

Designing a Fault tolerance system in Image sensor (APS)

Dr. Ali Alali*
Dr. Hasan Albustani**
Alaa Habeeb***

(Received 1 / 2 / 2017. Accepted 31 / 7 / 2017)

□ ABSTRACT □

In this research, we are dealing with Digital video systems and digital Cameras that have a very important improvement during last years, like using the new CMOS (complementary metal-oxide semiconductor) Image Sensor instead of traditional Image Sensor CCD (Charge Coupled Devices).

Even though the progress in CMOS technology offers the means to fabricate them, smaller pixels in advanced technologies must overcome some electrical and optical problems, and this is what we present by designed a fault tolerance Active Pixel Sensor using hardware redundancy called TMR (Triple Modular Redundancy).

We designed a CMOS Image Sensor with our TMR that contains analog comparator, the next step was making a modification in the structure of the classic TMR to decrease the cost of fabricate on the chip, then we analyze the Reliability of entire system and compare the results with the reliability of single Image Sensor

Keywords: Video system, Digital Cameras, Redundancy, Reliability, Image sensor, Fault Tolerance.

* Professor - Faculty of Mechanical and Electrical Engineering - Tishreen University

** Assistant Professor - Faculty of Information and Communication Technology Engineering

*** Postgraduate student - Department of Communications and Electronics Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering - Tishreen University

تصميم نظام متسامح العطل في حساسات الصورة (حساسات البكسل الفعالة (APS))

الدكتور علي العلي*

الدكتور حسن البستاني**

علاء رافع حبيب***

(تاريخ الإيداع 1 / 2 / 2017. قُبِلَ للنشر في 31 / 7 / 2017)

□ ملخص □

يهتم البحث بأنظمة الفيديو (Video Systems) والكاميرات الرقمية والاتجاه نحو حساسات الصورة (Image Sensor) من صنف CMOS (complementary metal-oxide semiconductor) كبديل عن الحساسات من صنف CCD (Charge Coupled Devices) نظراً للميزات التي تتمتع بها من حيث إمكانية التصنيع على نفس الشريحة مع الدارات المرافقة للحساس بالإضافة إلى صغر الحجم والاستهلاك المنخفض للطاقة. تساعد المميزات المذكورة تقنية CMOS على تقديم عنصر صورة (Pixel) صغير الحجم وذو تقنية متطورة، إلا أنها يجب أن تتغلب على بعض العيوب الإلكترونية والضوئية، وهذا ما نقدمه من خلال تصميم حساس عنصر صورة نشط (Active Pixel Sensor) بتطبيق تقنية الفائضية ثلاثية النماذج (Triple Modular Redundancy)، وذلك من خلال تصميم حساس الصورة ومن ثم إدخال التقنية المذكورة، بعد ذلك تعديل التصميم لتقليل عدد الترانزستورات على شريحة الحساس تم أيضاً تحليل الوثوقية (Reliability) للنظام المقترح ومقارنته مع وثوقية الحساس منفرداً لتحديد مستوى التحسين الحاصل في الوثوقية والتي تعد مع تسامحية العطل مؤشراً هاماً على تحسين الاعتمادية (Dependability) للنظام عامة.

الكلمات المفتاحية: أنظمة الفيديو، الكاميرات الرقمية، الفائضية، الوثوقية، حساس الصورة، تسامحية العطل.

* أستاذ - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية

** مدرس - كلية هندسة تكنولوجيا المعلومات والاتصالات - جامعة طرطوس - طرطوس - سورية

*** طالب ماجستير - قسم هندسة الاتصالات والإلكترونيات كلية الهمةك - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية

مقدمة:

تمكن الميزات السابقة (صغر الحجم والاستهلاك المنخفض للطاقة) لحساسات CMOS من العمل بأداء مرتفع وتكوين أنظمة أكثر صغراً في الحجم وأكثر تكاملاً مما يلبي المتطلبات المتسارعة لأنظمة الفيديو الرقمية [1]، ومن أبرز الحساسات المعتمدة على تقنية CMOS حساس عنصر الصورة النشط (Active Pixel Sensor) الذي يشار إليه اختصاراً (APS) [2] (موضوع البحث) ونظراً للتعقيد الحاصل تتعرض هذه الأنظمة لأنواع مختلفة من العيوب والأعطال التي سوف نعمل في هذا البحث على ضمان استمرار عمل المنظومة المستهدفة في الدراسة بالرغم من وجود هذه الأعطال وهذا ما يعرف بتسامحية العطل (Fault Tolerance) [3].

