

رفع وثوقية وحدة قيادة مركزية للمضخة الرئيسية في جهاز القلب الرئة باستخدام تقنيات التسامح بالخطأ

م. بيان موعد⁽¹⁾

د.م. أحمد خضور⁽²⁾

الملخص

يهدف هذا البحث إلى رفع وثوقية وحدة القيادة للمضخة الرئيسية في جهاز القلب - الرئة باستخدام تقنيات التسامح بالخطأ المتمثلة بمبدأ الدعم من خلال استخدام كتلة إضافية مماثلة للكتلة الرئيسية عتادياً وبرمجياً وربطها مع كتلة القيادة الرئيسية، ثم دراسة آلية الربط والتبديل بينهما بحيث تصبح الكتلة الإضافية قادرة على القيام بوظائف كتلة القيادة الرئيسية في حال تعطلها. وقد قُيم أداء النظام المقترح بحساب مؤشرات الوثوقية قبل وبعد عملية رفع الوثوقية، وبينت الحسابات أن معدل التعطل للنظام بعد رفع الوثوقية قد نقص بنسبة 24.3% تقريباً، وأن الزمن الوسطي للتعطل قد ازداد بنسبة 32.1% تقريباً. تثبت النتائج أهمية تطبيق تقنيات التسامح بالخطأ من أجل رفع وثوقية الأنظمة وخصوصاً الطبية منها ذات التماس المباشر مع المريض، والتي يمكن لأي عطل فيها أن يعرض حياة المريض للخطر.

الكلمات المفتاحية: الوثوقية، الدعم، الدعم الحيزي (العتاد، البرمجي، المعلوماتي)، الدعم الزمني، التسامح بالخطأ، معدل التعطل، الزمن الوسطي للتعطل.

(1) قائمة بالأعمال في قسم الهندسة الطبية - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة دمشق.

(2) أستاذ مساعد في قسم الهندسة الطبية - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة دمشق.

Improving the Reliability of the Central Control Unit of the Main Pump in Heart Lung Machine Using Fault Tolerance Techniques

Dr. Ahmad Khadour⁽¹⁾

Bayan Mawed

Abstract

This research aims to improve the reliability of the control unit of the main pump of the heart-lung machine by using the techniques of fault tolerance.

The technique which has been used here is to use an additional unit, link it with the main unit and study the mechanism of linking and switching between each other.

The performance of the new system has been estimated using calculations to the measures of the reliability before and after raising the reliability.

The results showed that the failure rate after raising the reliability has decreased by almost 24.3%, and mean time to failure has increased by 32.1%.

Through these results, we show the importance of applying the techniques of fault tolerance systems to raise the reliability of systems, especially the medical ones which are in direct contact with the patient, and any failure may endanger the patient's life.

Keywords: Reliability, Redundancy, Space Redundancy (Hardware, Software and Information), Time Redundancy, Fault Tolerance, Failure Rate, Mean Time To Failure.

⁽¹⁾ Biomedical Engineering Department, Electrical and Mechanical Engineering Faculty, Damascus University, Syria.

1- مقدمة:

أثناء العمليات الجراحية الكبرى كجراحة القلب المفتوح يمكن الاستغناء عن القلب والرئتين لعدة ساعات وخلال هذه المدة يقوم بوظيفة القلب والرئتين كاملة جهاز متخصص يدعى بجهاز القلب- الرئة، يعمل هذا الجهاز عمل القلب والرئة الطبيعيين، فالدم الواصل إلى البطين الأيسر والذي يُضخ في القلب الطبيعي إلى الرئتين يُضخ إلى مستودع للدم قبل أن ينتقل إلى الجهاز الذي يقوم بعمل الرئة الطبيعية وهو المؤكسج ليتم التبادل الغازي، وبعد ذلك يعود ضخ الدم إلى الشريان الأبهرى ومنه إلى كامل الجسم [1].

يتبع جهاز القلب- الرئة التصنيف A يتضمن هذا التصنيف الأجهزة المسؤولة بشكل مباشر عن حياة المريض، والمستخدمة في الحالات الطارئة والحرية، يجب أن تكون وثوقية الأنظمة التي تتبع هذا التصنيف عالية جداً بحيث تعمل بشكل صحيح في أي وقت قد يحتاج إليها فيه، لأنه من النادر أن يكون هناك وقت كافٍ لإصلاحها عند تعطلها [2]، وإن حدوث أي عطل في أثناء استخدامها خلال عملية جراحة القلب المفتوح تشكل أزمة حقيقية لفريق أطباء جراحة القلب وخطر كبير يهدد حياة المريض [3]. من بين الطرق المتبعة لرفع وثوقية مثل هذه الأنظمة المتطورة استخدام تقنيات التسامح بالخطأ، بحيث يتم جعل النظام قادراً على تجاوز العطل الذي يحدث في أثناء عمله، والمتابعة بشكل صحيح [4].

يعرف النظام المتسامح بالخطأ بأنه النظام القادر على إنجاز الوظيفة المخصصة له بشكل كامل وصحيح على الرغم من حدوث خطأ فيه في أثناء عمله، سواء كان الخطأ في عتاد النظام أو برمجياته، أي قادر على تجاوز الخطأ الحاصل فيه وذلك من خلال تزويده بمكونات إضافية احتياطية تعمل عند حدوث خطأ في النظام وتتعامل مع هذا الخطأ بحيث يحافظ على المستوى المطلوب من فعالية النظام بشكل يؤدي إلى رفع وثوقية

النظام وهذا ما يعرف بالدعم أو التكرار (Redundancy) [4, 5].

