، فإنه ننقله إلى النواة التي لها تردد عمل أعلى مباشرة من تردد النواة التي كان يعمل عليها المسلك في حالة الجدولة من دون استعمال خوارزمية SMA.

4-2- تقييم أداء التعديلات على خوارزمية SMA

من أجل تقييم التعديلات على خوارزمية SMA، استندنا إلى برنامج حسابي يقوم بضرب مصفوفتين مربعيتين $A(n,n)$ ، $B(n,n)$ في حال عدة قيم لـ n هي: 20, 40, 800, 600, 400, 200, 100. من أجل كل قيمة لـ n وزعنا مهمة الضرب على ستة مسالك (threads)، منها أربعة كبيرة ومسلكين صغيرين. عدد الأسطر والأعمدة للمسالك الكبيرة يساوي ضعف عدد الأسطر والأعمدة للمسالك الصغيرة على الترتيب. وعدد الأسطر والأعمدة في أي مسلك (كبير أو صغير) هو نفسه. فمثلاً في حالة n تساوي 20 يُسند أربعة أسطر من المصفوفة A وأربعة أعمدة من المصفوفة B إلى كل مسلك كبير، وسطرين من المصفوفة A وعمودين من المصفوفة B إلى كل مسلك صغير.

من أجل التقييم، استخدمنا المحاكى sniper، وهو محاكي للبنيان المتعدد النوى المتباينة [10] يتيح بإجراء مجموعة من المهام، نذكر منها:

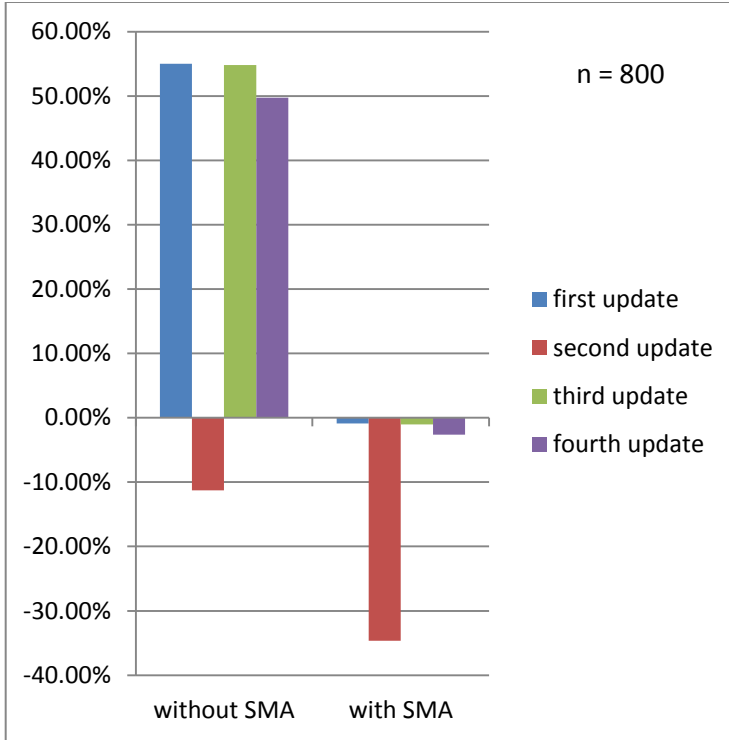
- إنشاء بنيان متعدد النوى (حتى 64 نواة)
- تغيير مستويات تردد العمل للنوى

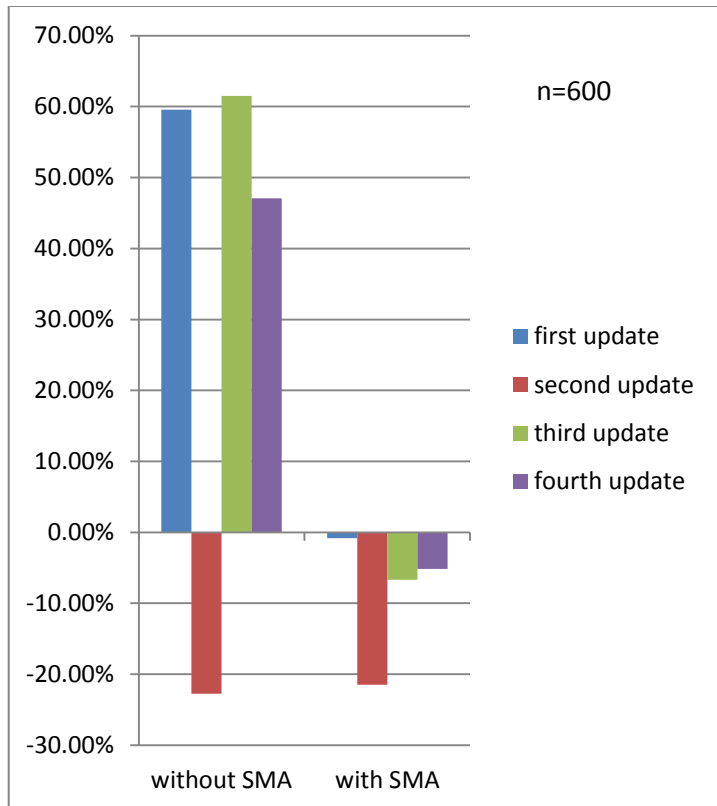
• نقل المسالك بين النوى

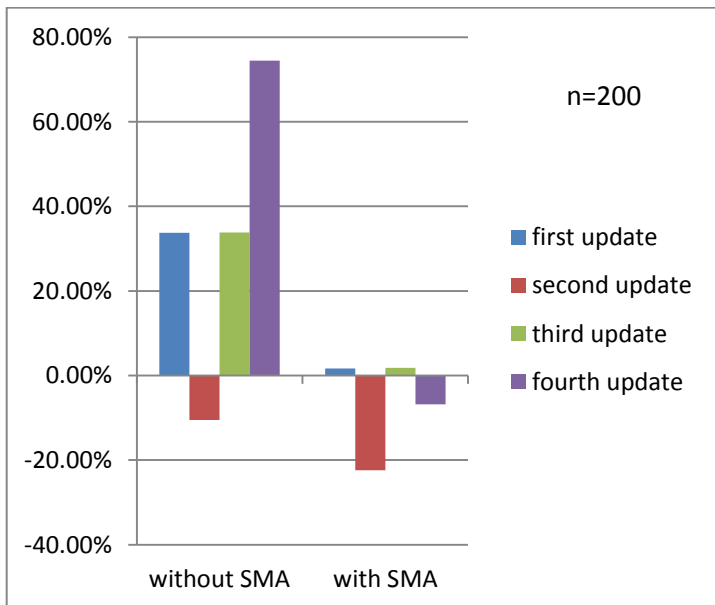
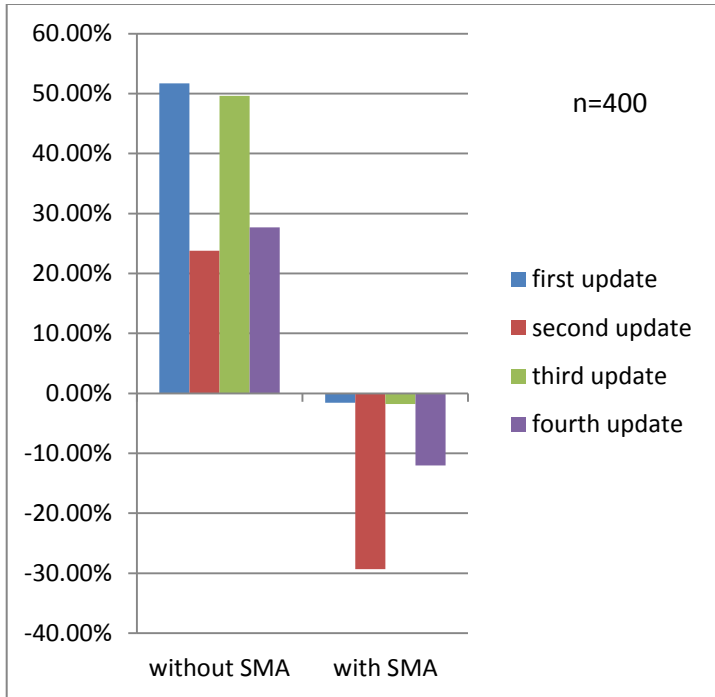
قمنا بضبط إعدادات المحاكى كما يلي:

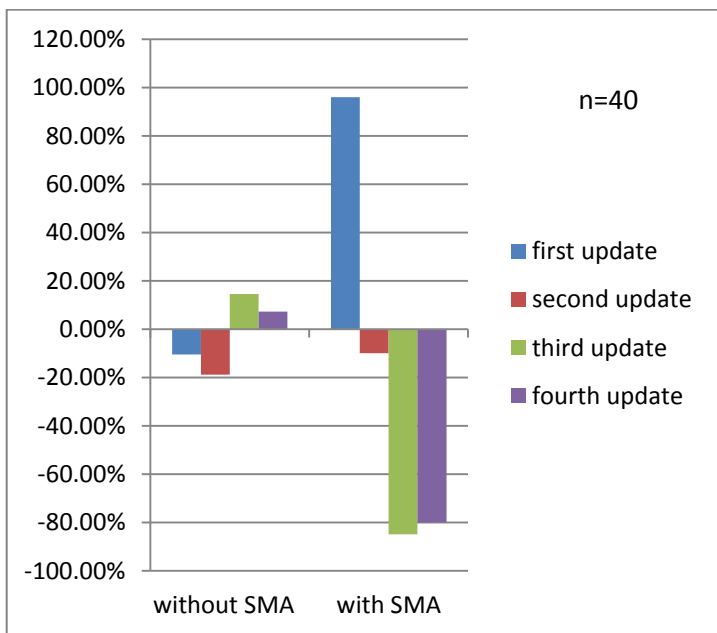
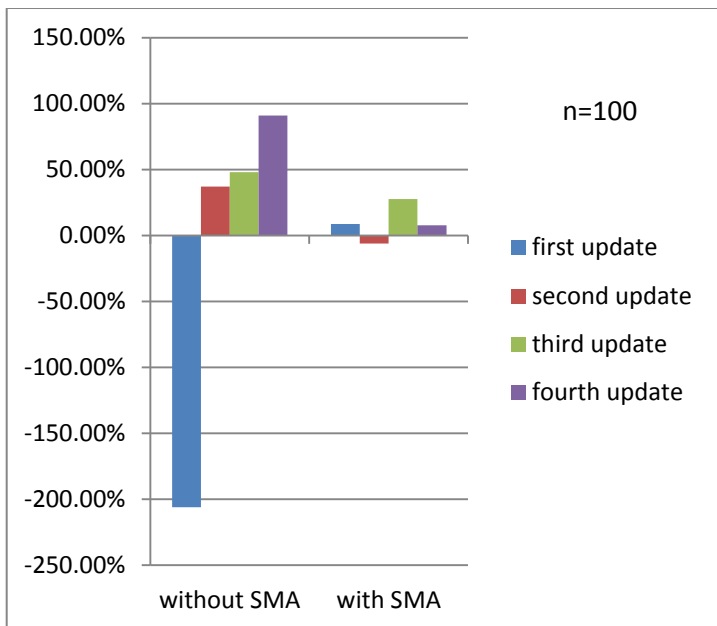
- عدد النوى سبعة
- ترددات النوى 1GHZ, 2.66GHZ, 3GHZ, 5GHZ, 10GHZ, 20GHZ
- 1GHZ على الترتيب (تردد النواة الأولى هو 1GHZ)

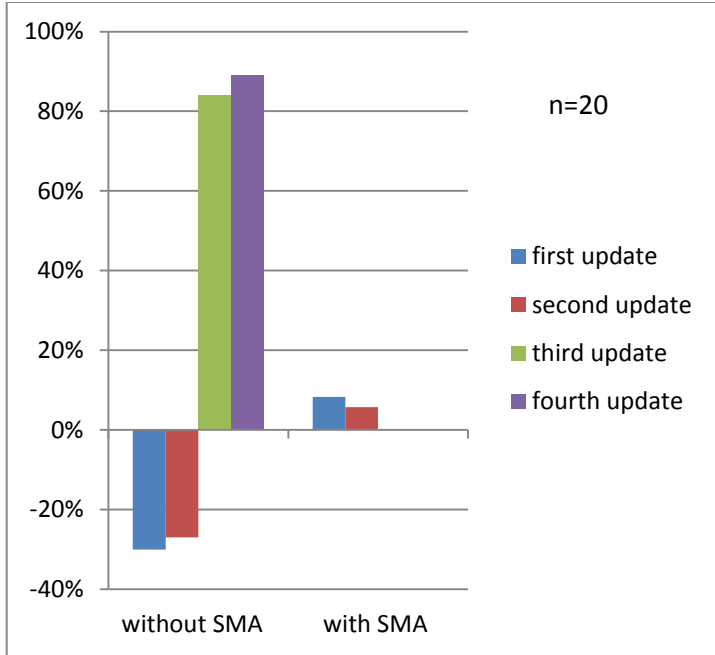
قمنا بمجموعة من التجارب، وفي كل تجربة قارنًا النتائج الزمنية لكل من التعديلات الأربعة وحالة الجدولة من دون SMA وحالة الجدولة باعتماد SMA. يبيّن الشكل 2 نتائج التجارب.











الشكل 2. مقارنة النتائج الزمنية للتعديلات الأربعة على خوارزمية SMA بالنتائج الزمنية لحالة الجدولة باستعمال SMA وحالة الجدولة من دون استعمال SMA، وذلك حسب الأبعاد المختلفة للمصفوفات (تمثل النسب الموجبة زيادةً زمنية، والنسب السالبة تحسناً زمنياً)

يمكن جمع نتائج المخططات السابقة في مجموعة من الجداول التوضيحية المبينة أدناه:

التعديل الرابع	التعديل الثالث	التعديل الثاني	التعديل الأول	N
أسوأ بـ % 49.72	أسوأ بـ %54.79	أفضل بـ %11.29	أسوأ بـ %55.1	800
أسوأ بـ %47.09	أسوأ بـ %61.49	أفضل بـ %22.76	أسوأ بـ %59.55 .	600
أسوأ بـ %27.7	أسوأ بـ %49.63	أسوأ بـ %23.8	أسوأ بـ %51.7	400
أسوأ بـ %74.44	أسوأ بـ %33.81	أفضل بـ %10.55	أسوأ بـ %33.77	200
أسوأ بـ %91	أسوأ بـ %48	أسوأ بـ %37	أفضل بـ %206	100
أسوأ بـ %7.17	أسوأ بـ %14.57	أفضل بـ %18.91	أفضل بـ %10.54	40
أسوأ بـ %89	أسوأ بـ %84	أفضل بـ %27	أفضل بـ %30	20

الجدول 1. مقارنة بين النتائج الزمنية للتعديلات الأربعة ونتائج الجدولة من دون

استعمال SMA.