اعتمدنا في بحثنا على برنامج Pspice 9.2 لتصميم ونمذجة دارة الحساس والدارات المضافة لتحقيق تسامحية العطل وهذا البرنامج هو من منتجات شركة Cadence Design Systems، أما تحليل الوثوقية فتم بالاعتماد على سلاسل ماركوف (Markov chain) للوصول إلى وثوقية الحساس المتسامح مع العطل مقارنة مع الحساس في الحالة الطبيعية.

أهمية البحث وأهدافه:

أهمية البحث:

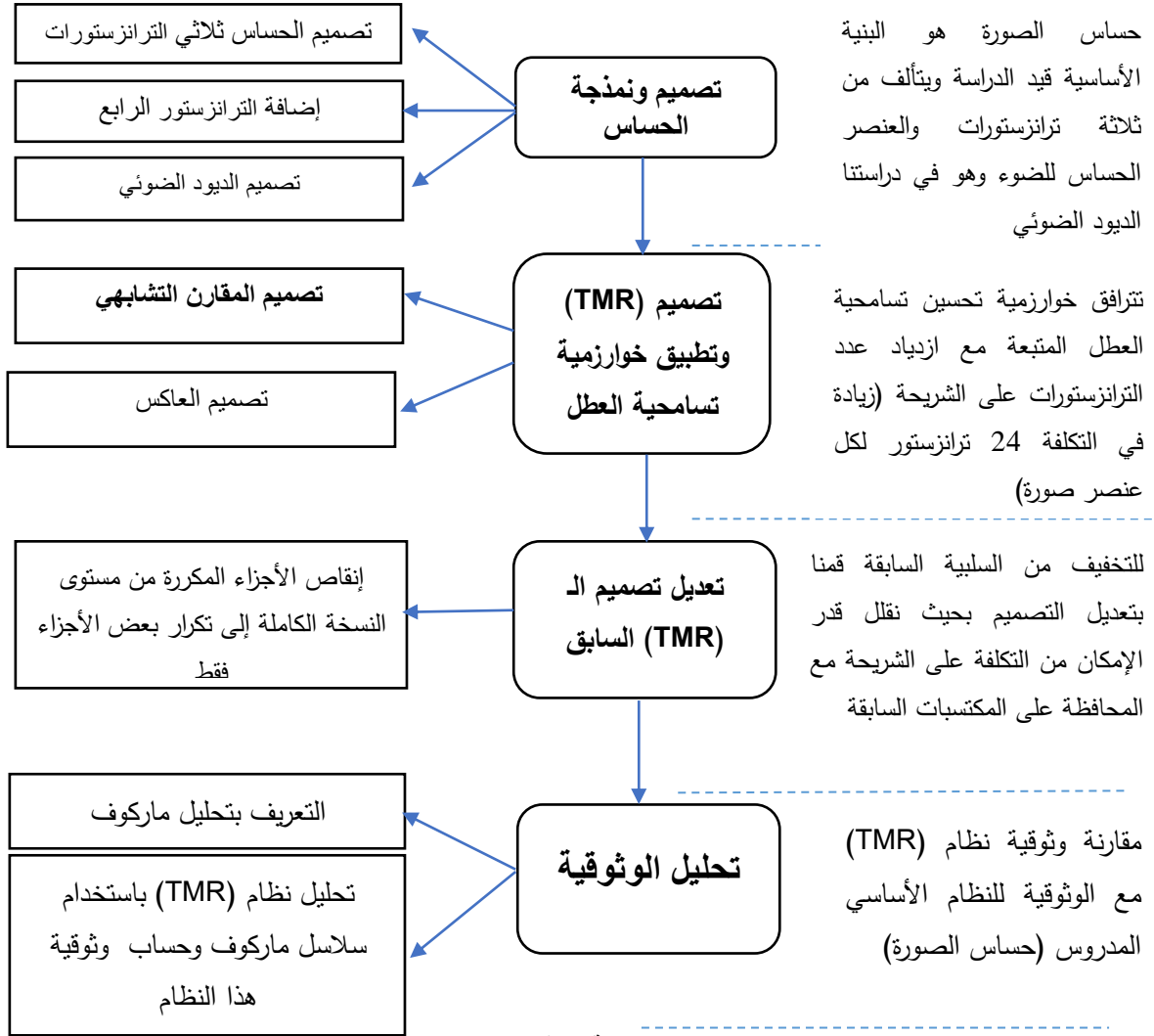
أخذت معظم الدراسات في مجال تسامحية العطل منحى يعتمد على الفائضية البرمجية (Software Redundancy) مع التقليل قدر الإمكان من فائضية العتاد الصلب (Hardware Redundancy)، ولكن مع تطور تقنيات تصنيع الدارات المتكاملة أصبح بالإمكان اعتماد الفائضية الصلبة كبديل منافس لتحسين تسامحية الأنظمة مع العطل، وذلك بإضافة عدة نسخ من العنصر المستهدف أو الدارة المستهدفة لضمان استمرار تقديم الخدمة المطلوبة من النظام ككل حتى في حال تعطل إحدى هذه النسخ ولذلك تكمن أهمية البحث في اعتماد فائضية العتاد الصلب.