ترتبط عملية الدعم لأي نظام برفع كلفة النظام، لذلك لا يتم تطبيق عملية الدعم إلا في الأنظمة ذات الخطورة العالية التي قد يؤدي توقفها عن العمل إلى أضرار كبيرة أو حدوث كوارث، كمثال على هذه الأجهزة جهاز القلب- الرئة [3]، ويكون هذا الدعم إما دعم حيزي Space Redundancy يعمل على تزويد النظام بمكونات احتياطية (عتاد، برمجيات، بيانات)، أو دعم زمني Time Redundancy يستخدم عندما لا يكون هناك أهمية لزيادة الزمن اللازم لإنهاء النظام للوظيفة المطلوبة منه، حيث تكرر الحسابات المجراة أو نقل البيانات ومقارنة النتائج بنسخة نتائج سابقة مخزنة لاكتشاف الخطأ وتصحيحه [5,6].

يهدف هذا البحث إلى زيادة وثوقية وحدة قيادة للمضخة الرئيسية في جهاز القلب - الرئة باستخدام التسامح بالخطأ من خلال دعم حيزي لما لها من دور هام في عمل الجهاز المذكور.

2- الدراسات المرجعية:

تستخدم تقنيات دعم العتاد حديثاً في العديد من الأبحاث لرفع وثوقية الأجهزة الطبية من خلال إضافة عتاد احتياطي إلى النظام بحيث يتمكن من متابعة عمله حتى في حال وجود خطأ فيها [7].

أجرى Abdali-Mohammadi وزملاؤه عام 2015 في [8] دراسة لرفع وثوقية الأجهزة الطبية المحوسبة القابلة للارتداء المستخدمة غالباً في مجال مراقبة البارامترات الحيوية للمريض، والتي تتألف من ثلاث طبقات، الطبقة المرتدة وتحتوي على عقدتين عقدة الجسم وهي حساس موصول إلى الجسم لاستحصال البارامترات ووحدة معالجة صغيرة للمعطيات المستحصلة ووحدة إرسال للمعطيات وعقدة رئيسية لاستقبال لهذه المعطيات وإجراء معالجة جزئية لها، ومن ثم إرسالها إلى طبقة المعالجة المتقلة،

الصورة الصحيحة من الثلاث صور الناتجة بحسب مبدأ الأكثرية، وفي تصميم آخر تم وضع خمس وحدات لاستحصال الصورة Modular Redundancy 5-، ثم حسب وثوقية التصميمين، ووجد ازدياد وثوقية التصميمين المقترحين عند اللحظة التي تكون فيها وثوقية النظام الاساسي أكبر من 0.5، فمثلاً في اللحظة التي تكون فيها وثوقية النظام الأولي 0.7 تكون وثوقية 3-MR تساوي 0.7840 وتكون وثوقية 5-MR تساوي 0.8369 [10].

مما سبق تظهر أهمية استخدام تقنيات التسامح بالخطأ المعتمدة على دعم العتاد في تحسين وثوقية الأجهزة الطبية.

فيما يأتي وصف للطرائق المستخدمة لنمذجة ومحاكاة وحدة القيادة للمضخة الرئيسية لجهاز القلب- الرنة والنموذج المقترح للنظام بعد استخدام تقنيات التسامح بالخطأ لرفع وثوقيته وألية عمله، ثم حساب مؤشرات الوثوقية للنظام قبل وبعد تطبيق تقنيات التسامح بالخطأ.

3- الطرائق المستخدمة:

استخدم في هذه الدراسة برنامج المحاكاة Proteus (Labcenter Electronics-2009) لتقييم التصميم العتادي والبرمجي المنجز لكل من نموذج النظام الأولي ونموذج النظام بعد رفع الوثوقية والتأكد من صحته، وبعد أن تم إثبات صحة التصميم العتادي والبرمجي لكلا النموذجين تم إجراء حسابات لكل من مؤشرات وثوقية النظام الأولي، ومؤشرات وثوقية النظام بعد رفع الوثوقية لمعرفة الجدوى من رفع الوثوقية.

3-1- نموذج النظام الأولي لوحدة القيادة للمضخة

الرئيسية في جهاز القلب- الرنة:

تم نمذجة ومحاكاة وحدة القيادة للمضخة الرئيسية في جهاز القلب- الرنة باستخدام متحكم صغري من نوع Atmega16 حيث تقدم المتحكمات المبنية على أساس بنية AVR سرعة تنفيذ عالية [11]، وهذا ما نحتاجه في هذا التطبيق، ينظم هذا المتحكم سرعة المضخة الرئيسية