التعديل الرابع	التعديل الثالث	التعديل الثاني	التعديل الأول	N
أفضل بـ %2.64	أفضل بـ %1.04	أفضل بـ %34.66	أفضل بـ %0.87	800
أفضل بـ %5.17	أفضل بـ %6.67	أفضل بـ %21.47	أفضل بـ %0.81	600

400	مساواة	أفضل بـ %29.31	أفضل بـ %1.79	أفضل بـ %12
200	أسوأ بـ %1.68	أفضل بـ %22.4	أسوأ بـ %1.84	أفضل بـ %6.82
100	أسوأ بـ %8.72	أسوأ بـ %6.12	أسوأ بـ %27.54	أسوأ بـ %7.82
40	أسوأ بـ 96%	أسوأ بـ 10%	أفضل بـ 85%	أفضل بـ 80%
20	أسوأ بـ 8%	أسوأ بـ 6%	مساواة	مساواة

الجدول 2. مقارنة بين النتائج الزمنية للتعديلات الأربعة ونتائج الجدولة باستعمال

.SMA

التعديل الأول	التعديل الثاني	التعديل الثالث	التعديل الرابع	
206%	27%	-	-	أعظم توفير زمني
59.55%	37%	84%	91%	أعظم زيادة زمنية

الجدول 3. مقارنة أعظم توفير زمني وأعظم زيادة زمنية تحققها التعديلات الأربعة

مقارنة بحالة الجدولة من دون استعمال SMA.

التعديل الرابع	التعديل الثالث	التعديل الثاني	التعديل الأول	
80%	85%	34.66%	0.87%	أعظم توفير زمني
7.82%	27.54%	10%	96%	أعظم زيادة زمنية

الجدول 4. مقارنة أعظم توفير زمني وأعظم زيادة زمنية تحققها التعديلات الأربعة

مقارنة بحالة الجدولة باستعمال SMA

من الجدول 2 نستنتج، في حالة الجدولة باستعمال SMA، أن التعديل الثاني يحقق أفضل توفير زمني (بين 21.47% و 34.66%)، مقارنة بالتعديلات الأول والثالث والرابع، في حالة الأبعاد الكبيرة للمصفوفة (بين 200 و 800). في المقابل، يحقق التعديلان الثالث والرابع أفضل توفير زمني (85% و 80% على الترتيب) في حالة أبعاد المصفوفة 40 × 40.

ومن الجدول 1 نستنتج، في حالة الجدولة من دون استعمال SMA، أن التعديل الثاني يحقق أفضل أداء (بين 10.55% و 27%) في حالة جميع الأبعاد للمصفوفة (باستثناء 100 و 400)، في حين يحقق التعديل الأول توفيراً زمنياً في حالة الأبعاد 100 وما دون، ذروته هي 206%. بالمقابل لا يحقق التعديلان الثالث والرابع أي توفير زمني.

من الجداول 1 إلى 4 أيضاً، نبيّن في الجدول 5 طريقة الجدولة التي تحقق أفضل توفير في الزمن ومقدار التوفير الموافق بحسب أبعاد المصفوفة، وذلك في حالة الجدولة باستعمال خوارزمية SMA.

التوفير الزمني	الخوارزمية	N
34.66%	التعديل الثاني	800
21.47%	التعديل الثاني	600
29.31%	التعديل الثاني	400
22.4%	التعديل الثاني	200
-	SMA	100
85-80%	التعديل الثالث أو الرابع	40
-	التعديل الثالث أو الرابع أو SMA	20

الجدول 5. أفضل خوارزمية والتوفير الزمني الموافق في حال الجدولة باستعمال

.SMA

ونبين في الجدول 6 كذلك طريقة الجدولة التي تحقق أفضل توفير في الزمن ومقدار التوفير الموافق بحسب أبعاد المصفوفة، وذلك في حالة الجدولة من دون استعمال خوارزمية SMA.

التوفير الزمني	الخوارزمية	N
11.29%	التعديل الثاني	800
22.76%	التعديل الثاني	600
-	التعديل الثاني	400
10.55%	التعديل الثاني	200
206%	التعديل الأول	100
18.91%	التعديل الثاني	40
30%	التعديل الأول	20

الجدول 6. أفضل خوارزمية والتوفير الزمني الموافق في حالة الجدولة من دون

.SMA

5- خلاصة

قدمنا في هذا البحث نتائج اختبار الأداء الزمني للتعديلات التي أجريناها على خوارزمية SMA. حيث قمنا بمقارنة نتائج هذه التعديلات مع نتائج حالة الجدولة التي نستخدم فيها SMA ومع نتائج حالة الجدولة التي لا نستخدم فيها SMA، وتبين من هذه المقارنات أن التعديل الثاني هو أفضل هذه التعديلات في كلا الحالتين وذلك عند استخدام أبعاد كبيرة للمصفوفات حيث أدى هذا التعديل إلى توفير زمني مقداره 27% مقارنة مع حالة الجدولة التي لا نستخدم فيها SMA كما أنه أدى إلى توفير زمني مقداره 34.66% مقارنة مع حالة الجدولة التي نستخدم فيها SMA، أما عند استخدام أبعاد صغيرة للمصفوفات فإن أفضل التعديلات مقارنة مع حالة الجدولة التي لا نستخدم فيها خوارزمية SMA هو التعديل الأول الذي أدى إلى توفير زمني بلغت أعظم قيمة له 206% بينما كان أفضل التعديلات مقارنة مع حالة الجدولة التي نستخدم فيها خوارزمية SMA هو التعديل الرابع الذي أدى إلى توفير زمني بلغت أعظم قيمة له 80%.

كما استنتجنا خوارزميتين معدلتين من SMA تعطي إحداهما أفضل أداء زمني في حال الجدولة باستعمال SMA، وتعطي الأخرى أفضل أداء زمني في حال الجدولة من دون استعمال SMA.

6- المراجع

[1] Zafar, M.R.(2016). Scheduling on Heterogeneous Multi-Core Processors Using Stable Matching Algorithm, in IJACSA.

- [2] Zhang, W., Bai, E., He, H., & Cheng, A., M.K. (2015). Solving Energy-Aware Real-Time Tasks Scheduling Problem with Shuffled Frog Leaping Algorithm on Heterogeneous Platforms. in sensors.
- [3] Karande, P., Dhotre, S.S., & Patil, S.(2014). Task Management for Heterogeneous Multi-core Scheduling. in IJCSIT.
- [4] Kinsy, M.A., Devadas, S.(2016). Algorithms for Scheduling Task-based Applications onto Heterogeneous Many-core Architectures. in Mit.
- [5] Zhang, W., Xie, H., Cao, B., & Cheng, A. M.K. (2014). Energy-Aware Real- Time Task Scheduling for Heterogeneous Multiprocessors with Particle Swarm Optimization Algorithm. in Hindawi.
- [6] Radhamani, A.S., Baburaj, E.(2013). performance efficient heterogeneous multi core scheduling strategy based on genetic algorithm. in ARPJ.
- [7] Anne, N., Muthukumar, V.(2013). Energy Aware Scheduling of Aperiodic Real-Time Tasks on Multiprocessor Systems. in JCSE.

- [8] Winter, J. A., Albonesi, D. H., & Shoemaker, C. A.(2010). Scalable Thread Scheduling and Global Power Management for Heterogeneous Many-Core Architectures, in ACM.
- [9] Salom, O., Alhafez, N.(2016). Enhancing Energy-Efficient Scheduling Algorithm on Multicore Processors, in Damascus University Journal.
- [10] Akra, A., Sawalha, L.(2016). A Comparison of x86 Computer Architecture Simulators, in Computer Architecture and Systems Research Laboratory (CASRL).
- [11] سلوم، أ.، الحافظ، ن.(2020). نحو تخفيض زمن الخوارزمية Stable Matching Algorithm للجدولة المتعددة النوى المتباينة. مجلة جامعة البعث - سورية - حمص.

تصميم معدل نبضي خطي عالي الاستطاعة اعتماداً على ترانزستورات الحالة الصلبة

تقديم: م. تيسير يوسف العيسى* اشرف د: معين يونس د. غدير ماضي

الملخص

يُعد المعدل النبضي عالي الاستطاعة البنية الرئيسية في المرسلات الرادارية التي تعتمد في عملها على الصمامات المكروية، كونه يؤمن الجهد العالي النبضي ضمن مواصفات محددة للصمام المكروي والذي يلعب الدور الرئيسي في تحديد مواصفات نبضة الرادار مما يؤثر على عمله، وحيث أنه يوجد العديد من الأنواع لهذه المعدلات النبضية إلا أن النمط الخطي Linear Type يُعد من أكثر الأنواع شهرةً، والذي يعتمد في تصميمه القديم على القواطع الغازية التقليدية Spark Gape.

نطرح في هذا العمل تصميماً جديداً للمعدلات النبضية الخطية لقيادة نبضات الجهد العالي المطبقة على الصمام المكروي عالي الاستطاعة في المرسل الراداري، والذي يمكن استخدامه أيضاً في عملية بناء أنظمة تشويش إلكتروني بطرق جديدة. سنقوم بدراسة جزئيات هذا المعدل ببناء جديد لكتلة القواطع الإلكترونية التي تلعب الدور الرئيسي في عملية التصميم، ومن ثم دراسة المحول النبضي العالي الاستطاعة وأثر العناصر الشاردية على شكل النبضة ومن ثم إجراء نمذجة حاسوبية للتحقق من صحة هذا البناء المقترح لننتقل بعدها إلى التنفيذ العملي لهذا المعدل ومقارنة النتائج العملية بنتائج النمذجة لتقييم الأداء وللتحقق من بلوغ الغاية المرجوة من بناء هذا المعدل النبضي عالي الاستطاعة.

الكلمات المفتاحية: المعدلات الرادارية النبضية، الاستطاعة النبضية، قواطع الحالة الصلبة، الصمامات المكروية، المغنطرون، الكترنويات الاستطاعة، المحولات النبضية.
*طالب دكتوراه (من مركز الدراسات والبحوث العلمية) -قسم هندسة الاتصالات والالكترونيات-كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية-جامعة تشرين-اللاذقية-سورية.

Email: tony.saad@yandex.com phone: 0999852779

Design High-Power Linear Type Modulator depending on solid state Transistors

Tayser Alissa*

Abstract

The high power pulse modulator is the basic structure in radar transmitter, which depends on microwave tube, because it provides the high voltage pulse in a specific parameters of microwave tube that plays the main role in determining radar pulse specification, and where there are many type of these pulse modulators, but linear type considers as the most famous, which depends in old design on traditional spark gape switches.

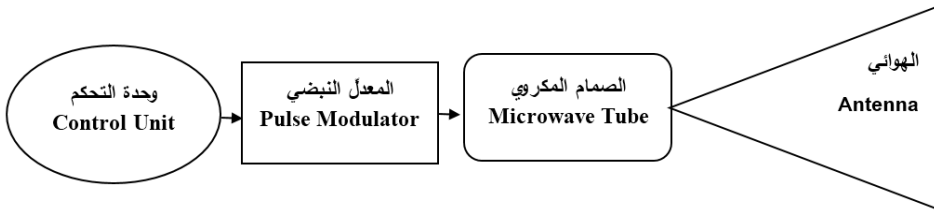
In this work, We present a new design of linear type modulator to lead the high voltage pulses applied to the high-power microwave tube in the radar transmitter, and which can be used in building new systems of electronic jamming, we will study the subsystems in new building of electronic switches bank, which has the main role in the design operation, then we will study the pulse transformer and the effect of parasitic elements on wave shape, and doing a computer simulation to verify the validity of this proposed construction and then the practical implementation of this modulator and compare the results of process with simulation results to evaluate performance and to verify the desired goal of building this high-power pulse modulator.

Key words: radar impulse modulators, pulsed power, solid-state switches, microwave tubes, magnetrons, power electronics, pulsed transformers.

* PhD. Student, Department of Communication and Electronics, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

مقدمة introduction

تستخدم معظم المرسلات الرادارية القديمة ذات الاستطاعة العالية والتردد العالي الصمامات المكروية لتوليد نبضات الإرسال، وحيث أن هذه الصمامات المكروية تحتاج إلى دارة تغذية خاصة تُسمى بالمعدّل النبضي الذي يؤمن الجهد النبضي العالي بعرض نبضة وتردد تكراري محددين وفق مواصفات الصمام المكروي، لذلك تُعدّ المعدّلات النبضية ذات الاستطاعة العالية البنية الأساسية للمرسلات الرادارية العالية الاستطاعة، حيث يبين الشكل (1) المخطط الصندوقي للمرسل الراداري وتوضّع المعدّل النبضي فيه الذي يُشكّل الجزء الأصعب والأهم من حيث تصميم هذه الأنظمة حيث تكمن هذه الصعوبة في التقنيات اللازمة المتعلقة بالجهود النبضية عالية الاستطاعة بحيث تحقق جودة شكل نبضة الجهد الذي يلعب دوراً كبيراً في شكل الإشارة المكروية وبالتالي يُؤثر على عمل الرادار النبضي.



الشكل 1: المخطط الصندوقي للمرسل الراداري

إن وظيفة المعدّل النبضي Pulse Modulator هي تأمين نبضات الجهد العالي باستطاعة مرتفعة للصمام المكروي لتوليد النبضات المكروية عالية الاستطاعة، وبما أن الاستخدام الأكثر لهذه النبضات المكروية موجود في الرادارات النبضية لذلك فإن شكل ومواصفات نبضات الجهد العالي للمعدّل النبضي مهمة جداً لعمل الرادار النبضي [1]، حيث يُعدّ عرض النبضة Pulse Width (PW) العامل الرئيسي المُحدّد لقدرة الرادار على الفصل بين الأهداف وكذلك التردد التكراري النبضي (PRF) pulse repetition frequency الذي يؤثر على قيمة المدى الأعظمي لقدرة الرادار على الكشف [2].

للأسباب السابقة، تُعدّ معدّلات الحالة الصلبة النبضية عالية الاستطاعة مهمة جداً لأبحاث الرادار وتكنولوجيا الأمواج المكروية، بحيث تكون الغاية الرئيسية للمعدّل النبضي عالي الاستطاعة توليد نبضات جهد عالي بعرض نبضة صغير وزمن صعود وهبوط سريع بتردد تكراري محدد [3].

يوجد العديد من التصاميم لهذه المعدّلات النبضة عالية الجهد إلا أن أقدمها والأكثر شهرة هو التصميم المُسمى بالنمط الخطي Linear-type construction الذي ظهر منذ العام 1940م وبقي من أفضل التصاميم من حيث الكلفة المنخفضة والمرونة في عمليات الإصلاح والتبديل للمرسلات الرادارية لسنتين عديدة [4]. إن لهذه الطريقة العديد من الميزات كالخبرة الطويلة في التعامل مع هذا النمط، تخزين ثابت للطاقة في خطوط النقل، صغر الحجم، تحكم جيد بالجهد، إلا أن لها أيضاً سلبيات كالحاجة لدارة إزالة المغنطة لقلب المحول النبضي، وهو الأمر الذي سوف نقوم بحله بطريقة جديدة ضمن كتلة القواطع التي تعتمد في تصميمها على ترانزستورات الحالة الصلبة العالية الاستطاعة.

هدف البحث وأهميته:

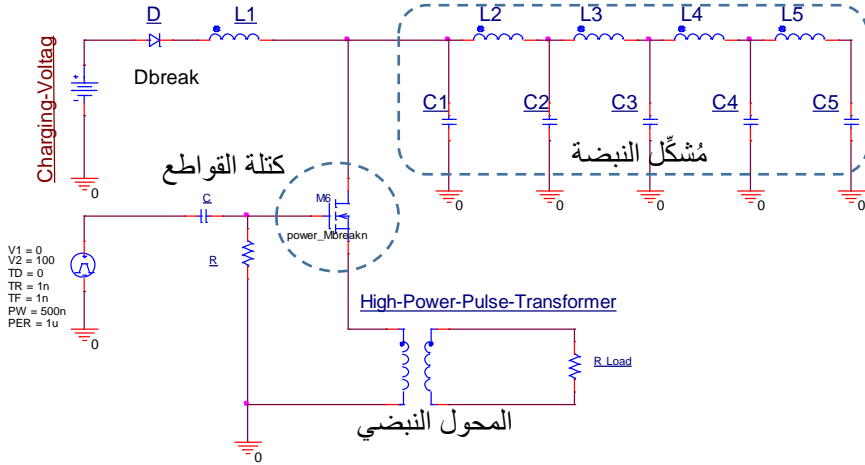
يهدف عملنا هذا إلى بناء تصميم جديد للمعدّل النبضي نظرياً وعملياً يتجنب السلبيات الموجودة في التصاميم القديمة ويكون صالحاً للعمل على طيف واسع من الرادارات الموجودة بهدف تحقيق رفع جاهزيتها عن طريق استبدالها بتكنولوجيا جديدة محلية وبكلفة منخفضة مقارنة مع الكلفة المرتفعة الحالية هذا إن توفرت قطع التبديل لكونها تعتمد على تقنيات قديمة لم تعد تُنتج الآن.