أهداف البحث:

يهدف البحث إلى تحسين تسامحية أنظمة الفيديو الرقمية من خلال تحسين تسامحية الكاميرا الرقمية، وذلك بتطبيق فائضية عتاد صلب (Hardware Redundancy) على دارة حساس الصورة (Image Sensor) وفق منهجية تعتمد على تكرار كامل النسخة ومن ثم تعديل المنهجية السابقة والمقارنة بين المنهجين. تم في البحث تصميم حساس صورة متسامح مع العطل يزيد من اعتمادية الكاميرات الرقمية المستخدمة في أنظمة الفيديو في التطبيقات التي تتطلب مستوى عالي من الاعتمادية كتطبيقات المراقبة في المفاعلات النووية وكاميرات المراقبة والتصوير الجوي والفضائي وأي نظام فيديو مشابه.

طرائق البحث ومواده:

تتلخص خطوات إنجاز البحث بالمخطط التالي الشكل (1):



الشكل (1) منهجية تنفيذ البحث وخطواته

دراسة مرجعية:

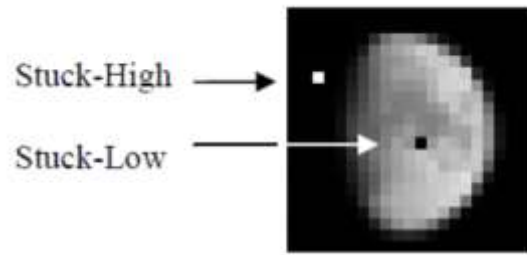
تم في الدراسة المرجعية المعروضة هنا اقتراح خوارزمية كشف للأعطال تعتمد على الاستفادة من معلومات إحصائية يتم جمعها من سلسلة من الصور الملتقطة في حالة العمل الطبيعية للحساس، وبلاستفادة من هذه المعلومات يتم تحديد مكان ونوع العطل في حال حدوثه [4].

تتميز هذه الخوارزمية عن سابقتها بالاستفادة من معلومات إحصائية يتم جمعها من عناصر الصورة المجاورة للعنصر المتوقع وجود العطل به بالإضافة إلى المعلومات الإحصائية سابقة الذكر.