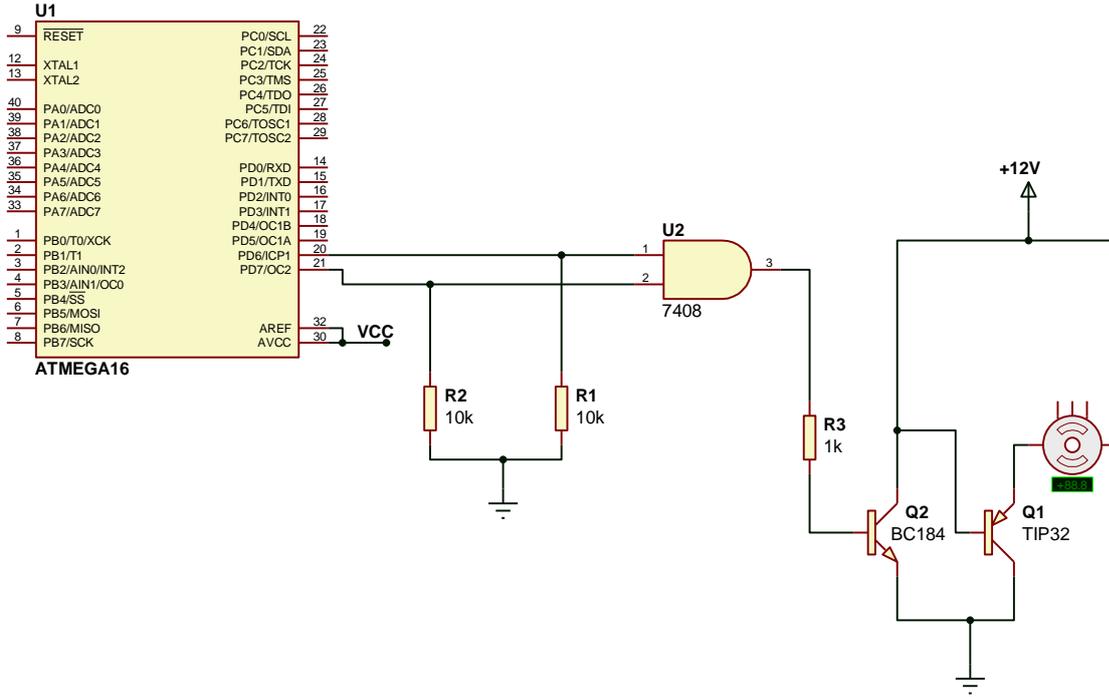
التي تقوم بدورها بإجراء معالجة لها وإرسالها إلى وحدة المعالجة السحابية Cloud ليتم أيضاً معالجتها وإرسالها إلى الجهة المختصة، على الرغم من أن استخدام وحدتي معالجة متنقلة وسحابية معاً قادر على حل معظم أخطاء الجهاز، إلا أنه لا يمكن اعتبار هذه الأجهزة أنظمة متسامحة بالخطأ فحدوث أي عطل في أحد الطبقات سيسبب فشل عمل الجهاز، لذلك أقترح نموذج تصميمي لهذه الأجهزة متسامح بالخطأ، وذلك باستخدام تقنية دعم العتاد، حيث تم التخلص من الأخطاء الناتجة عن وجود عطل في الحساس بإضافة حساس احتياطي إلى الحساس الأساسي، وللتخلص من أخطاء تعطل وحدة المعالجة في العقدة الرئيسية تم إضافة عقدة رئيسية افتراضية عبارة عن برنامج يقوم بمهام العقدة الرئيسية الحقيقية موجود في طبقة المعالجة المتنقلة، وبالنتيجة وجد أن الزمن الوسطي للتعطل في التصميم الأساسي للجهاز قد ازداد بنسبة 36% عند تطبيق الدعم على عقدة الجسم فقط، وازداد بنسبة 56% عند تطبيق الدعم على عقدة الجسم والعقدة الرئيسية معاً [8].

وفي دراسة أخرى قام بها Kalbarczyk وزملاؤه عام 2015 في [9] لتقديم نموذج لجهاز طبي قابل للارتداء لمراقبة معدل نبضات القلب متسامح بالخطأ، عن طريق إضافة وحدة لكشف الخطأ Fault Detection Unit ووحدة لمعالجة هذا الخطأ Recovery Unit للتخلص من الأخطاء العابرة Transient Fault مما تسبب في نقص معدل التعطل للنظام المتسامح بالخطأ بنسبة 15% [9].

درس Elamaran وزملاؤه عام 2017 في [10] رفع وثوقية أنظمة التصوير الطبية في الزمن الحقيقي مثل التصوير بالرنين المغناطيسي، حيث طبق تقنيات دعم العتاد لجعل جهاز المرنان يعطي صور صحيحة حتى في حال وجود عطل فيه من خلال وضع ثلاث وحدات لاستحصال الصورة Modular Redundancy 3- بدلاً من وحدة واحدة ووصلهم إلى دارة ناخب، ليقوم الناخب باختيار

متغيرة العرض بحسب السرعة المطلوبة، تستجيب المضخة للقيمة الوسطية لها، وقد تم اختيار المؤقت 2 الموجود ضمن المتحكم Atmega16 لتوليد إشارة PWM.