طرائق البحث ومواده:

1-المخطط العام للمعدّل النبضي

تتكون معدّلات النمط الخطي من شبكة تشكيل النبضة Pulse Forming Network (PFN)، المحول النبضي عالي الاستطاعة High Power Pulse Transformer، والقاطعة Switch. حيث يتم تصميم شبكة تشكيل النبضة بحيث تكون ممانعتها مساوية تقريباً لممانعة الحمل المنظورة من جهة المحول النبضي (توافق

ممانعات بين المعدّل والحمل) [5]. ويُوضح الشكل (2) المخطط الكهربائي للمعدّل النبضي الخطي [6].



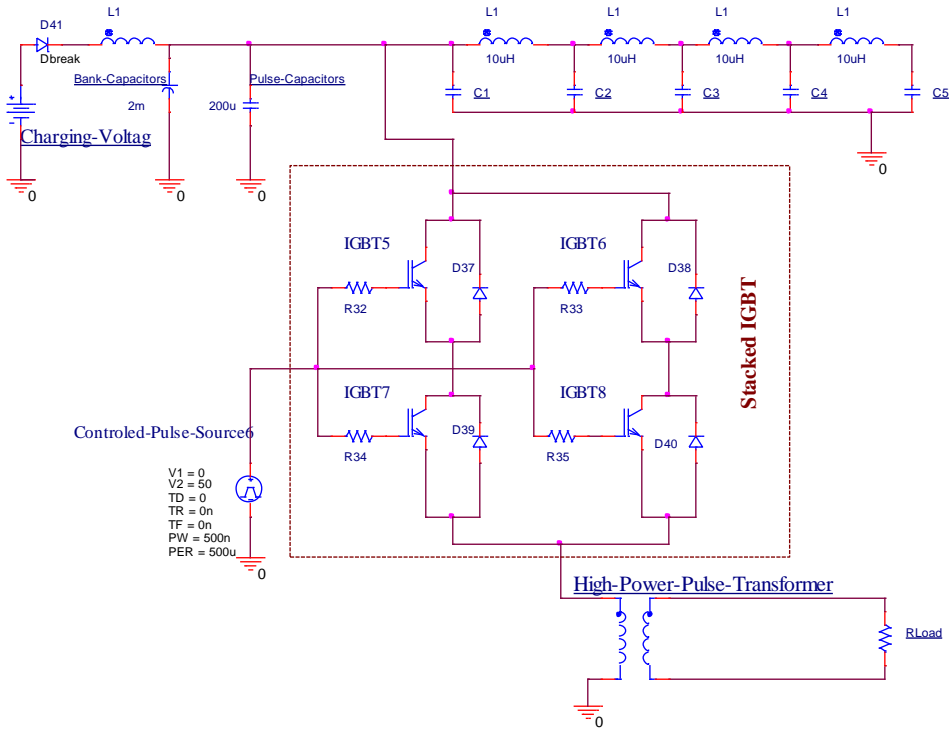
الشكل 2: المخطط الكهربائي للمعدّل النبضي الخطي [6]

2-البنية المقترحة لكتلة قواطع الحالة الصلبة عالية الاستطاعة

يعتمد مبدأ عمل المعدّل النبضي المقترح على فكرة تمرير نبضات الجهد العالي المتشكلة من خلال مُشكّل النبضة عبر قاطعة غازية أو ثيراترون Thyatron الذي سنقوم باستبداله بكتلة قواطع عالية الاستطاعة مبنية على أساس تشكيلة من ترانزستورات الحالة الصلبة نمط (insulated gate bipolar transistors) IGBT بتصميم جديد كلياً عن طريق ربطها مع بعضها البعض تسلسلياً وتفرعياً، وذلك لتستطيع تحمل الجهد المطبق عليها وكذلك التيار المار بها، كما هو موضّح في الشكل (3).

وبخلاف كل التصاميم المعروفة للمعدّلات النبضية القائمة للصمامات المكروية والتي تعتمد على خطوط النقل لإيجاد نبضات الجهد العالي [7] فإن هذه الطريقة تعتمد على كتلة قواطع الحالة الصلبة عالية الاستطاعة التي تعمل على تمرير الجهد عبر ملف الأولي للمحول النبضي عالي الاستطاعة كحمل لها ومن ثم رفع الجهد بنسبة تحويل معينة لإيجاد نبضات الجهد العالي على خرج المحول النبضي [8].

إن لهذه الطريقة العديد من الإيجابيات من بينها إمكانية التحكم بلحظة الإغلاق وذلك بسبب استخدام قواطع مفتوحة وبالتالي حماية النظام في لحظات الفشل أو الانهيارات، عدم وجود شحن وتفريغ كامل للمكثفات، التحكم بمستوى جهد الخرج عن طريق جهد الدخل مباشرة، وبالإضافة إلى إمكانية تغيير عرض النبضة والتردد التكراري دون الحاجة إلى إجراء أي تغيير في بنية المعدّل وهو ما يجعل من تصميم معين أن يكون مناسب للعديد من الرادارات المختلفة فيما بينها بعرض النبضة أو التردد التكراري [9].



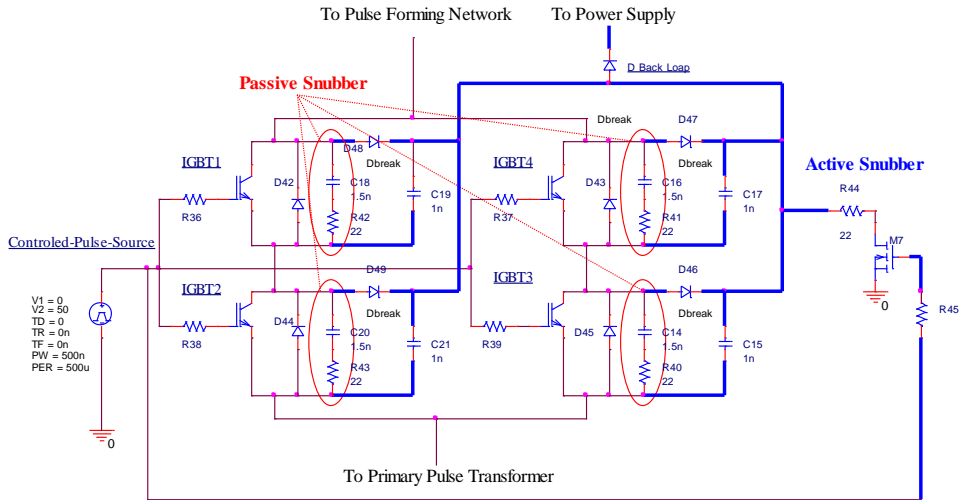
الشكل 3: تشكيلة الربط التسلسلي والتفرعي لترانزستورات الاستطاعة

2-1 مناقشة تصميم الدارة

بدايةً يجب الانتباه إلى قيمة مكثفات التخزين Bank Capacitors بحيث تكون كافية لتأمين الطاقة اللازمة لتوليد النبضات وكذلك أيضاً لقيمة المكثفات النبضية Pulse Capacitors لتكون قادرة على تأمين جهد نبضي عالي خلال زمن صغير (highV/ μ S).

تتعلق قيمة جهد نبضة الدخل بالقيمة العظمى التي يستطيع ترانزستور الاستطاعة أن يتحملها دون حدوث انهيار جهد (المصدر-المجمّع)، لذلك ترتبط نسبة تحويل المحول النبضي بنسبة جهد نبضة الخرج والجهد الأعظمي للمصدر-مجمّع لترانزستورات الاستطاعة هذه [10].

يجب الانتباه إلى أنه كلما زادت نسبة تحويل المحول النبضي قلَّ جهد المصدر-المجمّع لترانزستور الاستطاعة، ولكن ذلك يعني أيضاً زيادةً في قيمة العناصر الشاردة للمحول النبضي كالمكثفات والذاتيات الشاردية التي تُسبب تشوّه في شكل النبضة مع وجود نبضات عابرة عالية القيمة غير مرغوبة مع زيادةً سرعة زمن الصعود والهبوط لنبضة جهد الخرج وجميع هذه العوامل غير مرغوبة في التطبيقات المتعلقة بالرادارات كونها تؤثر على عملها وأدائها [11]. وبالتالي يجب حذف هذه النبضات العابرة الموجودة على مجمّع القاطعة وذلك عن طريق اقتراح دارة سنبر (مرشّح) غير فعّال passive snubber (C_s, R_s) لكل ترانزستور IGBT، ودارة سنبر فعّال active snubber واحدة لمجموعة الترانزستورات كما هو موضّح في الشكل (4).



الشكل 4: دارات السنبر الفعّال والغير فعّال لكتلة الترانزستورات

2-2- المناقشة النظرية للدارة المقترحة والعلاقات الرياضية المبنية عليها

إن جهد الشحن المستمر الموجود على دخل دارة المعدّل هو V_{ch} ، وفي الحالة الأولى (النمط الأول) عندما تكون جميع ترانزستورات الاستطاعة M_n مفتوحة (كتلة القواطع مفتوحة) سوف يمر التيار من مُشكّل النبضة عبر ملفّ الأولي للمحول النبضي، وتكون معادلة الشحن لذاتية ملفّ الأولي للمحول النبضي موضحة بالعلاقة:

$$V_{ch} = L_p \frac{di_{on}}{dt} \quad (1)$$

حيث L_p ذاتية الملفّ الأولي للمحول النبضي، di_{on} تيار شحن الذاتية L_p خلال الزمن dt والذي هو عبارة عن عرض النبضة T_{on} ، ولذلك نستطيع كتابة المعادلة (1) على الشكل:

$$di_{on} = V_{ch} \cdot \frac{T_{on}}{L_p} \quad (2)$$

وإذا افترضنا أن تيار الحمل I_l فيكون لدينا:

$$di_{on} = \frac{N_s}{N_p} \cdot I_l \quad (3)$$

حيث: N_s عدد لفات الثانوي للمحول النبضي، N_p عدد لفات الأولي للمحول النبضي.

والتي يمكن كتابتها باستخدام المعادلة (2) على الشكل:

$$I_l = \frac{T_{on}}{L_p} \cdot \frac{N_p}{N_s} \cdot V_{ch} \quad (4)$$

وتكون القدرة المخزنة في ذاتية الأولي:

$$E_{L_p} = \frac{1}{2} L_p (di_{on})^2 \quad (5)$$

بتعويض المعادلتين (3 و 4) في المعادلة (5) يكون لدينا:

$$E_{L_p} = \frac{T_{on}^2 V_{ch}^2}{2 \cdot L_p} \quad (6)$$

تقوم دارات السنبر غير الفعّال (nC_s, nR_s) بحذف ترددات الاهتزازات المنخفضة الناتجة عن الذاتيات الشارديّة للمحول النبضي ومكثفات المصدر-المجمّع لترانزستورات الاستطاعة.

عندما تُغلق ترانزستورات الاستطاعة M_n سيتم شحن المكثفة C_b حيث تُعطى قدرتها التخزينية بالعلاقة:

$$E_{C_b} = \frac{1}{2} C_b V_{ch}^2 \quad (7)$$

لتحقيق إزالة مغنطة القلب الفريتي بشكل كامل يجب أن يكون تيار التفريغ لذاتية الأولي مساوياً لتيار الشحن لها، لذلك يكون الشرط اللازم لإزالة المغنطة هو:

$$di_{on} = |di_{off}| \quad (8)$$

وبالتالي يكون الزمن اللازم لإزالة المغنطة هو:

$$T_{demag} = \frac{V_{ch}}{V_{FD_{Fb}} + V_{FD_n}} \cdot T_{on} \quad (9)$$

ولأجل التطبيقات المتعلقة بعمل الرادار، يجب أن يكون زمن عرض النبضة وزمن إزالة المغنطة هما معاً أقل من المجال التكراري للنبضة pulse repetition interval (PRI)، وبالتالي:

$$T_{demag} + T_{on} < PRI$$

وبما أن معدّل عمل الرادار يُعطى كنسبة النبضة T_{on} إلى PRI ، أي:

$$DutyCycle = \frac{T_{on}}{PRI} \quad (10)$$

لتحديد قيمة المكثفات يجب أن تحقق شرط تفريغها خلال زمن فتح الترانزستورات بشكل كامل، لذلك يمكن كتابة الشرط التالي:

$$5nR_s C_b < T_{on} \quad (11)$$

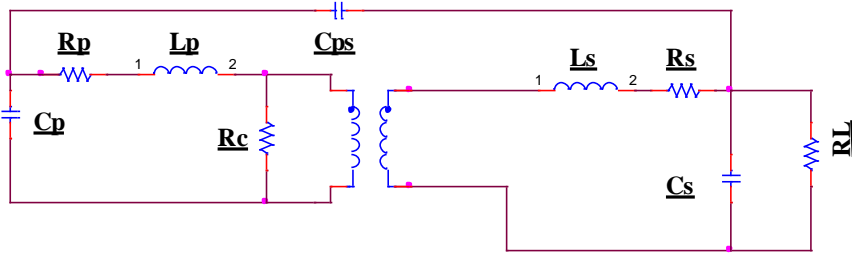
حيث n عدد مكثفات C_b .

3-المحول النبضي عالية الاستطاعة High Power Pulse Transformer

تظهر الحاجة إلى بناء محولات نبضية باستطاعة وجهود عالية مع زيادة استطاعة الصمامات المكروية، حيث تُستخدم المحولات بشكل عام كرافعة للجهد النبضي وعزل كهربائي، تخفيض الضجيج، وتحسين نوعية الاستطاعة، بالإضافة إلى تحقيق توافق ممانعات بين المعدل النبضي والصمام المكروي وخاصة في أنظمة الاستطاعة العالية. الفائدة الرئيسية من استخدام المحول النبضي عالي الاستطاعة في المعدلات النبضية هو تقليل جهد الشحن المطبق على قواطع الحالة الصلبة.

3-1- الدارة المكافئة للمحول النبضي العالي الاستطاعة

يمكن نمذجة الدارة المكافئة للمحول النبضي باستخدام برنامج الـ ORCAD PSPICE كما هو في الشكل (5)[12].