شمل البحث الأعطال الآتية:

1. الأعطال البسيطة أو أعطال الثبات، ثبات أعظمي وثبات أصغري (Stuck Low, Stuck High) كما في

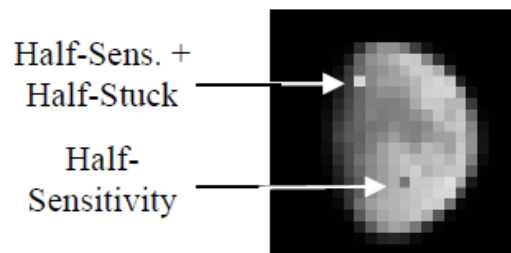
الشكل (أ):



الشكل (أ) الأعطال البسيطة

2. الأعطال الأكثر تعقيداً وتشمل الأعطال السابقة مترافقة مع انخفاض في حساسية العنصر كما في الشكل

(ب):



الشكل (ب) الأعطال المعقدة

أظهرت الدراسة مرونة عالية سمحت بتطبيقها على الحساسات عالية الدقة والحساسات المتأثرة بالضجيج (الضجيج الحراري) فقط بخسارة بسيطة في الأداء. استفاد هذا البحث من دراسات سابقة أجريت على اكتشاف الخطأ أثناء فترة عمل الحساس (in-field) أما الإضافة المطروحة هنا فهي الاستفادة من معلومات إحصائية ليس فقط من العناصر الملاصقة للعنصر أو البكسل المدروس (4×4 أو 8×8)، إنما من معلومات إحصائية عامة من كامل حساس الصورة الأمر الذي رفع من كفاءة الخوارزمية السابقة.

كانت نتائج الدراسة المرجعية على الشكل التالي:

أجريت الدراسة وتحليل النتائج على 50 صورة وبينت النتائج أن الخوارزمية المقترحة أعطت نتائج دقيقة من دون أي خطأ في الخمسين صورة المدروسة وضمن معدل انتشار العطل على كامل الحساس بنسبة 0.5% وهي نسبة أفضل بكثير من النسبة المتوقعة في أي حساس صورة تجاري مستخدم.

1-تصميم ونمذجة الحساس:

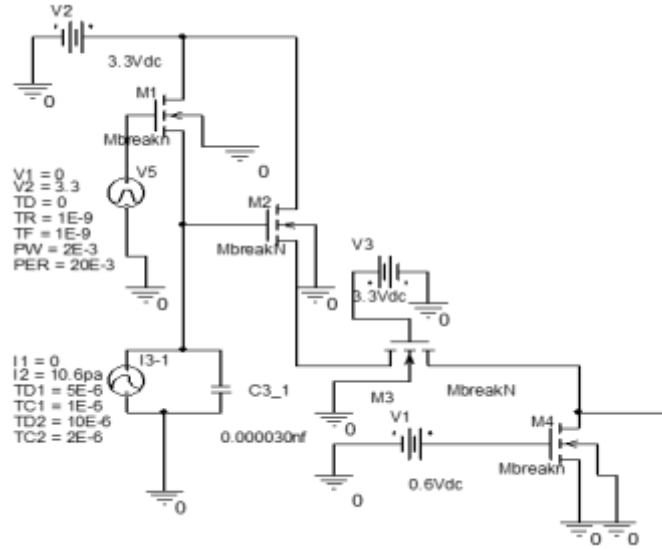
تم في هذا الجزء من البحث تصميم حساس صورة نشط يتألف من ثلاثة ترانزستورات بالإضافة إلى العنصر الحساس للضوء [5] وهذه الترانزستورات هي على النحو الآتي:

- ترانزستور تصفير الحساس (M1)(Reset transistor): يتم تخزين الشحنة في الديود في حال كان هذا الترانزستور في حالة التمرير، أما عملية نقل الشحنة أي التحويل إلى جهد تتم عندما يكون في حالة القطع.
- ترانزستور ملاحقة جهد المنبع (M2) (Source follower transistor): يعمل هذا الترانزستور عمل مضخم عازل.

- ترانزستور تحديد السطر (M3) (Row select transistor): يعمل كترانزستور تمرير حيث يتم قراءة الجهد عندما يكون في حالة العمل.

تعطى الدارة العامة لهذا الحساس كما في الشكل (2)، وفي بحثنا اعتمدنا الديود الضوئي كعنصر حساس للضوء وظيفته تحويل الشحنة الناتجة عن سقوط الضوء إلى جهد يخزن في مكثف الديود الضوئي عندما يكون M1 في حالة القطع.