في جهاز القلب- الرئة وفق الدارة الالكترونية المبينة في الشكل (1). وفيه تتم عملية التحكم بسرعة المضخة باستخدام تعديل عرض النبضة Pulse Width Modulation (PWM)، حيث يتم إرسال إشارة مربعة



الشكل (1) نموذج النظام الأولي

2-3- النموذج المقترح لوحدة القيادة للمضخة

الرئيسية في جهاز القلب- الرئة:

تم في النموذج المقترح وصل وحدة القيادة المركزية الأساسية مع وحدة قيادة إضافية (الشكل (2))، بحيث تصبح مهام وحدة القيادة المركزية الأساسية:

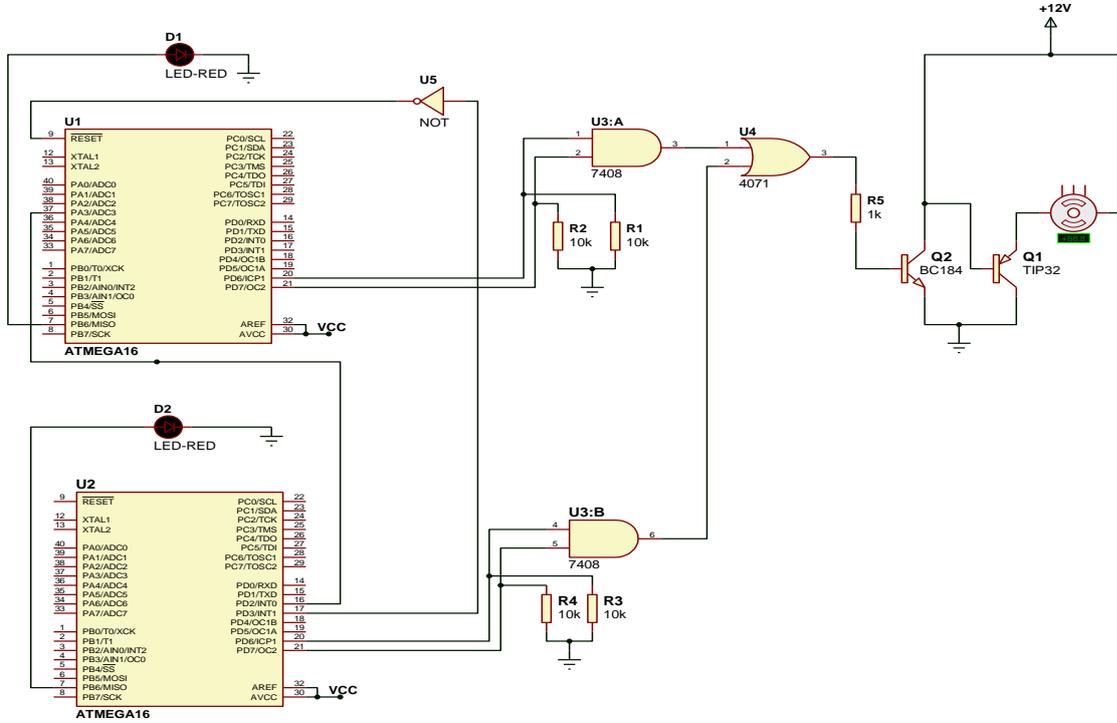
- تنظيم سرعة المضخة.
- إرسال إشارة مربعة دورية إلى وحدة القيادة الإضافية، دور هذه الإشارة يساوي زمن تنفيذ البرنامج والذي يساوي في الحالة المثالية 5ms، حيث تدل هذه الإشارة على قيادة وحدة القيادة الأساسية، وبدل عدم إمكانية استمرار وحدة القيادة المركزية الأساسية بإرسالها على توقفها عن العمل.

بينما تقوم وحدة القيادة المركزية الإضافية بـ:

تقاد المضخة عن طريق الترانزستورين Q1, Q2 الذين يقومان بالفتح والإغلاق وفق الإشارة القادمة من خرج بوابة AND حيث أن دخلي البوابة هما إشارة PWM المولدة من المغرر PORTD.7 وإشارة مولدة من المغرر PORTD.6، هذه الإشارة إما 1 أو 0 منطقي، بحيث تعمل على السماح لإشارة PWM من المرور عبر بوابة AND إلى الترانزستور Q2 عندما تكون في الحالة 1 منطقي، واستخدمت هذه الإشارة وبوابة AND لزيادة دقة التحكم بإيقاف المضخة.

م. بيان موعد، د.م. أحمد خضور... رفع وثوقية وحدة قيادة مركزية للمضخة الرئيسية في جهاز القلب الرنة باستخدام تقنيات التسامح بالخطأ

1. فحص الإشارة المرسله من قبل وحدة القيادة الأساسية، وهناك حالتان:
 - الإشارة موجودة: يدل على استمرار عمل وحدة القيادة الأساسية، لذلك تبقى الوحدة الإضافية في حالة استعداد Stand by.
 - غياب الإشارة: يدل على توقف عمل وحدة القيادة الأساسية بسبب تعطلها عتادياً أو برمجياً، لذلك تبدأ وحدة القيادة الإضافية بالعمل بعد زمن قيمته تساوي 20ms (الوقت اللازم للتأكد من غياب الإشارة)،
2. عند تعطل وحدة القيادة المركزية الأساسية تقوم وحدة القيادة المركزية الإضافية بما يلي:
 - a. تنظيم سرعة المضخة.
 - b. إرسال إشارة (1 منطقي) إلى عاكس موصول إلى مغرز التصفير Reset لوحدة القيادة الأساسية، وذلك للمحافظة عليها في حالة إطفاء OFF لتجنب حدوث فوضى في النظام في حال عودتها إلى العمل مجدداً.



الشكل (2) نموذج النظام المتسامح بالخطأ المقترح

1- المسار الأول:

يُفترض في هذا المسار تنفيذ العمل بشكل صحيح ودون حدوث أي خطأ، وذلك وفق الخطوات التالية:

1. بداية تنفيذ البرنامج.
2. مؤقت Watchdog (WDT) مضبوط على الزمن الأعظمي اللازم لتنفيذ البرنامج.
3. تُنفذ وحدة القيادة الأساسية العمل.
4. الإشارة المرسله من وحدة القيادة الأساسية إلى الوحدة الإضافية موجودة.
5. استمرار وحدة القيادة الأساسية بتنفيذ العمل.
6. انتهاء التنفيذ.