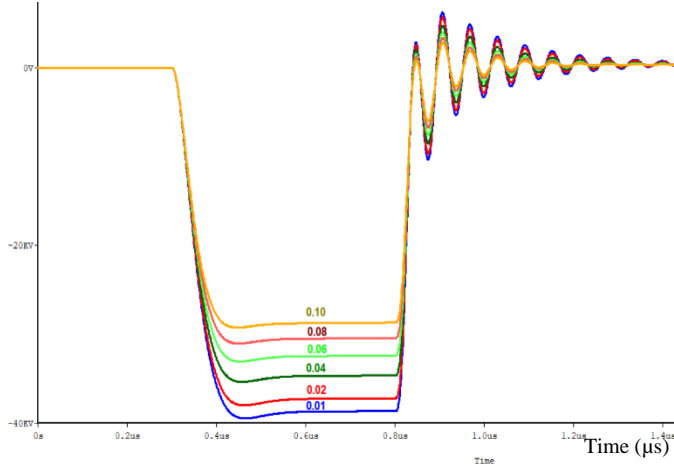


الشكل 5: الدارة المكافئة للمحول النبضي عالي الاستطاعة [12]

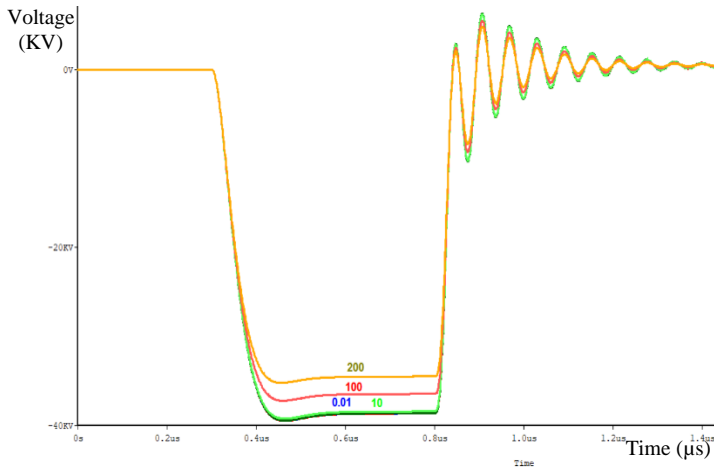
3-2- أثر العناصر الطفيلية على شكل نبضة الخرج

✓ الأثر على هبوط الجهد: إن الأثر الرئيسي لهبوط جهد الخرج يعود لمقاومة سلك الملف الأولي ومقاومة سلك الملف الثانوي، إلا أن أثر مقاومة الأولي أكبر من أثر مقاومة الثانوي كما هو واضح من الشكل (6) والشكل (7).

Voltage
(KV)



الشكل 6: أثر مقاومة سلك الملف الأولى R_p على هبوط جهد الخرج
(R_p : 0.01, 0.02, 0.04, 0.08, 0.1 Ω)

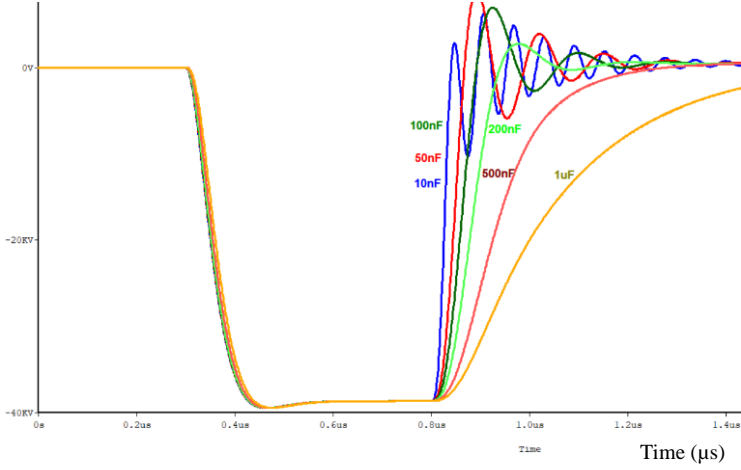


الشكل 7: أثر مقاومة سلك الملف الثانوي R_s على هبوط جهد الخرج
(R_s : 0.01, 10, 100, 200 Ω)

✓ الأثر على زمن الصعود والهبوط للنبضة: يعود سبب زيادة زمن الصعود والهبوط إلى المكثفات الشاردية للأولي والثانوي ومكثفة الربط الشاردية بينهما كما هو موضَّح في الأشكال (8, 9, 10).

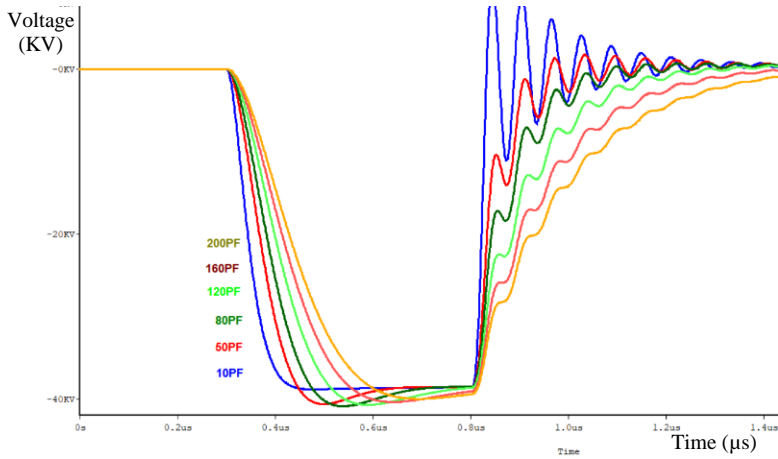
Voltage
(KV)

تصميم معدّل نبضي خطي عالي الاستطاعة اعتماداً على ترانزستورات الحالة الصلبة



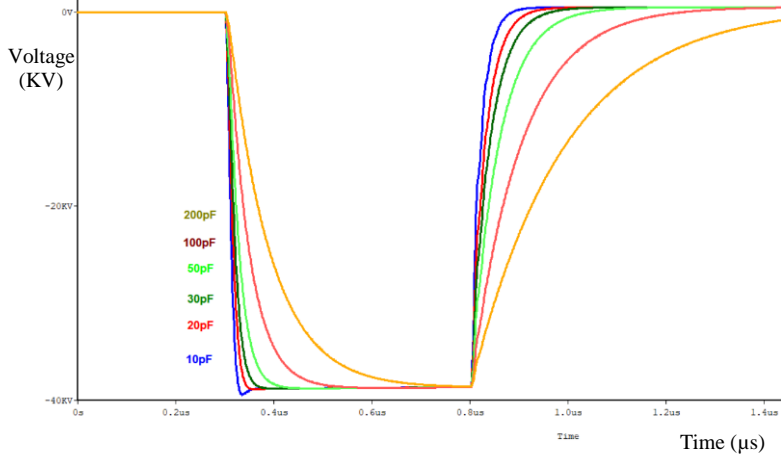
الشكل 8: أثر المكثفة الشارديّة للملف الأولي C_p على زمن الصعود والهبوط للنبضة

(C_p : 10, 50, 100, 200, 500, 1000 nF)



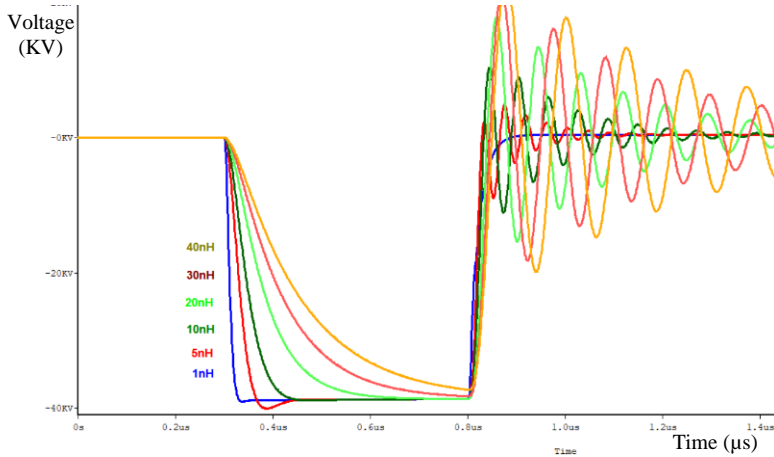
الشكل 9: أثر المكثفة الشارديّة للملف الثانوي C_s على زمن الصعود والهبوط للنبضة

(C_s : 10, 50, 80, 120, 160, 200 pF)



الشكل 10: أثر مكثفة الربط الشاردية بين الأولي والثانوي C_{ps} على زمن الصعود والهبوط للنبضة
(C_{ps} : 10, 20, 30, 50, 100, 200 pF)

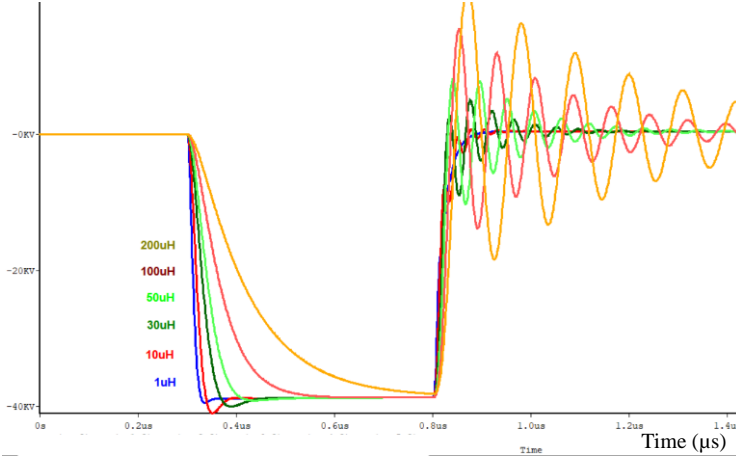
✓ الأثر على اهتزاز النبضة والجهد الراجع: يعود سبب ذلك إلى الذاتيات الشاردية للملف لأولي والثانوي كما هو موضَّح في الأشكال (11, 12).



الشكل 11: أثر الذاتية الشاردية للملف الأولي L_p على اهتزاز النبضة

(L_p : 1, 5, 10, 20, 30, 40 nH)

Voltage
(KV)



الشكل 12: أثر الذاتية الشاردية للملف الثانوي L_s على اهتزاز النبضة

$$(L_s: 1, 10, 30, 50, 100, 200 \mu H)$$

4- النتائج والمناقشة:

4-1- نمذجة الدارة المقترحة والتحقق من صلاحية البنية المفروضة

تم نمذجة الدارة المقترحة باستخدام برنامج الـ ORCAD 17.4 للتحقق من أداء البنية المقترحة للمعدّل النبضي ضمن السيناريو الحقيقي وباعتبار معالجة النظام غير خطية (الحالة الحقيقية)، ولهذا الغرض تم تحديد مواصفات معدّل نبضي عالي الاستطاعة بعرض نبضة قصير يناسب عمله عدد من التطبيقات من بينها العمل على بعض أنواع رادارات الدفاع الجوي. وهذه المواصفات على الشكل التالي:

جهد نبضة الخرج (جهد المهبط للصمام المكروي): $V_{out} = -40 \text{ KV}$.

تيار نبضة الخرج (تيار الحمل): $I_{Load} = 25 \text{ A}$. عرض النبضة: $PW=500 \text{ ns}$.

وتحت شرط المعادلة (10) نستطيع وضع قيمة التردد التكراري: $PRF= 2 \text{ KHz}$.

طراز الترانزستورات M_n هو APT12040L2FLL.

طراز الديودات D_n و D_{Fd} هو DSEP30-I2CR.

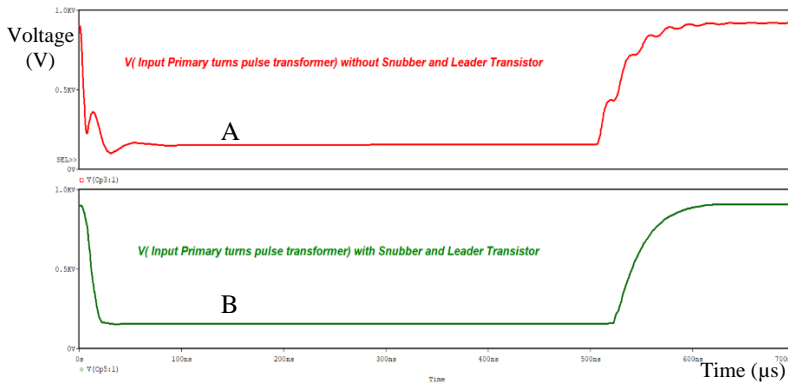
نستطيع شحن ملف الأولي للمحول النبضي حتى جهد $= 900 \text{ VDC}$ وفقاً لمواصفات

الترانزستورات M_n و M_L .

يمكن تحديد مواصفات المحول النبضي العالي الاستطاعة انطلاقاً من قيمة جهد نبضة الخرج المطلوبة وقيمة جهد الدخل المسوح تطبيقها على ملف الأولي للمحول كالتالي:
عدد لفات الأولي للمحول النبضي: $N_p = 1$. عدد لفات الثانوي للمحول النبضي:
 $N_s = 55$.

انطلاقاً من المعادلة (11): قيمة المكثفة $C_b = 3nF$ ، وبالتالي بقية عناصر السنبر:
 $C_s = 1.8\mu F$ ، $R_s = 27\Omega$ ، 50 watt

يُظهر الشكل (13) نتائج النمذجة لشكل نبضة الجهد المُطبقة على لفات الأولي للمحول النبضي، حيث نشاهد بوضوح أثر وجود السنبر على شكل النبضة من حيث وجود اهتزازات ترددية غير مرغوبة أو قفزات جهد عالية تؤثر على عمل الصمام المكروي.

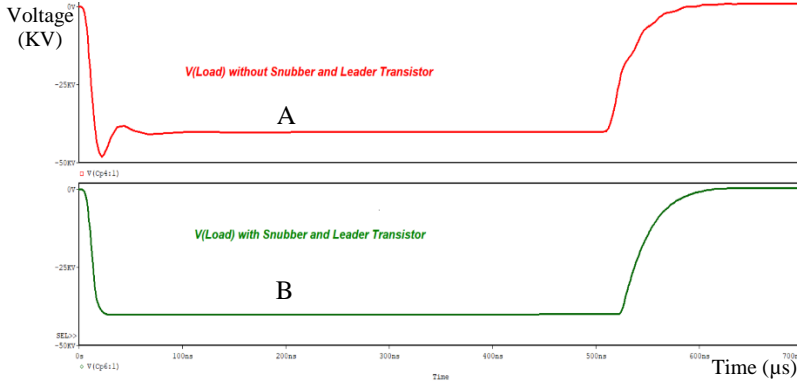


الشكل 13: شكل نبضة الجهد المُطبقة على لفات الأولي للمحول النبضي

(A) بدون وجود السنبر ، (B) مع وجود السنبر

تصميم معدّل نبضي خطي عالي الاستطاعة اعتماداً على ترانزستورات الحالة الصلبة

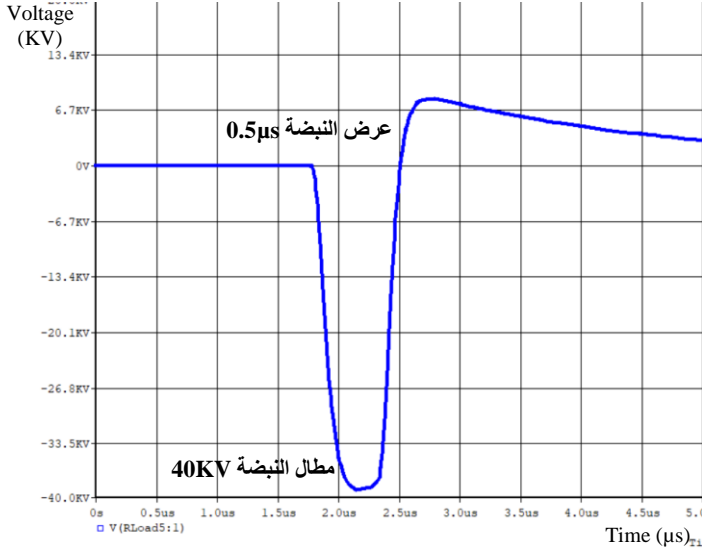
يَظهر هذا الأثر لدارات السنبر أيضاً بوضوح على شكل نبضة الجهد المُطبقة على الحمل كما هو واضح في الشكل (14.B) مقارنةً بشكل نبضة جهد الخرج بدون وجود السنبر والترانزستور القائد في الشكل (14.A).