الترانزستور الرابع الشكل (16) وهو Bias transistor ليس أحد ترانزستورات الحساس بحد ذاته بل هو ترانزستور مشترك بين كل عناصر مصفوفة الحساسات (pixels) التي تنتمي إلى نفس العمود، وظيفته تحديد البيانات من عنصر صورة واحد في كل مرة بشرط الانتماء إلى العمود نفسه، ومن ناحية تصميمية فإن كل الترانزستورات في الدارة المصممة تملك المواصفات الآتية: الطول $L = 0.6 \mu m$ العرض $W = 4 \mu m$.



الشكل (2) دارة حساس الصورة

يستعاض عن الديود الضوئي بالدارة المكافئة الموضحة في الشكل (3) والتي تتكون من منبع تيار ومكثف لتخزين الجهد الناتج عن سقوط الضوء

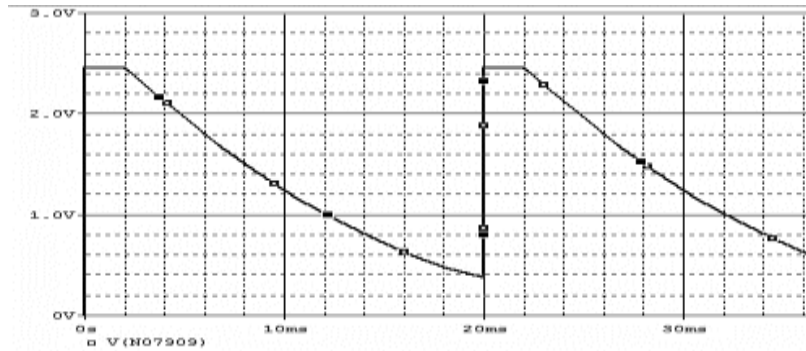


الشكل (3) الديود الضوئي والدارة المكافئة

يسلك الديود الضوئي سلوكاً مشابهاً للمنبع الأسي للتيار ويستخدم المكثف لتخزين الشحنة، حيث يحسب التيار

$$Q = nq = Ipt \Rightarrow Ipt = \frac{nq}{t} \quad (1) \quad \text{من خلال المعادلة:}$$

وبافتراض عدد الإلكترونات الناتجة عن سقوط الضوء هو 4×10^4 وباعتبار مساحة الديود الضوئي $9 \mu m^2$ ويزمن اندماج 6 ms يصبح التيار الناتج 10.66 pA أما السعة فهي تجريبياً 30.50 pf وهي سعة الديود الضوئي، وعندما يصبح M1 في حالة القطع يمرر الجهد إلى M2 الذي يعمل كمكبر وعازل (Buffer)، حيث يؤخذ الخرج فقط عندما يكون M3 موصلًا، أما نتائج المحاكاة للحساس الضوئي فهي موضحة بالشكل (4) الآتي باستخدام محاكي Pspice من شركة Orcad:

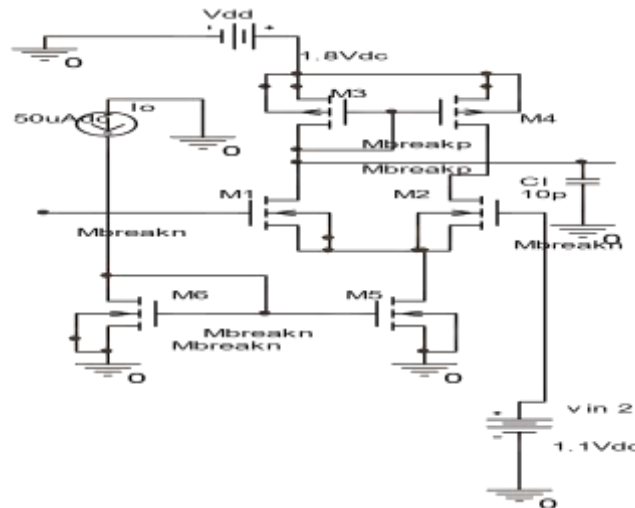


الشكل (4) خرج حساس الصورة

2-تصميم TMR:

يتألف عموماً من ثلاث نسخ متطابقة من الدارة أو الجزء من الدارة التي نريد الحفاظ على الخرج السليم منها بالإضافة إلى مقارن (ناخب) يعمل على مبدأ الانتخاب بالأكثرية حيث نحتاج إلى أن يكون لدينا نسختين تعملان بالشكل الصحيح من بين النسخ الثلاثة للحصول على الخرج الصحيح على خرج TMR، ويمكن توسيع مفهوم (TMR) من ثلاث نسخ إلى n نسخة بحيث تطبق في التطبيقات الحرجة جداً كونها تعتبر أكثر تكلفة ولكنها تملك القدرة على تحمل عدد أكبر من الأخطاء (حيث يمكن لـ n-MR أن يتعامل مع $\frac{n-1}{2}$ خطأ).

• **تصميم المقارن التشابهي:** تعطى الدارة العامة له كما في الشكل (5):



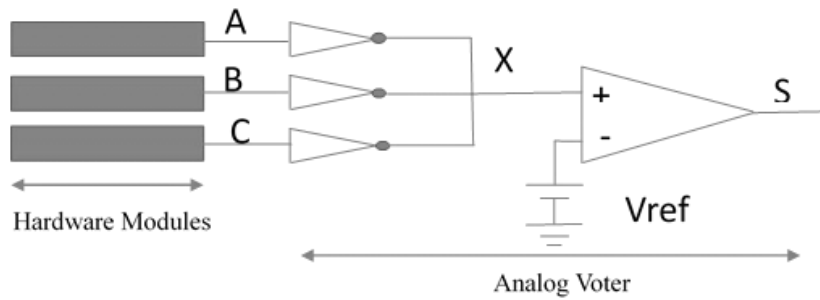
الشكل (5) دارة المقارن التشابهي

حيث يتألف هذا المقارن [6] من ثلاثة أجزاء هي:

- دارة مضخم تفاضلي.

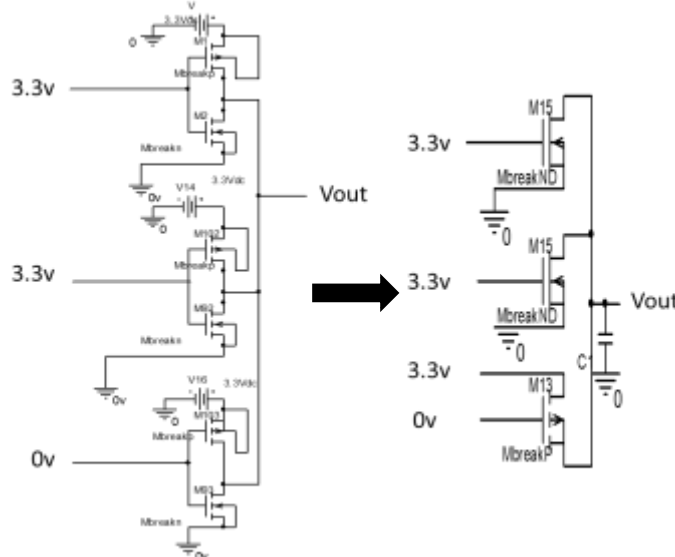
- دارة مرآة تيارات لتوليد تيار الانحياز المناسب للمضخم التفاضلي.
 - دارة مرآة تيار كحمل فعال للمضخم التفاضلي لتحسين معامل التضخيم.
- يمتاز هذا المقارن التشابهي عن نظيره الرقمي بالعدد الأقل من الترانزستورات (تكلفة أقل)، كما أن خرج المقارن الرقمي يحتمل حالتين منطقيتين فقط أما خرج المقارن التشابهي فهو خطي متناسب مع الدخل. الأمر الذي يجعله مناسباً لتطبيقنا.