2- المسار الثاني:

يُفترض في هذا المسار تعطل وحدة القيادة الأساسية، وانتقال التنفيذ للوحدة الإضافية، وفق الخطوات التالية:

1. بداية تنفيذ البرنامج.
2. مؤقت (WDT) مضبوط على الزمن الأعظمي اللازم لتنفيذ البرنامج.
3. تُنفذ وحدة القيادة الأساسية العمل.
4. غياب الإشارة المرسله من وحدة القيادة الأساسية إلى الوحدة الإضافية كدليل على توقف وحدة القيادة الأساسية عن العمل.
5. ينتقل التنفيذ إلى الوحدة الإضافية، WDT مضبوط على الزمن الأعظمي اللازم لتنفيذ البرنامج.
6. تُنفذ الوحدة الإضافية العمل.
7. عدم توقف الوحدة الإضافية عن العمل.
8. استمرار وحدة القيادة الإضافية بتنفيذ العمل.
9. انتهاء التنفيذ.

3- المسار الثالث:

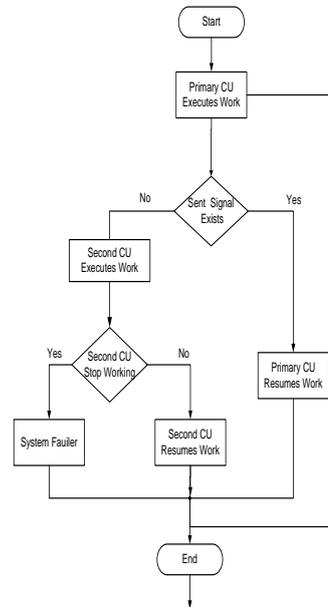
1. بداية تنفيذ البرنامج.
2. مؤقت Watchdog (WDT) مضبوط على الزمن الأعظمي اللازم لتنفيذ البرنامج.

توصل المضخة إلى كل من الوحدتين الأساسية والاحتياطية عن طريق بوابة OR الموضوعه بين بوابتي AND والترانزستور Q2، بحيث نقاد المضخة من قبل وحدة القيادة المركزية الموضوعه في حالة عمل بنفس الآلية الموضوعه في النظام الأولي، عند تشغيل النظام يتم تغذية كلا الوحدتين بالطاقة الكهربائية ويتم تشغيل مؤقت Watchdog (WDT) لكلا الوحدتين بحيث يضبط على الزمن الأعظمي المتوقع اللازم لتنفيذ البرنامج وهو 16ms (الزمن المثالي لتنفيذ البرنامج هو 5ms)، يؤدي تجاوز هذا الزمن من قبل إحدى الوحدتين عند قيامها بالتنفيذ إلى توقفها عن العمل لأن هذا التجاوز يدل على حدوث عطل برمجي ما في هذه الوحدة.

3-3- المخطط التدفقي لآلية انتقال التنفيذ بين

وحدتي القيادة المركزية:

يحتوي المخطط التدفقي المبين في الشكل (3) لآلية انتقال التنفيذ بين وحدتي القيادة المركزية على ثلاثة مسارات هي:



الشكل (3) المخطط التدفقي لآلية انتقال التنفيذ بين وحدتي القيادة المركزية

$$R_s(t) = \prod_{i=1}^N R_i(t)$$

حيث: $R_s(t)$ وثوقية النظام الكلي

$R_i(t)$ وثوقية المجرز

N عدد المجرزات

في حين تعطى وثوقية النظام التفرعي بالعلاقة [12]:

$$R_p(t) = 1 - \prod_{i=1}^N (1 - R_i(t))$$

حيث: $R_p(t)$ وثوقية النظام الكلي

$R_i(t)$ وثوقية المجرز

N عدد المجرزات

1- الزمن الوسطي للتعطل Mean Time To

:Failure MTTF

يعرف بأنه الزمن المتوقع قبل حدوث أول تعطل في النظام [4,5]. وتعطى العلاقة بين الوثوقية والزمن الوسطي للتعطل بالشكل:

$$MTTF = \int_0^{\infty} R(t).dt = \int_0^{\infty} e^{-\lambda t}.dt = \frac{1}{\lambda}$$

1. معدل التعطل Failure Rate

وهو عدد الأعطال المتوقع حدوثها في النظام أثناء عمله في واحدة الزمن [4,5]. فمثلاً إذا تعطل معالج بمعدل مرة واحدة كل ألف ساعة فإن معدل التعطل هو $(\lambda=1/1000 \text{ failures/hours})$.

3-4-1- معدلات التعطل لعناصر النموذج الإلكتروني:

يعطى النموذج الرياضي العام لحساب قيمة λ لأي منظومة بالعلاقة التالية [13]:

$$\lambda = \lambda_1 + \lambda_2$$

حيث:

λ_1 هي معدل تعطل العنصر بدون توصيل.

λ_2 هي معدل التعطل الذي يميز أثر وصل العنصر

مع باقي أجزاء النظام.

λ هي معدل التعطل الكلي.

3. تُنفذ وحدة القيادة الأساسية العمل.