الشكل 14: شكل نبضة جهد الخرج المُطبقة على الحمل

(A) بدون وجود السنبر ، (B) مع وجود السنبر

بتطبيق جميع الشروط المتعلقة بالمحول النبضي من حيث قيم العناصر الشاردية المناسبة واستخدام دارات السنبر نحصل على النتيجة النهائية لشكل نبضة الخرج كما في الشكل (15).



الشكل 15: شكل نبضة جهد الخرج النهائية المطبقة على الحمل

4-2-التنفيذ العملي للمعدّل النبضي والنتائج التجريبية

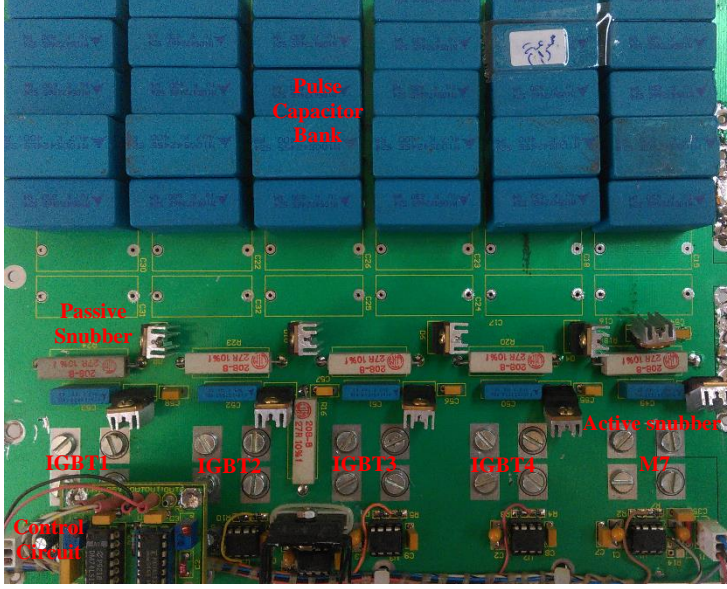
ملاحظات تصميمية:

عند إخراج الدارة المطبوعة لترانزستورات كتلة القواطع بالشكل النهائي كدارة مطبوعة يجب الانتباه إلى مسألة التناظر فيما بين هذه الترانزستورات وإلا سوف يحدث خلل بمرور التيار عبر بعض الترانزستورات وعدم توازن بتوزيع مرور التيار النبضي بين مختلف فروع ترانزستورات الاستطاعة الموصولة تفرعياً.

تتحمل عائلة ترانزستورات الـ IGBT جهد أكبر من ترانزستورات الـ MOSFET، إلا أنها أبداً منها وزمن صعود نبضة الجهد فيها مرتفع، ولكنها جيدة لمعدلات النبضات الطويلة [13].

4-2-1-بناء النظام

مواصفات النموذج العملي للمعدّل النبضي هي نفس المواصفات المقترحة في عملية النمذجة وخاصة فيما يتعلق بعملية بناء كتلة القواطع من حيث العدد والانتباه إلى مسألة التناظر في توضع ترانزستورات الاستطاعة كما هو واضح في صورة كتلة القواطع في الشكل (16)، علماً أنه تم تنفيذ الجزء العملي في مركز الدراسات والبحوث العلمية.

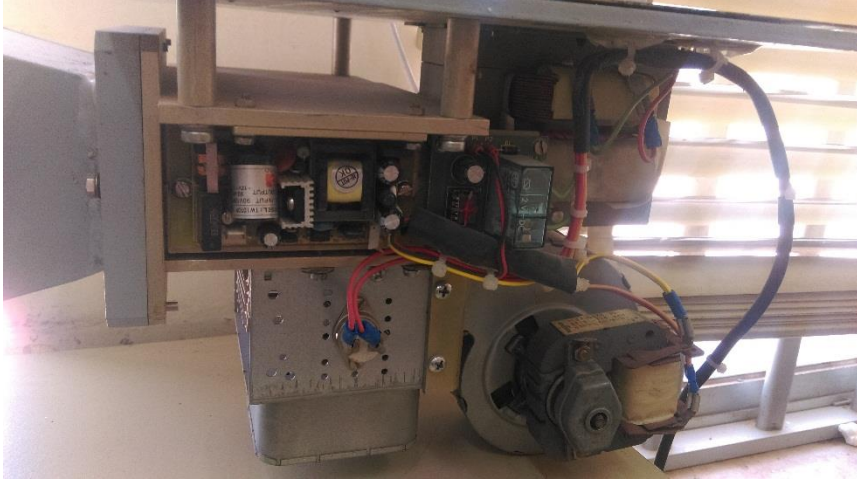


الشكل 16: صورة كتلة القواطع

الجزء الثاني المهم في المعدّل النبضي هو المحول النبضي عالي الاستطاعة والموضحة صورته في الشكل (17). كما يُظهر الشكل (18) صورة النظام المخبري الكامل.



الشكل 17: صورة المحول النبضي

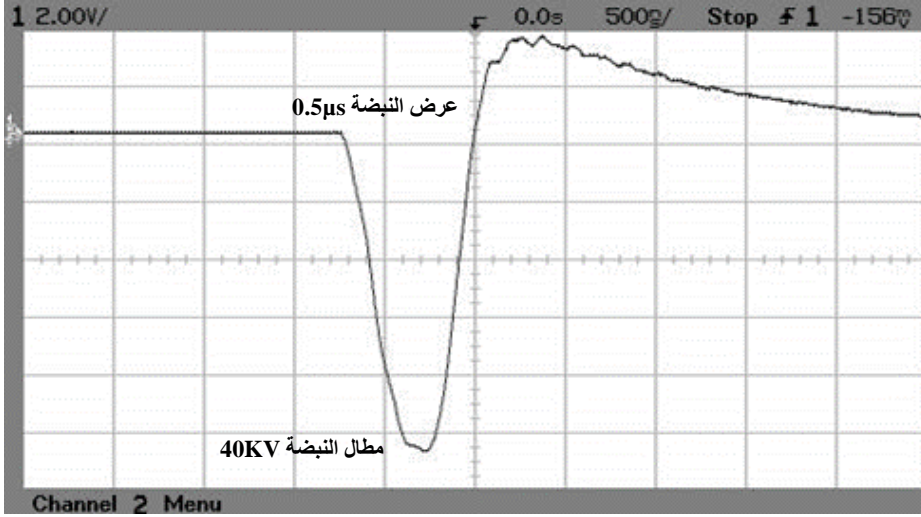


الشكل 18: صورة النظام المخبري

4-2-2- النتائج التجريبية

عند بدأ الاختبار قمنا برفع جهد الدخل بشكل تدريجي وعند وصول جهد الخرج النبضي إلى قيمة 5 KV ظهرت شرارات وانهيارات بين لفات المحول النبضي، لذلك قمنا بوضع المحول النبضي ضمن زيت عازل للجهد العالي لتجنب هذا الأثر، وبعد ذلك استمرينا برفع الجهد حتى القيمة المطلوبة لنبضات جهد الخرج وهي 40KV والتي تم قياسها باستخدام مسبار جهد عالي لنحصل على الشكل (19) الذي يُظهر نبضة جهد عالي واحدة على خرج المعدل بعرض نبضة 500 ns.

نعلم بأن حمل المعدل النبضي هو صمام مكروي (مغنترون مثلاً) والذي يعمل كديود زنر بجهد عالي، لذلك عند فتح كتلة قواطع الجهد العالي ستهبط قيمة الجهد العالي إلى قيمة جهد القطع للصمام (الجهد الذي لا يعمل عنده الصمام المكروي) وبالتالي سيغلق الصمام المكروي وينعدم التيار المُستجر من المعدل النبضي، لذلك سيتم تفريغ الجهد المتبقي في دارة المعدل النبضي من خلال العناصر الشاردية الموجودة فيها.



الشكل 19: نبضة الجهد المقاسة على خرج المعدّل النبضي

بالنتيجة النهائية نكون قد توصلنا إلى هدفنا المرجو بالحصول على نبضات جهد عالي 40KV، بعرض نبضة صغير 500ns، وتردد تكراري 2KHz، وتيار نبضي 25A، أي استطاعة نبضية 1MW وبمقارنة هذه النتيجة العملية مع نتيجة النمذجة الموضحة في الشكل (15) نلاحظ تطابق النتائج العملية مع نتائج النمذجة من حيث شكل النبضة وقيمة جهد نبضة الخرج 40KV وعرض النبضة 500ns، زمن صعود للنبضة 50ns وزمن هبوط 100ns، مما يدل على دقة التصميم ومطابقة التنفيذ العملي له، حيث تعود هذه النتيجة العملية الجيدة إلى المعالجة الجيدة للمحول النبضي من حيث تقليل قيم العناصر الطفيلية وإلى تحديد قيم عناصر السنبر بدقة جيدة مع التوزيع الجيد لترانزستورات الاستطاعة وفصل خطوط التيارات العالية في الدارة عن تيارات التحكم.

الاستنتاجات:

نستنتج من خلال الدراسة السابقة أنه باستخدام قواطع الحالة الصلبة عالية الاستطاعة وإضافة دارات ترشيح غير فعّالة، ودارة ترشيح فعّالة عن طريق إضافة ترانزستور استطاعة لقيادة مجموعة الترانزستورات الأخرى، نستطيع توليد نبضات جهد عالي مناسبة لاستخدامها في العديد من التطبيقات الرادارية بمواصفات جيدة وتقنية جديدة وكلفة قليلة مقارنة بالمعدّلات التقليدية القديمة مع ميزات غير موجودة في غيرها من التصاميم

كإمكانية تغيير قيمة جهد الخرج العالي بسهولة عن طريق تغيير قيمة جهد الدخل فقط، وكذلك إمكانية تغيير عرض النبضة والتردد التكراري للنبضات عن طريق تغيير مواصفات نبضات التحكم فقط وذلك بدون أي تغيير في عناصر النظام مما يعطي ميزة إضافية في إمكانية استخدام نفس النظام لعدد من التطبيقات (الرادارات) المختلفة فيما بينها بقيمة الجهد أو عرض النبضة والتردد التكراري.

التوصيات:

أهم التوصيات في نهاية هذا العمل أن يتم اعتماد هذا النظام بديلاً عن العديد من الأنظمة التقليدية القديمة الموجودة حالياً في رادارات الدفاع الجوي والتي انتهى عمرها الافتراضي وأصبح من الصعوبة بمكان إصلاحها لعدم توفر قطع التبديل لها كونها تعتمد على تكنولوجيا قديمة وإن توفرت فبأسعار مرتفعة جداً، وإضافةً لهذا الهدف الرئيسي يمكن تحقيق أهداف أخرى من بينها عملية توطين تقنية الجهود العالية النبضية في البلاد والسيطرة عليها كونه إلى الآن يتم استيراد هذه التقنية المهمة في العديد من التطبيقات المختلفة كتوليد الأمواج المكروية المستخدمة في التشويش على وسائط الاتصال ضمن منظومات الحرب الإلكترونية وكذلك في وحدات تغذية منابع الليزر المستخدم في آلات قص المعادن الصناعية.

المراجع:

- [1] G. K. Rao, S. Rao, S.K. Chaudhury, 2017. Networking of Tracking Radars of Two Different SAM Weapons. Defense Science Journal, December Defence science journal 68(1):70.
- [2] H. Rahman, 2019. Fundamental Principles of Radar. LLC, by Taylor & Francis Group, LLC.
- [3] C. Chipman, M. Gaudreau, L. Jashari, J. Kinross, M. Kempkes, R. Simpson, A. Wheelhouse, S. Griffiths, 2018. Daresbury Laboratory Short Pulse Klystron Modulators. International Power Modulator and High Voltage Conference (IPMHVC), IEEE.
- [4] I. Roth, 2016. Solid-State Thyatron Replacement. International Vacuum Electronics Conference.
- [5] M. Akemoto, S. fukuda, H. Honma, M. Kawamura, T. Natsui, H. Nakajima, T. Shidara, 2018. Present Status of the Klystron Modulator for SUPERKEKB Injector LINAC. High Energy Accelerator Research Organization Pulsed Power and Plasma Science Conference.
- [6] K. P Dixit, A. Tillu, R. Chavan, V. Yadav, H. Sarukte, 2014. Design and Development of Linear Type Modulators for High Impedance Electron Gun, International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (ISDEIV). India IEEE, the Institute of Electrical and Electronics Engineers; Piscataway, NJ (United States).
- [7] J. Gilbrech, S. Heidger, J. Schrock, J. Parker, R. Richter, 2019. a Compact Solid-State Trigger Generator Utilizing a Ferrite Loaded Air Core Transformer. IEEE Pulsed Power & Plasma Science (PPPS) Conference, Air Force Research Laboratory (AFRL)/RDH, Kirtland Air Force Base, under FA9451-17-D-0070.
- [8] H. Kim, C. Yu, S. Jang, G. Kim, 2018. Gate Driver Circuit for Short Pulse Generation in Solid-State Pulsed Power Modulators. IECON - 44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society.
- [9] A. Author, C. Author, Jr, 2014. Robust Design of Solid-State Pulsed Power Modulator Based on Modular Stacking Structure. IEEE Transactions on Power Electronics.

[10] Z. Zhanga, X. Tana, 2012. Review of High-Power Pulse Transformer Design. 18th International Vacuum Congress, CC BY-NC-ND license.

[11] M. Collins, C. Martins, 2019. Optimal Design of a High Voltage High Frequency Transformer and Power Drive System for Long Pulse Modulators. Lund University, European Spallation Source, IEEE Pulsed Power & Plasma Science (PPPS) Conference.

[12] N. Nishizuka, M. Nakatsuyama, H. Nagahashi, 1989. Analysis of Pulse Transformer on Distributed Parameter Theory. IEEE Transactions on Magnetics.

[13] X. Chen, L. Yu, T. Jiang, H. Tian, K. Huang, J. Wang, 2017. A High-Voltage Solid-State Switch Based on Series Connection of IGBTs for PEF Applications. IEEE Transactions on Plasma Science.

كشف نوبات الصرع من إشارات الدماغ EEG باستخدام LPC وLS-SVM

د. م. ألفت جولحة*

م. زينب دعدع**

ملخص

وفقاً لمنظمة الصحة العالمية WHO، مرض الصرع هو أحد الأمراض الأكثر شيوعاً التي تصيب الجهاز العصبي المركزي، ويتميز بحدوث نوبة الصرع بشكل مفاجئ. وإن القدرة على كشف النوبة بشكل سريع ودقيق آلياً سيدفع للحصول على لمساعدة الطبية الفورية وبتقادي الإصابات الناتجة عنها. يستخدم في هذا البحث الترميز التنبؤي الخطي LPC (Linear Predictive Coding) لاستخلاص سمات نوبات الصرع من إشارات الدماغ EEG (Electroencephalogram). ثم يجري تمرير تلك السمات إلى مصنف LS-SVM (Least Square-Support Vector Machine) لكشف وجود نوبة الصرع من عدم وجودها باستخدام برنامج MATLAB. وأظهرت النتائج تحسناً ملحوظاً في دقة كشف نوبات الصرع بنسبة 98.66% بينما كانت أعلى نسبة كشف في الدراسات السابقة هي 97.6%.

الكلمات المفتاحية: كشف نوبة الصرع، الترميز التنبؤي الخطي LPC، LS-SVM.

*مدرس، قسم هندسة الحاسبات والتحكم الآلي، كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية، جامعة تشرين، اللاذقية، سورية.

**طالبة دراسات عليا (ماجستير)، قسم هندسة الحاسبات والتحكم الآلي، كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية، جامعة تشرين، اللاذقية، سورية.

Epilepsy Seizures Detection from EEG Signals Using LPC and LS-SVM

Dr. Oulfat Jolaha*
Eng. Zeinab Dadaa**

Abstract

According to World Health Organization (WHO), epilepsy is one of the most common primary diseases of the central nervous system, which characterizes by epileptic seizures. Thus, the ability to automatically detecting epileptic seizure leading to fast medical assistance. In this research, LPC (Linear Predictive Coding) was used for features extraction of epileptic seizures in EEG (Electroencephalography) signals. Then these features were classified using Least Square-Support Vector Machine (LS-SVM) classifier to detect epilepsy seizure. MATLAB was used for modeling the proposed system, results showed a noticeable improvement in detection epilepsy seizures compared with previous studies.

Keywords: Epileptic seizures Detection, LPC, LS- SVM Classifier.

*PhD Doctor, Department of Computer and Automatic Control Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

**Postgraduate Student, Department of Computer and Automatic Control Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

1- مقدمة

تعتبر إشارة الدماغ Electroencephalogram (EEG) مهمة جداً لتشخيص مرض الصرع، حيث تحتوي تسجيلات EEG لمريض الصرع على كمية كبيرة من البيانات. لذلك يتطلب كشف البؤر الصرعية تحليلاً كاملاً لإشارات الدماغ EEG وغالباً ما تتجز من قبل الخبراء [1]. بذلت جهود عديدة ونشرت أبحاث كثيرة للكشف الآلي لنوبات الصرع التي تختلف من مريض لآخر ومن نوبة لأخرى عن طريق تسجيلات إشارات الدماغ EEG وECOG. ومن الدراسات التي استخدمت طرق تعلم الآلة الدراسة [2] التي صنفت إشارة ECOG إلى إشارات تدل على وجود صرع من عدم وجوده باستخدام آلية شعاع الدعم (Support Vector Machine) SVM وطرق تحليل المكونات PCA (Principal Component analysis) وICA (Independent Component Analysis)، وجد أنها تعطي حساسية 98% ونوعية 80%، ولكنها تستغرق زمن تشغيل كبير لتحليل المكونات. تم تحليل إشارات الدماغ EEG وتصنيفها لاكتشاف مستويات مخاطر الصرع باستخدام مصنفين: الأول مصنف Fuzzy يعمل بالاعتماد على الميزات المستخلصة من إشارات دماغ المريض مثل الطاقة والتباين والحدة في موجات الدماغ، والمصنف الثاني مصنف آلية شعاع الدعم SVM والإنتروبيا النسبية بحدودها الدنيا وذلك لتحقيق الأمثلية وتحسين التصنيف، وتم استخدام بيانات 10 مرضى وكانت الحساسية 97.07% والنوعية 97% [3]. استخدم التعلم العميق لكشف وتصنيف نوبات الصرع باستخدام CNN (Convolution Neural Network) فكانت الدقة 88.6% والنوعية 90% والحساسية 95% [4]. تم كشف تغير معدل نبضات القلب المتعلقة بنوبات الصرع باستخدام مراقب قلبي صالح للارتداء يعمل لاسلكياً وتم الكشف باستخدام WiSARD Neural Network وDWT (Discrete Wavelet Transform)، فكانت الدقة جيدة ولكن الأجهزة اللاسلكية تستهلك طاقة كبيرة [5]. وكذلك تم استخدام كلٍ من DT (Decision Tree) وSVM و

(Random Forest) RF و (Continuous Wavelet Transform) CWT و DWT و ANN (Artificial Neural Network) لاستخلاص السمات وكشف نوبات الصرع فكانت الدقة لكل من خوارزمية SVM و KNN و DT و ANN هي 97.6% و 97% و 97.6% و 97.4%، على التوالي [6]. ووجد أن استخدام DWT متعدد المستويات وبحزم مختلفة وبتطبيق التوابع الإحصائية الآتية: variance و mean و Skewness و MAV و Shannon entropy و (Standard Deviation) SD و (Mean Absolut Value) يستهلك زمناً حسابياً كبيراً [6]. في حين أنه عند استخدام CNN و CWT في كشف نوبة الصرع من إشارات الدماغ EEG كانت دقة التصنيف 93.5% [7]. واستخدم FFT و (Fast Fourier Transform) و (short-time Fourier Transform) STFT و WT و (Wavelet Transforms) مع CWT و CNN لكشف وتصنيف نوبة الصرع من إشارات الدماغ EEG فكانت الدقة 93.60% [8].

يلاحظ في الدراسات المذكورة أن أعلى دقة كشف تم التوصل إليها هي 97.6% [6]، لذا استخدم في هذا البحث LPC ومصنف LS-SVM من أجل زيادة دقة الكشف بالنسبة للدراسات المرجعية السابقة.

2- هدف البحث وأهميته

بناء نظام لتحسين دقة كشف نوبات الصرع باستخدام الترميز التنبؤي الخطي LPC ومصنف LS-SVM. يمكن هذا النظام من حصول المصاب على المساعدة الطبية الفورية مما يقيه من الإصابات الناتجة عن النوبة. كما أن تحليل EEG المنجز بصرياً من قبل الأطباء يستهلك وقتاً، لذلك فإن تقنيات معالجة إشارات الدماغ EEG تساعد في تسريع هذه العملية وتسمح للمستخدمين الطبيين بتمييز حالات الصرع بدقة.

3- مواد وطرق البحث

اعتمدت قاعدة بيانات من جامعة Bonn الألمانية [12]، وهي تتألف من 5 مجموعات لإشارات تخطيط دماغ، كل مجموعة منها تتألف من 100 مقطع، مدة كل مقطع 23.6 ثانية أخذت من الأشخاص باستخدام 32 قطب كآآتي [9]:

- المجموعتان F,N: أخذت من أشخاص بحالة Inter Ictal.
- المجموعتان Z,O: أخذت من أشخاص أصحاء.
- المجموعة S: أخذت من أشخاص بحالة Ictal.

استخدم برنامج MATLAB R2014a وحاسب بمعالج N2810 @2.00GHz.

مرض الصرع هو اختلال عصبي داخلي ينتج عن اضطرابات الخلايا الكهربية في خلايا المخ والخلل القائم في العملية الكهربية الدماغية، والعرض الأساسي الجامع لكل أشكال الصرع هو فقدان الوعي بالإضافة إلى حدوث تشنجات ونوبات أحياناً [1]. وتقسم النوبة الصرعية إلى المراحل الآتية [1] و[9]:

1. Pre-Ictal: تحدث تماماً قبل 30 إلى 60 دقيقة من بداية نوبة الصرع.
2. Ictal: تعرف كنوبة صرع تستمر من 1 إلى 3 دقائق يضعف خلالها نشاط الدماغ.
3. Inter-Ictal: تحدث بين نوبتي صرع متتاليتين ويمكن أن تميز نشاط دماغي شاذ أو طبيعي.
4. Post-Ictal: هي الحالة التي يتعافى فيها الدماغ من النوبة الصرعية وتتراوح مدتها بين 30 إلى 60 دقيقة بعد النوبة الحقيقية.

إشارة تخطيط الدماغ EEG هي تسجيل للنشاط الكهربائي التلقائي للدماغ خلال فترة من الزمن. تتركز الاستعمالات التشخيصية بشكل عام على المحتوى الطيفي لتخطيط أمواج الدماغ. ويستخدم تخطيط الدماغ بشكل كبير لتشخيص مرض الصرع الذي يسبب أنماطاً غير طبيعية في قراءات التخطيط الدماغية. إن وجود نشاطات صرع في إشارات EEG يؤكد تشخيص مرض الصرع عند المريض، وهذه النشاطات تشبه إطلاق شرارة spike أو

موجات حادة sharp wave، تتراوح مدة الشرارة بين 20-70 ميلي ثانية وتتبعها موجة حادة لمدة 70-200 ميلي ثانية [1] و [9].

3-1 نظام كشف نوبات الصرع المقترح

أول مرحلة في نظام كشف نوبات الصرع المقترح هي إزالة الضجيج باستخدام مرشح تمرير منخفض يعمل بتردد قطع $Cutoff = Fs/8 = 21.7 \text{ HZ}$ حيث $Fs = 173.6 \text{ HZ}$ وذلك لأن الترددات التي تعطي معلومات مهمة عن نوبات الصرع تقع في المجال الترددي لموجات إلفا (α) ودلتا (δ) الدماغية التي تتراوح تردداتها بين [0-4 HZ] لموجات (α) و [8-16 HZ] لموجات ودلتا (δ).

وفي المرحلة الثانية يتم تحويل إشارات الدماغ EEG الناتجة إلى المجال الترددي باستخدام تحويل فورييه السريع FFT، وهو تحويل يحسب قيمة تحويل فورييه المتقطع DFT بسرعة، وتعود سرعته لعدم حسابه للأجزاء التي مجموعها يساوي صفر في تحويل فورييه المتقطع [10]. وتبنى فكرة هذا التحويل على تجزئة التتابع $s(n)$ إلى عدد من التتابعات الفرعية الأصغر طولاً حيث n متغير في المجال الزمني. ولإيضاح مبدأ التقسيم في الزمن نعتبر الحالة الخاصة عندما يكون $N = 2^M$ حيث M عدد صحيح موجب أكبر من الواحد وبما أن N عدد زوجي يمكن تجزئة التتابع $s(n)$ إلى تتابعين فرعيين متساويين كل منهما بطول $N/2$ ، التتابع الأول $g(n)$ من العينات ذات الترتيب الزوجي $0, 2, 4, \dots, N-2$ والتتابع الثاني $h(n)$ من العينات ذات التتابع الفردي $1, 3, 5, \dots, N-1$ وفق المعادلة الآتية [10]:

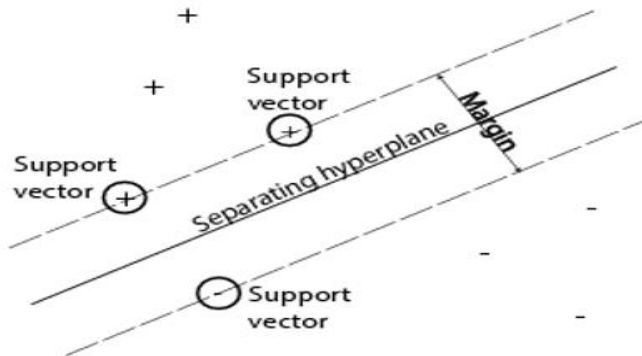
$$s(k) = \sum_{r=0}^{\frac{N}{2}-1} s(2r) W_{N/2}^{rk} + W_N^K \sum_{r=1}^{\frac{N}{2}-1} s(2r+1) W_{N/2}^{rk} \quad (1)$$

$$\text{حيث } W_{N/2} = e^{-j\frac{2\pi}{N/2}} \quad \text{و} \quad r = 0, 1, 2, 3, \dots, \frac{N}{2} - 1$$

وبعد الحصول على الإشارة في المجال الترددي يتم استخلاص السمات باستخدام الترميز التنبؤي الخطي LPC، الذي يعتمد على فكرة أنّ العينة الحالية يمكن أن تكون بشكل تقريبي مجموعة خطية من العينات السابقة توصف رياضياً بالعلاقة [11]:

$$s(n) \approx a_1 s(n-1) + a_2 s(n-2) + \dots + a_p s(n-p) \quad (2)$$

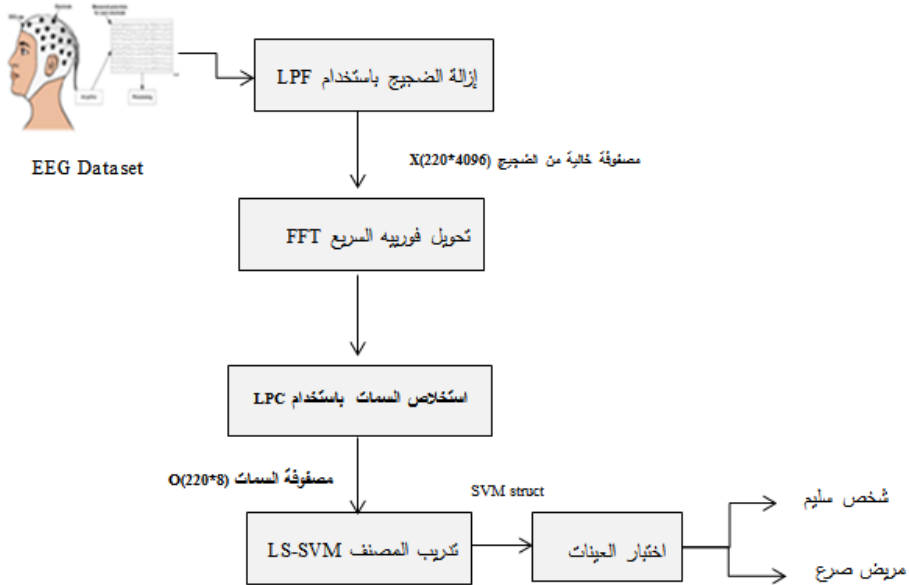
حيث تمثل n طول السلسلة و p يمكن أن تكون عدداً ما من 1 إلى $n - 1$ والترميز التنبؤي الخطي يحسب مجموعة المعاملات $\{a_k\}$ التي تصف التشكيلات الموجية المميزة Formants، وهي تمثل الترددات عند القمم الاهتزازية resonant peaks وتدعى ترددات الموجة المميزة. يتم تخمين مواقع هذه الترددات المميزة في إشارة EEG عن طريق حساب معاملات التنبؤ الخطي $\{a_k\}$ على طول الإشارة وإيجاد القمم في الطيف الناتج عن مرشح النموذج التنبؤي الخطي. ومن ثم تبدأ مرحلة تدريب المصنف LS-SVM الذي يعمل على تصغير مجموع مربعات الأخطاء للتابع الهدف. يقوم مصنف SVM في حالة التصنيف الثنائي بإيجاد أفضل مستوي يفصل جميع نقاط الصنف الأول عن جميع نقاط الصنف الثاني، وأفضل مستوي حدي هو المستوي الذي يملك أكبر هامش بين الصنفين، ويعني الهامش العرض الأعظمي للكتلة الموازية للمستوي التي ليس لها نقاط بيانات داخلية وموجهاً الدعم هي نقاط البيانات الأقرب إلى مستوي الفصل وهذه النقاط على حد الكتلة الموازية لمستوي الفصل، وهذا مبين في الشكل (1) [3]. تستخدم ثلاث طرق في مصنف SVM هي البرمجة الخطية من الدرجة الثانية QP، والتحسين التسلسلي الأدنى SMO وهي خوارزمية لحل مشكلة البرمجة التربيعية التي تنشأ أثناء تدريب المتجهات الداعمة وهي الطريقة الافتراضية للمصنف SVM، ولقد جرى في هذا البحث استخدام طريقة المربعات الصغرى LS-SVM التي يتم فيها تحليل البيانات والتعرف على الأنماط.



الشكل (1) مصنف SVM [3].