4. غياب الإشارة المرسله من وحدة القيادة الأساسية إلى

الوحدة الإضافية كدليل على توقف وحدة القيادة

الأساسية عن العمل.

5. ينتقل التنفيذ إلى الوحدة الإضافية، WDT مضبوط

على الزمن الأعظمي اللازم لتنفيذ البرنامج.

6. تُنفذ الوحدة الإضافية العمل.

7. توقف الوحدة الإضافية عن العمل.

8. فشل النظام وتوقفه عن العمل.

3-4- حسابات مؤشرات الوثوقية:

يقصد بمؤشرات الوثوقية أو مؤشرات النظام المتسامح

بالخطأ بأنها الكميات التي تميز وثوقية هذا النظام، ويتم

التعامل معها عند توصيف الوثوقية، ومن أهم هذه

المؤشرات:

الوثوقية Reliability

تعرف وثوقية نظام $R(t)$ باحتمال عدم حدوث أي

تعطل في النظام في الفترة الزمنية الممتدة من بداية

المراقبة وحتى الزمن t ، وذلك بافتراض أن النظام يعمل

بشكل صحيح في اللحظة $t=0$ ، وتعرف الوثوقية بالعلاقة:

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

حيث λ هي معدل التعطل، وتسمى هذه العلاقة بقانون

التعطل الأسي [4,5].

حسبت وثوقية النظام الأولي ووثوقية النظام المتسامح

بالخطأ باستخدام تقنية مخططات الوثوقية الكتلية

Reliability Block Diagram [12]، حيث تمثل

العناصر ككتل، طريقة الربط بينها تتوقف على طبيعة

العلاقة المتبادلة فيما بينها، فتوصل الكتل مع بعضها على

التسلسل إذا كانت جميعها ضرورية لعمل النظام، وتوصل

على التفرع إذا كانت كتلة واحدة على الأقل تكفي لعمل

النظام على نحو صحيح [12].

تعطى الوثوقية للنظام التسلسلي بالعلاقة [12]:

3-4-2- حساب مؤشرات الوثوقية للنظام الأولي:

نستنتج من الدارة الإلكترونية لنموذج النظام الأولي (الشكل (1)) مخطط الوثوقية الكلي للنظام الأولي، الذي

يظهر في الشكل(4):



الشكل(4) مخطط الوثوقية الكلي للنظام الأولي

حيث:

R_{U1} : كتلة وحدة القيادة المركزية.

R_{U2} : كتلة بوابة AND.

R_{R3} : كتلة المقاومة R3.

R_{Q2} : كتلة الترانزستور Q2.

R_{Q1} : كتلة الترانزستور Q1.

حيث جميع العناصر موصولة مع بعضها على التسلسل، لذلك تعطى علاقة الوثوقية للنظام الأولي بالشكل:

$$R_{System}(t) = R_{U1}(t) * R_{U2}(t) * R_{R3}(t) * R_{Q2}(t) * R_{Q1}(t) \\ R_{System}(t) = e^{-(\lambda_{U1} + \lambda_{U2} + \lambda_{R3} + \lambda_{Q2} + \lambda_{Q1})t}$$

$$R_{System}(t) = e^{-(2.65623 + 0.33644 + 0.03702 + 0.03990 + 0.05451)t}$$

بالتالي تكون علاقة الوثوقية النهائية للنظام بالشكل:

$$R_{System}(t) = e^{-3.12410t}$$

ويكون الزمن الوسطي للتعتل MTTF:

$$MTTF_{system1} = \int_0^{\infty} R_{System}(t).dt = \int_0^{\infty} e^{-3.12410t}.dt \\ MTTF_{System1} = \frac{1}{3.12410} = 0.32009(10^6 \text{ hour}) = 320090 \text{ hour}$$

وبالتالي يكون معدل التعتل:

$$\lambda = 3.12410(10^{-6} \text{ hour})$$

3-4-3- حساب مؤشرات الوثوقية للنظام المتسامح

بالخطأ المقترح:

بالنظر إلى الدارة الإلكترونية للنظام المقترح في الشكل

(2) يُستنتج مخطط الوثوقية الكلي المبين في الشكل(5):

إن النموذج الرياضي لحساب λ_2 هو نفسه لكل العناصر، ويعطى بالعلاقة:

$$\lambda_2 = N_p \cdot K_{EI} \cdot K_b / 10^{-6} \text{ hour}$$

حيث:

N_p يمثل عدد الأرجل (Pins) الموصولة، وبالتالي

يختلف من دائرة لأخرى بحسب عدد أرجل الدارة.

K_{EI} أثر المحيط، ويساوي الواحد في الشروط

المثالية.

K_b تمثل شدة التعتل الأساسية لوصول العنصر

بالجملة، ويأخذ القيمة $2.6 \cdot 10^{-6}$ من أجل اللحام اليدوي،

و $2.5 \cdot 10^{-6}$ للوصل بالأسلاك.

أما نماذج حساب λ_1 فهي متباينة بحسب نوع

العنصر، لأن معدل تعتل كل عنصر مرتبطة بشدة تعتل

أساسية λ_b مضروبة بسلسلة من العوامل التي ترتبط

قيمها بتركيبة العنصر نفسه وشروط الخدمة له [13].