2-3 مخطط نظام كشف نوبات الصرع المقترح

يبين المخطط في الشكل (2) خطوات كشف نوبات الصرع في النظام المقترح حيث يتم إدخال بيانات إشارات EEG وبعدها يتم إزالة الضجيج منها باستخدام المرشح filterfft وهو مرشح تمرير منخفض LPF الذي ينتج مصفوفة خالية من الضجيج $X(220*4096)$ ، ومن ثم يتم تحويل الإشارات إلى المجال الترددي باستخدام تحويل فورييه السريع FFT، ليتم استخلاص سمات المصفوفة X باستخدام الترميز التنبؤي الخطي LPC وتنتج مصفوفة السمات التي تمثل معاملات التنبؤ الخطي $O(220*8)$ وتستخدم في تدريب المصنف LS-SVM. وبعدها يتم تدريب المصنف واختباره على مجموعة من العينات ليكون خرج الاختبار إما شخص مصاب بالصرع أو شخص سليم. من المهم في إشارة EEG أن تكون الإشارة موصوفة بصيغة رياضية سهلة وبسيطة مع الاحتفاظ بكل خصائص الإشارة لذلك تم استخدام LPC في هذا البحث.

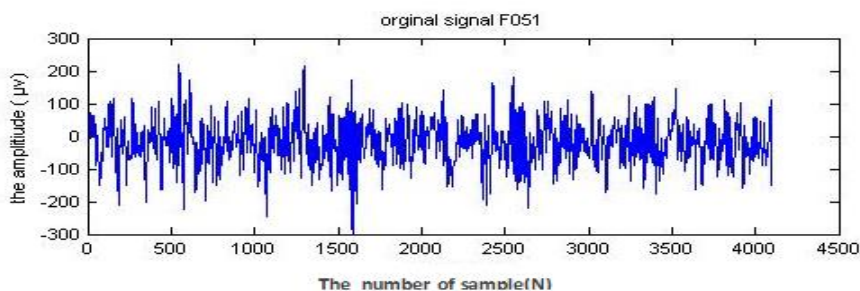


الشكل (2) مخطط نظام كشف نوبات الصرع المقترح.

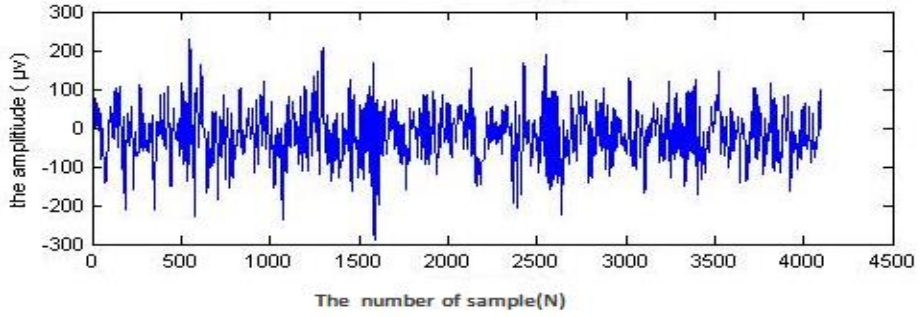
4- النتائج ومناقشتها

جرى إدخال 220 إشارة EEG مأخوذة من قاعدة البيانات لمجموعة أشخاص أصحاء وأشخاص في حالة نوبة الصرع Inter-Ictal و Ictal على نظام كشف نوبات الصرع المقترح، حيث تم إزالة الضجيج من إشارات EEG المدخلة باستخدام مرشح تمرير منخفض LPF، ومن ثم تحويل الإشارات للمجال الترددي باستخدام تحويل فورييه السريع FFT وبعد ذلك تم استخلاص السمات باستخدام الترميز التنبؤي الخطي LPC بأكثر من درجة. استخدم برنامج MATLAB في نمذجة نظام كشف نوبات الصرع المقترح، وتم عرض 3 إشارات من إشارات EEG الأصلية فقط كأمثلة مع نتيجة إزالة الضجيج منها وعرض نتائج الترميز التنبؤي الخطي LPC باستخدام درجات مختلفة وذلك في الأشكال من الشكل (3) إلى الشكل (17)، ولوحظ أن الدرجة 8 هي الأنسب فالدرجات الأكبر من هذه الدرجة تعطي تغيرات في الإشارة قليلة جداً ولا تفيد في التصنيف.

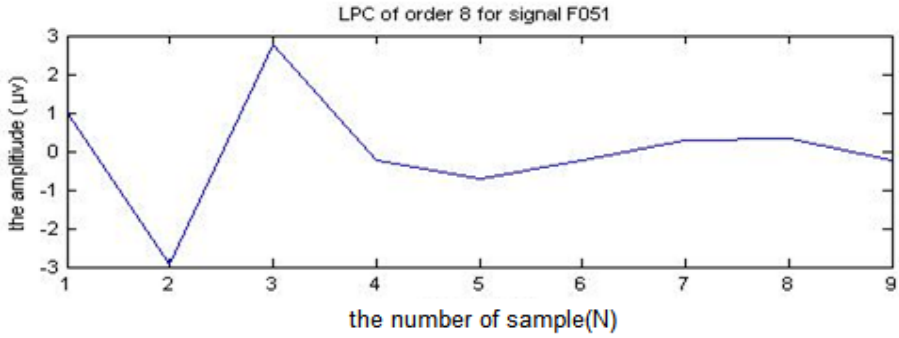
يبين الشكل (3) إشارة EEG الأصلية للإشارة F051 وهي لشخص مريض صرع بحالة النوبة INTER ICTAL. نلاحظ وجود موجات عابرة بشكل شرارات مفردة أو متتالية وموجات حادة أو موجات حادة تتبعها شرارة ولكنها بشكل عابر ولا تظهر على طول التسجيل الكهربائي لإشارة EEG. بينما يبين الشكل (4) الإشارة F051 بعد إزالة الضجيج منها باستخدام مرشح تمرير منخفض LPF بتردد قطع 21.7 HZ. والأشكال (5) و (6) و (7) تبين معاملات التنبؤ الخطي المستخلصة من الإشارة F051 بدرجات تنبؤ مختلفة، التي تمثل قيم تخمينية لمواقع الترددات المميزة عند القمم الاهتزازية في طيف الإشارة.



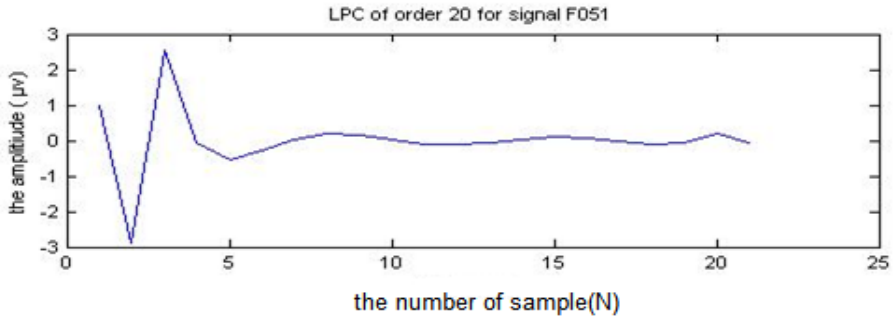
الشكل (3) إشارة EEG الأصلية للإشارة F051.



الشكل (4) إشارة F051 خالية من الضجيج.

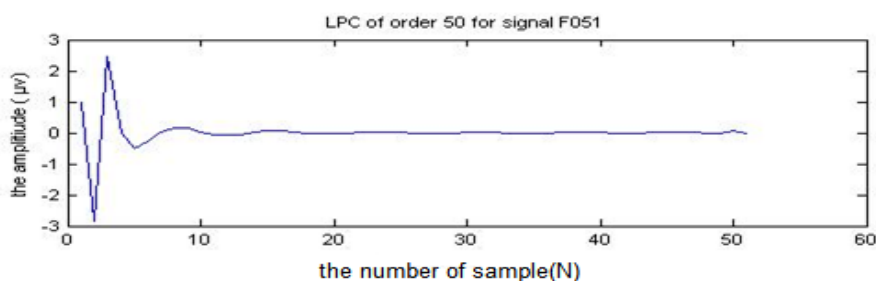


الشكل (5) الترميز التنبؤي الخطي للإشارة F051 من الدرجة 8.

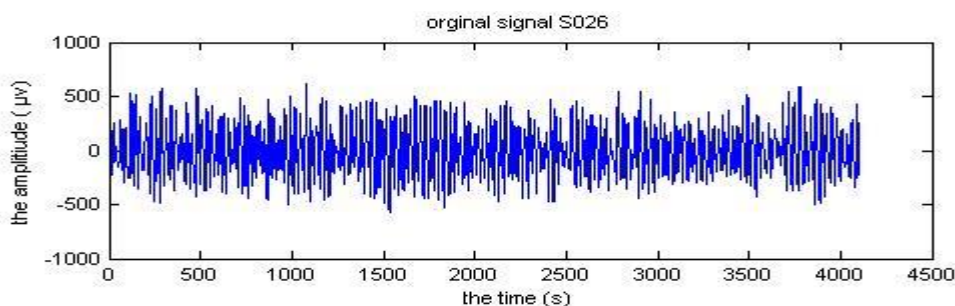


الشكل (6) الترميز التنبؤي الخطي للإشارة F051 من الدرجة 20.

يبين الشكل (8) إشارة EEG الأصلية للإشارة S026 وهي لشخص مريض صرع بحالة النوبة ICTAL. نلاحظ وجود إطلاقات مستمرة من الموجات غير المنتظمة والمطالات والترددات المتغيرة ووجود شرارات تتبعها موجات حادة معقدة ووجود فرط تزامن إيقاعي أو خمول في كهربائية الدماغ أطول من معدلاته خلال حالات InterIctal. والشكل (9) يبين الإشارة S026 بعد إزالة الضجيج منها باستخدام مرشح تمرير منخفض LPF بتردد قطع 21.7 HZ. الأشكال (10) و(11) و(12) تبين معاملات التنبؤ الخطي المستخلصة من الإشارة F051 بدرجات تنبؤ مختلفة، التي تمثل قيم تخمينية لمواقع الترددات المميزة عند القمم الاهتزازية في طيف الإشارة.



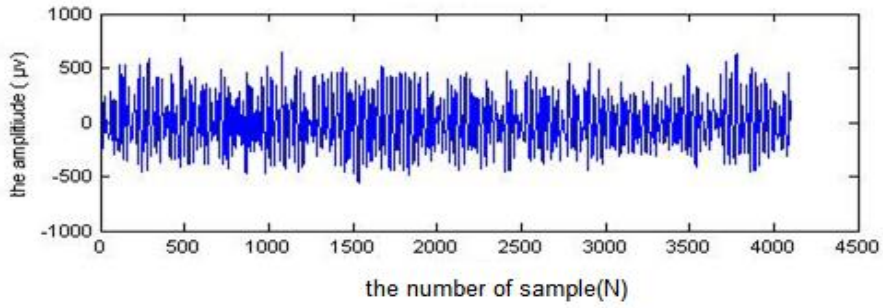
الشكل (7) الترميز التنبؤي الخطي للإشارة F051 من الدرجة 50.



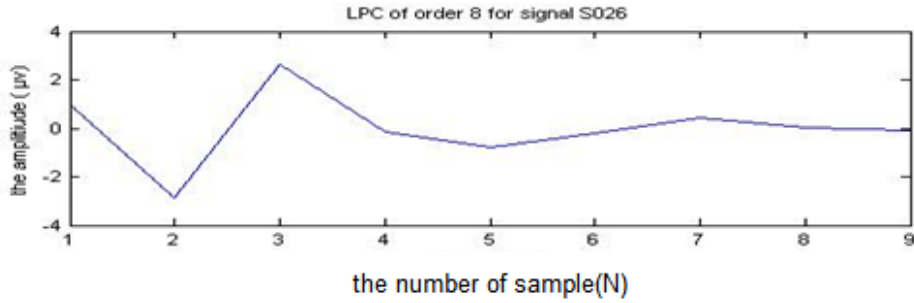
الشكل (8) إشارة EEG الأصلية للإشارة S026.

يبين الشكل (13) إشارة EEG الأصلية للإشارة F051 وهي لشخص سليم ونلاحظ أنها إشارة دماغ طبيعية لا يوجد فيه شذوذ أو موجات غير طبيعية. والشكل (14) يبين

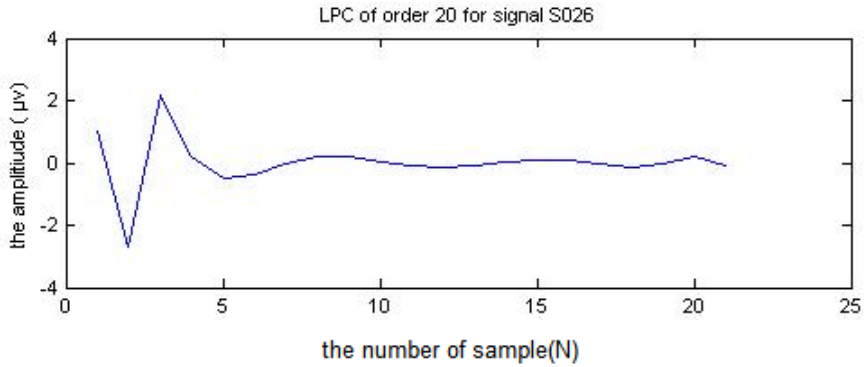
الإشارة O079 بعد إزالة الضجيج منها باستخدام مرشح تمرير منخفض LPF بتردد قطع .21.7HZ



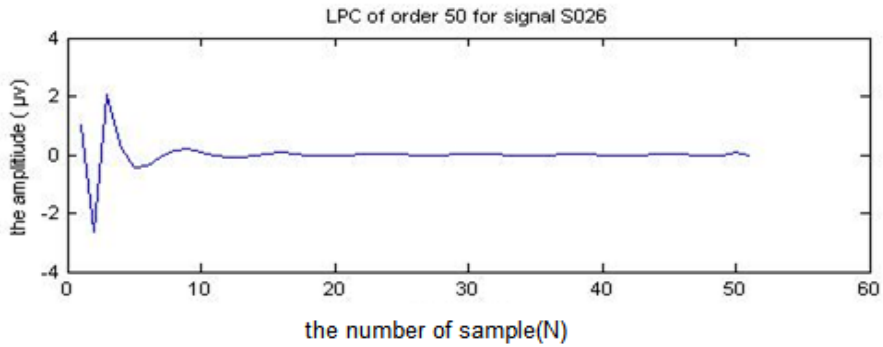
الشكل (9) إشارة S026 خالية من الضجيج.



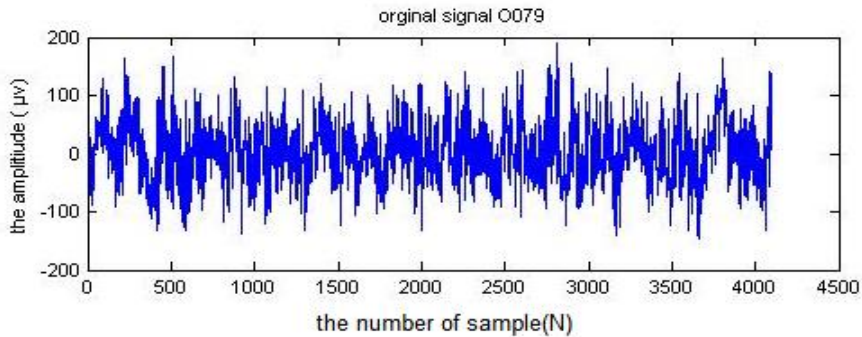
الشكل (10) الترميز التنبؤي الخطي للإشارة S026 من الدرجة 8.