يحتوي الجدول (1) على معدلات التعتل λ

المحسوبة من العلاقات السابقة لكل من العناصر

الإلكترونية المكونة للنظام المصمم باستخدام النماذج

الرياضية المقترحة في النورما الأمريكية (MIL-HDBK-

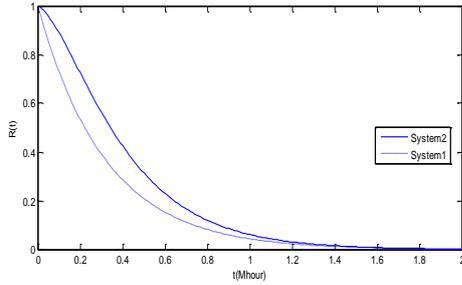
217G) [14]، وباعتبار جودة تصنيع عالية لهذه العناصر

كونها استخدمت هنا في مجال طبي.

الجدول (1) معدلات التعتل λ للعناصر المكونة للنظام [14]

العنصر	λ_1 (10^{-6} hour)	λ_2 (10^{-6} hour)	$\lambda = \lambda_1 + \lambda_2$ (10^{-6} hour)
المتحكم الصغري	2.43783	0.21840	2.65623
البوابات المنطقية OR AND	0.26000	0.07644	0.33644
الترانزستور NPN	0.02352	0.01638	0.03990
الترانزستور PNP	0.03813	0.01638	0.05451
المقاومة	0.02610	0.01092	0.03702

للنظام الأساسي والمقترح، ويظهر الشكل (6) منحنى الوثوقية للنظام الأولي والنظام المتسامح بالخطأ، حيث يتبين أن وثوقية النظام المتسامح بالخطأ المقترح قد ارتفعت بنسبة لا تقل عن 40% خلال معظم فترة عمر النظام المفترضة.



الشكل (6) منحنى الوثوقية للنظام الأولي والنظام المتسامح بالخطأ

يبين الجدول (2) قيم مؤشرات الوثوقية للنظام الأولي والنظام المتسامح بالخطأ المقترح حيث نجد بالمقارنة:

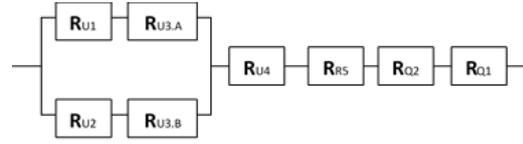
1. نقص معدل التعطل للنظام الأولي والنظام المتسامح بالخطأ بنسبة 24.3%.

2. الزمن الوسطي للتعطل للنظام الأولي والنظام المتسامح بالخطأ نجد أنه قد ازداد بنسبة 32.1%.

الجدول (2) مؤشرات الوثوقية

النظام	معدل التعطل $\lambda = 1/MTTF$ 10^{-6} hour	الزمن الوسطي للتعطل MTTF 10^6 hour
النظام الأولي	3.12410	0.32009
النظام المتسامح بالخطأ	2.36417	0.42298

تتفق هذه النتائج وما توصلت إليه الدراسات [8, 9, 10] حول فعالية استخدام تقنيات التسامح بالخطأ في تحسين وثوقية الأجهزة الطبية التي أصبحت حاجة أساسية في ظل التقدم الحاصل في تقنيات التجهيزات الطبية.



الشكل (5) مخطط الوثوقية الكتل للنظام المتسامح بالخطأ

حيث:

R_{U1}, R_{U2} : كتل كلاً من وحدة القيادة المركزية الأساسية والوحدة الإضافية.
 $R_{U3.A}, R_{U3.B}$: كتل بوابات AND.
 R_{U4} : كتلة بوابة OR.
 R_{R5} : كتلة المقاومة R5.
 R_{Q2} : كتلة الترانزستور Q2.
 R_{Q1} : كتلة الترانزستور Q1.
 وتكون علاقة الوثوقية للنظام:

$$R_{System2}(t) = R_{1,2}(t) * R_{U4}(t) * R_{R5}(t) * R_{Q2}(t) * R_{Q1}(t)$$

$$R_{System2}(t) = (2e^{-2.99267t} - e^{-5.98534t}) * e^{-0.33644t} * e^{-0.03702t} * e^{-0.03990t} * e^{-0.05451t}$$

$$R_{System2}(t) = (2e^{-2.99267t} - e^{-5.98534t}) * e^{-0.46787t}$$

بالتالي تكون علاقة الوثوقية النهائية للنظام بالشكل:

$$R_{System2}(t) = 2e^{-3.46054t} - e^{-6.45321t}$$

يكون الزمن الوسطي للتعطل MTTF:

$$MTTF_{System2} = \int_0^{\infty} R_{System2}(t).dt = \int_0^{\infty} (2e^{-3.46054t} - e^{-6.45321t})dt$$

$$MTTF_{System2} = \frac{2}{3.46054} - \frac{1}{6.45321}$$

$$MTTF_{System2} = 0.57794 - 0.15496$$

$$MTTF_{System2} = 0.42298(10^6 \text{ hour}) = 422980 \text{ hour}$$

وبالتالي يكون معدل التعطل:

$$\lambda = 1/MTTF = 1/0.42298 = 2.36417(10^{-6} \text{ hour})$$

4-النتائج ومناقشتها:

أجريت محاكاة لوحدة القيادة للمضخة الرئيسية في جهاز القلب- الرئة، ليتم بعد ذلك وصلها مع وحدة قيادة إضافية ليصبح النظام متسامح بالخطأ، ثم قورنت مؤشرات الوثوقية