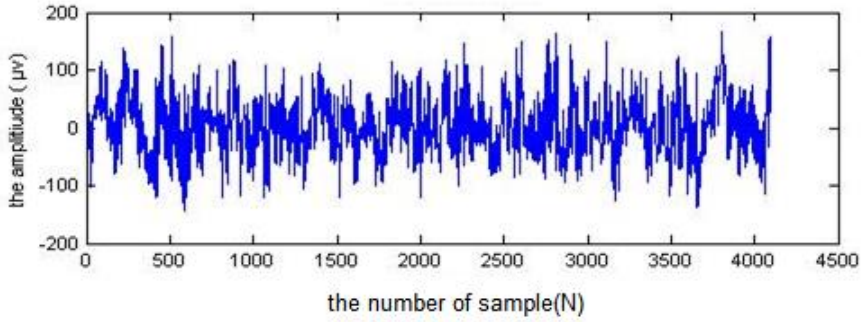
الشكل (11) الترميز التنبؤي الخطي للإشارة S026 من الدرجة 20.



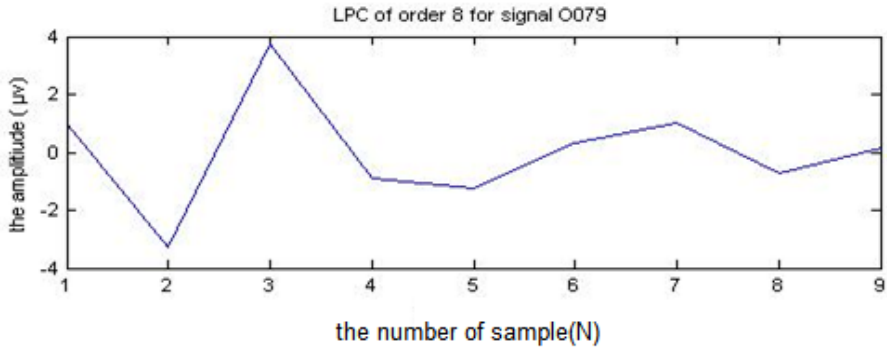
الشكل (12) الترميز التنبؤي الخطي للإشارة S026 من الدرجة 50.



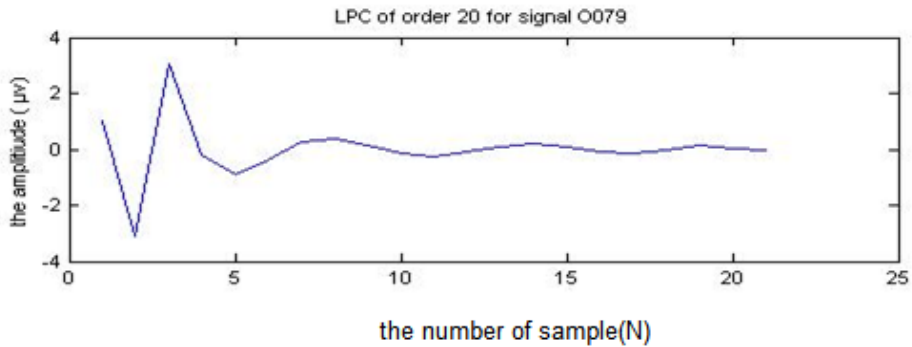
الشكل (13) إشارة EEG الأصلية للإشارة O079.



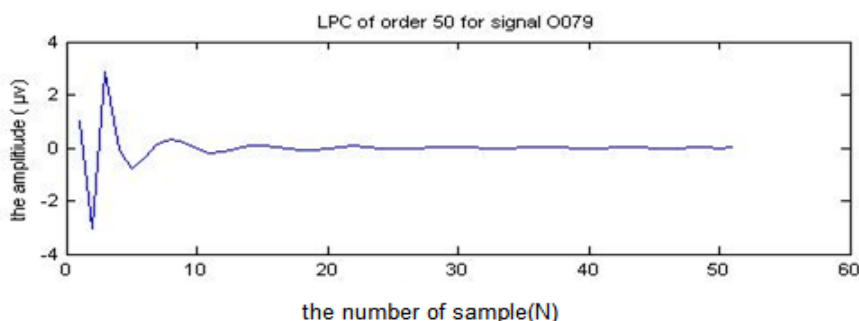
الشكل (14) إزالة الضجيج للإشارة O079.



الشكل (15) الترميز التنبؤي الخطي للإشارة O079 من الدرجة 8.



الشكل (16) الترميز التنبؤي الخطي للإشارة O079 من الدرجة 20.



الشكل (17) الترميز التنبؤي الخطي للإشارة O079 من الدرجة 50.

بينما تبين الأشكال (15) و(16) و (17) معاملات التنبؤ الخطي المستخلصة من الإشارة O079 بدرجات تنبؤ مختلفة، التي تمثل قيم تخمينية لمواقع الترددات المميزة عند القمم الاهتزازية في طيف الإشارة.

تم تدريب المصنف LS-SVM باستخدام 220 عينة تدريب ومن ثم اختباره على 250 عينة من قاعدة البيانات. يبين الجدول (1) نتائج التصنيف لبعض عينات EEG وتوافقه مع التصنيف الحقيقي للإشارة الذي يمثل رأي الخبراء حسب قاعدة البيانات المستخدمة. بينما الجدول (2) يعطي نتائج اختبار المصنف على مجموعات جزئية من قاعدة البيانات. ولدراسة أداء أي مصنف في مجال التحليل التنبؤي تعد مصفوفة الارتباك (confuse matrix) من أفضل المقاييس. يبين الشكل (18) عناصر مصفوفة الارتباك وهي [13]:

- True Positive (TP) نحصل عليه عندما يكون تصنيف المصنف ايجابي والتصنيف الحقيقي ايجابي بمعنى أن المصنف أصاب 'hit'.
- True Negative (TN) نحصل عليه عندما يكون تصنيف المصنف للعينة سلبى والتصنيف الحقيقي سلبى أي بمعنى الرفض الصحيح correct rection .

- False Positive (FP) نحصل عليها عندما يكون تصنيف المصنف للعينة ايجابيا والتصنيف الحقيقي سلبي أي خطأ نوع I .
- False Negative (FN) نحصل عليه عندما يكون تصنيف المصنف للعينة سالب والتصنيف الحقيقي موجب أي خطأ من النوع II.

		Ground Truth	
		Positive	Negative
Prediction	Positive	True Positives	False Positives
	Negative	False Negatives	True Negatives

الشكل (18) مصفوفة الارتباك [13].

تعرف حساسية *sensitivity* المصنف بأنها النسبة المئوية للأشخاص المصابين بالمرض وتم تشخيص إصابتهم بالمرض بشكل صحيح من قبل المصنف وتحسب بتطبيق العلاقة [13]:

$$sensitivity = \frac{TP}{TP+FN} * 100\% \quad (3)$$

والنوعية *specifity* هي النسبة المئوية للأشخاص الأصحاء الذين تم تشخيصهم بأنهم غير مصابين بالمرض من قبل المصنف وتحسب بتطبيق العلاقة [13]:

$$specifity = \frac{TN}{TN+FP} * 100\% \quad (4)$$

أما الدقة *precision* فتعبر عن نسبة النواحي الإيجابية المميزة بشكل صحيح وتحسب بتطبيق العلاقة [13]:

$$precision = \frac{TP}{positive\ output} \quad (5)$$

يبين الجدول (1) نتائج التصنيف لبعض عينات EEG المستخدمة في قاعدة البيانات. بينما يقدم الجدول (2) تقييماً لأداء نظام كشف نوبات الصرع المقترح، فمثلاً من أجل المجموعة F+N+O يعطي نظام الكشف المقترح دقة 99% وحساسية 100% ونوعية 98%، وعند اختباره على إشارات من جميع مجموعات قاعدة البيانات F+N+S+Z+O يعطي دقة 98.66% وحساسية 98.66% ونوعية 98%. ومن خلال مقارنة هذه النتائج مع الدراسات السابقة كما في الجدول (3) نلاحظ تحسناً في دقة التصنيف والحساسية والنوعية للمصنف المقترح وذلك لأن استخدام LPC في تحليل السلاسل الزمنية دقيق رياضياً وبسيط في الحساب والتطبيق ويحتفظ بكل خصائص الإشارة.

حيث تم حساب بارامترات الأداء باستخدام معادلات نفذت باستخدام برنامج MATLAB وفق العلاقات (3) و(4) و(5) وذلك بعد الحصول على عناصر مصفوفة الارتباك.

نلاحظ من الجدول (3) أن النظام المقترح تفوق على النظام في الدراسة [2] من ناحية النوعية والحساسية وعلى الأنظمة في الدراسات [3] و[4] و[6] و[8] من ناحية الدقة. ورغم أن الحساسية في النظام [4] هي 100% إلا أن نظام كشف نوبات الصرع المقترح قد حقق نوعية ودقة أكبر وذلك لأن المجموعة الأفضل من معاملات التنبؤ الخطي تقلل مربع متوسط الخطأ التنبؤي في إشارات EEG وطريقة المربعات الصغرى LS المستخدمة في مصنف SVM تعمل على اختيار الخط المستقيم الأفضل الذي يحقق أن مربعات أبعاد النقاط عن هذا الخط أقل ما يمكن.

الجدول(1) نتائج التصنيف لبعض عينات EEG المستخدمة في قاعدة البيانات.

رقم العينة	رأي الخبراء	نتيجة المصنف	التوافق
F051	مريض صرع	مريض صرع	√
F052	مريض صرع	مريض صرع	√
F053	مريض صرع	مريض صرع	√
F054	مريض صرع	مريض صرع	√

كشف نوبات الصرع من إشارات الدماغ EEG باستخدام LPC و LS-SVM

F055	مريض صرع	مريض صرع	√
F060	مريض صرع	مريض صرع	√
N026	مريض صرع	مريض صرع	√
S056	مريض صرع	مريض صرع	√
S058	مريض صرع	مريض صرع	√
S059	مريض صرع	مريض صرع	√
S060	مريض صرع	شخص سليم	×
Z039	شخص سليم	مريض صرع	×
Z040	شخص سليم	شخص سليم	√
Z041	شخص سليم	شخص سليم	√
O060	شخص سليم	شخص سليم	√

الجدول (2) تقييم الأداء لنظام كشف نوبات الصرع المقترح.

مجموعة الاختبار	الدقة	الحساسية	النوعية	Confusion Matrix Parameters
F+N+S	98.3%	98.66%	98%	TP=148 FN=2 TN=98 FB=2
F+N+Z	98.66%	100%	96%	Tp=100 FN=0 FB=2 TN=48
F+N+O	99%	100%	98%	TP=100 FN=0 FB=1 TN=49
F+S+Z	98%	98%	96%	TP=98 FN=2 FB=2 TN=48
F+S+Z+O	98.5%	100%	97%	TP=100 TN=97 FB=3 FN=0
F+N+S+Z+O	98.66%	98.66%	98%	TP=148 TN=98 FB=2 FN=2

الجدول (3) مقارنة بارامترات أداء نظام كشف نوبات الصرع المقترح مع الدراسات السابقة.

رقم الدراسة	الدقة	الحساسية	النوعية
[2]	-	98%	80%

[3]	-	97.07%	97%
[8]	90%	100%	83.3%
[6]	SVM: 97.6% KNN: 97% DT: 97.6% ANN: 97.4%	-	-
[4]	88.67%	90%	95%
[7]	93.5%	-	-
[8]	93.6%	-	-
الدراسة الحالية	98.66%	98.66%	98%

5- الاستنتاجات

جرى استخلاص سمات إشارات EEG لكشف وجود نوبة صرع ووجد أنه باستخدام الترميز التنبؤي الخطي LPC من الدرجة 8 واستخدام مصنف LS-SVM أمكن الحصول على دقة كشف لنوبة الصرع بنسبة 98.66% وحساسية بنسبة 98.66% ونوعية بنسبة 98% على عينات EEG، وهذه النتائج تدل على قوة النظام المقترح في كشف نوبة الصرع بالمقارنة مع الدراسات السابقة.

6- التوصيات والمقترحات

تعديل المصنف السابق لتصنيف جزئي لحالة Pre-Ictal التي تحدث تماما قبل 30 إلى 60 دقيقة من بداية نوبة الصرع وذلك باستخدام قاعدة بيانات حالة النوبة InterIctal التي تحدث بين نوبتين صرعيتين متتاليتين وذلك في حال عدم توفر قاعدة بيانات لحالة Pre-Ictal مما يسهم بشكل فعال في التنبؤ بحدوث النوبة بدقة وتقديم العلاج اللازم بسرعة.

7- المراجع

- [1] ZHOU, J., 2014 - **A Study of Automatic Detection and Classification of EEG Epileptiform Transients**. PhD Thesis, Clemson University, 139p.
- [2] BALASUBRAMANIAN, P., 2014 - **Automated Classification of EEG Signals Using Component Analysis and Support Vector Machines**, Master Thesis, Grand Valley State University, 90 p.
- [3] GURUMURTHY, S., and TRIPATHY, B. K., 2015 - Classification and Analysis of EEG Brain Signals for Finding Epilepsy Risk Levels Using SVM. **World Applied Sciences Journal**, Vol. 33 (4), 631-639.
- [4] ACHARYA, U. R., OH, S. L., HAGIWARA, Y., TAN, J. H., and ADELI, H., 2018 - Deep Convolutional Neural Network for the Automated Detection and Diagnosis Of Seizure Using EEG Signals. **Computers in Biology and Medicine**, Vol. 100, 270–278.
- [5] RAO, P.V., AKILAN, S., DHIVAKA, V., and KARTHIKEYAN, D., 2016 - Epilepsy Seizure Detection Using EEG - Curvelet Feature Selection and SVM Classification, **International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering (IJARCCE)**, Vol. 5, Issue 3, March.
- [6] AL-QEREM, A., KHARBAT, F., NASHWAN, S., ASHRAF, S., and BLAOU, K. 2020 - General Model for Best Feature Extraction of EEG Using Discrete Wavelet Transform Wavelet Family and Differential Evolution, **International Journal of Distributed Sensor Networks**, Vol. 16 (3).
- [7] ZHAO, W., et. al., 2020 - A Novel Deep Neural Network for Robust Detection of Seizures Using EEG Signals, **Computational and Mathematical Methods in Medicine**, Hindawi, Vol. 2020.
- [8] TÜRK, Ö., and ÖZERDEM, M. S., 2019- Epilepsy Detection by Using Scalogram Based Convolutional Neural Network From EEG Signals, **Brain Sciences**, **MDPI**, Vol. 9, 115.

- [9] PROEKT, A., 2018 - Brief Introduction to Electroencephalograph. **Elsevier Inc., Methods in Enzymology**, Vol. 603, 257-273.
- [10] OBERST, U., 2007 - The Fast Fourier Transform. **SIAM Journal and Control and Optimization**, Vol. 46(2), 496-540.
- [11] SIWALANKERTO, J., et. al., 2015- Speech Recognition Using Linear Predictive Coding and Artificial Neural Network for Controlling Movement of Mobile Robot, **International Conference on Information and Electronics Engineering (IPCSIT)**, Vol. 6, IACSIT Press, Singapore.
12. <http://www.epileptologie-bonn.de>. Accessed Nov. 2017.
13. JU´AREZ-GUERRA, E. and ALARCON-AQUINO, V., and Juárez-Guerra, E., Alarcon-Aquino, V., & Gómez-Gil, P., 2011 - Epilepsy Seizure Detection in EEG Signals Using Wavelet Transforms and Neural Networks. **New Trends in Networking, Virtual International Conference on Computing, E-Learning, Systems Sciences, and Engineering (CSSE)**, 261–269.