References

المراجع

- [1] Webster, J. (2006). *Encyclopedia of Medical Devices and Instrumentation* (2nd ed.), John Wiley & Sons, Inc, New Jersey -USA
- [2] Dhillon, B. S. (2000). *Medical Device Reliability and Associated Areas*, CRC Press, USA.
- [3] Durukan, A. B.; Gurbuz, H. A.; Ozcelik, G.; Yorgancioglu, C. (2016). Electrical failure during cardiopulmonary bypass: A critical moment, *Kardiochirurgia i Torakochirurgia Polska*, Vol. 13, No. 2, 143–144.
- [4] Dubrova, E. (2013). *Fault-Tolerant Design, Fault-Tolerant Design*, Springer.
- [5] Koren, I.; Krishna, C. (2021). *Fault-Tolerant Systems* (2nd ed.), Elsevier Inc.
- [6] Nørvag, K. (2000). *An Introduction to Fault-Tolerant Systems*, Technical Report IDI-6/99 Norway
- [7] Fries, R. (2012), *Reliable Design of Medical Devices*. (Third Ed). CRC Press Taylor & Francis Group, Boca Raton
- [8] Abdali-Mohammadi, F.; Bajalan, V.; Fathi, A. (2015). Toward a Fault Tolerant Architecture for Vital Medical-Based Wearable Computing, *Journal of Medical Systems*, Vol. 39, No. 11, 1–12.
- [9] Li, Q.; Alemzadeh, H.; Kalbarczyk, Z.; Iyer, R. K. (2015). A fault-tolerant hardware architecture for robust wearable heart rate monitoring, *Proceedings of the 2015 9th International Conference on Pervasive Computing Technologies for Healthcare, PervasiveHealth 2015*, 185–192.
- [10] Elamaran, V.; Narasimhan, K.; Balaji, V. S.; Chandrasekar, M.; Upadhyay, H. N. (2017). A case study of fault-tolerant biological systems with mri images., *Biomedical Research (India)*, Vol. 28, No. 12, 5247–5251
- [11] ATmel. (2010). *ATMEL16: 8-bit Microcontroller with 16K Bytes In-System Programmable Flash*, from <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/78532/ATMEL/ATMEGA16.html>
- [12] Romeu, J. L. (2012). *Understanding Series and Parallel Systems Reliability*, *Reliability Analysis Center*, Vol. 11, No. 5, 8
- [13] Khadour, A. (2003). *Increasing Reliability of Personal Computer Using External Diagnostic Model*, *ICITNS 2003 International Conference on Information Technology and Natural Sciences*, Amman-Jordan

6 - الخاتمة:

تمكنا في هذا البحث من تطبيق تقنيات أنظمة التسامح بالخطأ لرفع وثوقية دارة القيادة الرئيسية للمضخة الرئيسية لجهاز القلب والرئة بتطبيق مبدأ دعم العتاد الذي أدى إلى زيادة في الزمن الوسطي لمعدل التعطل بنسبة 32.1% تقريباً، ونقصان في معدل التعطل بنسبة 24.3% تقريباً، لذلك تعد طريقة ناجحة لاستخدامها مستقبلاً في رفع وثوقية الأنظمة الطبية عامةً وجهاز القلب- الرئة خاصةً، حيث تمكن هذه التقنيات في حال تطبيقها من جعل النظام قادر على التعامل مع العطل الذي قد يحدث فيه بحيث يتمكن من المحافظة على المستوى المطلوب من فعاليته. ولا بد من الإشارة إلى أن تطبيق تقنيات أنظمة التسامح بالخطأ بشكل عام في نظام ما يؤدي بالتأكيد إلى رفع كلفة هذا النظام لما تتطلبه عملية الدعم من تزويد النظام بمكونات إضافية. وبالرغم من أهمية الجهاز موضوع البحث الذي يتبع التصنيف A والذي فيه يتم تجاوز موضوع التكلفة، فإن تكلفة النظام المقترح كانت بالحدود الدنيا رغم الزيادة الملحوظة في وثوقيته، حيث تم التوفيق ما بين نسبة ارتفاع كلفة هذا النظام والآثار التي قد يحدثها تعطله.

[14] Khadour, A. (1986). Kandidatska Disertacni Prace, PhD Thesis Plzen University-Czechoslovakia.

Received	2021/7/1	إفءاع البآآ
Accepted for Publ.	2021/8/24	قبول البآآ للنشر

Computer Programs:

- Labcenter Electronics, ISIS Professional (Proteus), Release 7.7 SP2 (Build 9089) with Advanced Simulation, 2009

المصطلآا المسأءمة		
المصطلآ باللغة الانكلفزفة	المصطلآ باللغة العربفة	الاآآصار
Failure Rate	معا للآعطل	λ
Fault Tolerance	آسامآ بالآطأ	
Hardware Redundancy	ءعا العناء	
Mean Time To Failure	الزمن الوسطف للآعطل	MTTF
Parallel Systems	الأنظمة الآقرعة	
Redundancy	الءعا أو الآكارار	
Reliability	الوآوقفة	R
Reliability block diagram	مآططاط الوآوقفة الكآلفة	
Series Systems	الأنظمة الآسلسلفة	
Software Redundancy	الءعا البرمآف	
Space Redundancy	الءعا الآفزف	
Time Redundancy	الءعا الزمنف	
Watchdog Timer	مؤقت الآراسا	WDT