يقوم المقارن بإجراء مقارنة بين جهد مرجعي V_{in2} والجهد الناتجة عن النسخ المكررة من الحساسات والننتيجة اختيار الخرج الصحيح على الرغم من وجود عطل في إحدى النسخ، وذلك بوجود دارة مساعدة على خرج كل نسخة هي دارة العاكس والغاية من العواكس هي الحصول على الإشارة بشكلها الصحيح على خرج المقارن التفاضلي الذي سوف يقوم أيضاً بعكس القطبية بعد إجراء المقارنة وتصبح الدارة بشكلها العام كما هو موضح في الشكل (6):



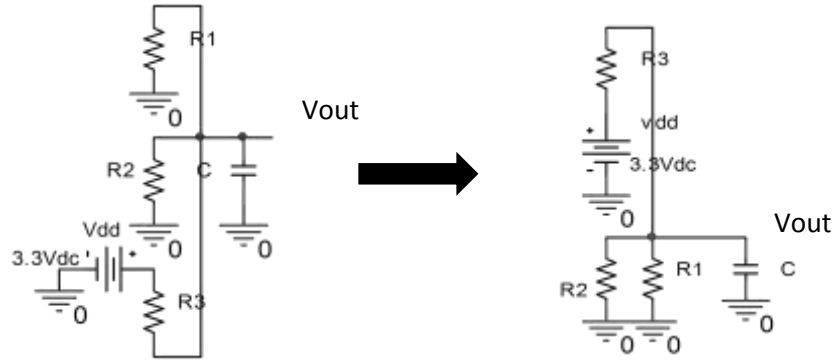
الشكل (6) تطبيق فانضوية النسخ الثلاثة

اختيار الجهد المرجعي الذي يسمح بالحصول على الخرج الصحيح حتى في حال وجود عطل يتم من خلال افتراض عطل على خرج إحدى النسخ أي على دخل العاكس كما في الشكل (7):



الشكل (7) افتراض عطل (Stuck low) على خرج الحساس الثالث

وبالتعويض عن كل ترانزستور بمقاومة التمرير الخاصة به نحصل على الشكل (8):

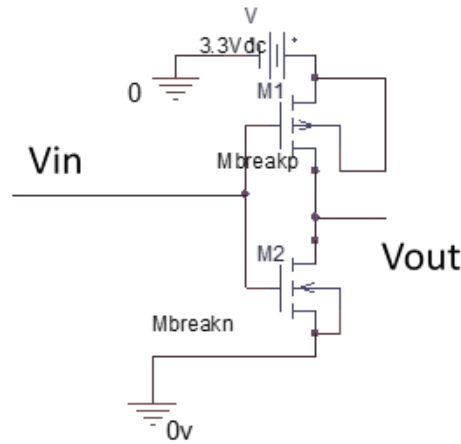


الشكل (8) الشكل الجديد للدائرة بعد اصطناع العطل

من خلال الشكل (8) نستطيع حساب جهد الخرج مع اعتبار مقاومات التمرير لكل الترانزستورات متساوية (R) على النحو التالي: $V_{out} = 3.3 \times \frac{R}{R + \frac{R}{2}} = 1.1 V$ وهو الجهد الحدي الذي يعتبر الجهد المرجعي

• تصميم دائرة العاكس:

يبين الشكل (9) النموذج العام لدائرة عاكس اعتماداً على تقنية CMOS



الشكل (9) دائرة العاكس

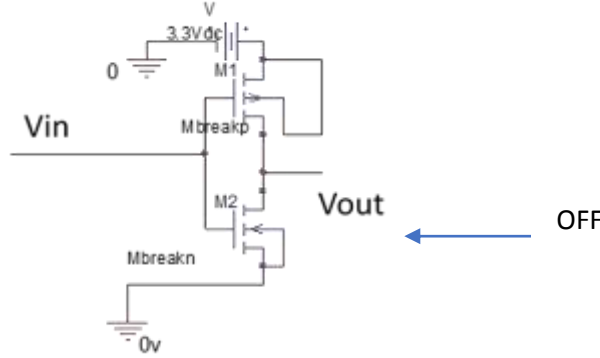
خصائص تحويل الجهد [7]:

- الحصول على الجهد الأعلى $V(oh)$:

يقع عندما يكون الجهد على الدخل صغيراً ($V_{in} = 0V$)، حيث يكون وضع ترانزستورات العاكس كما في الشكل

pMOS is ON, nMOS is OFF

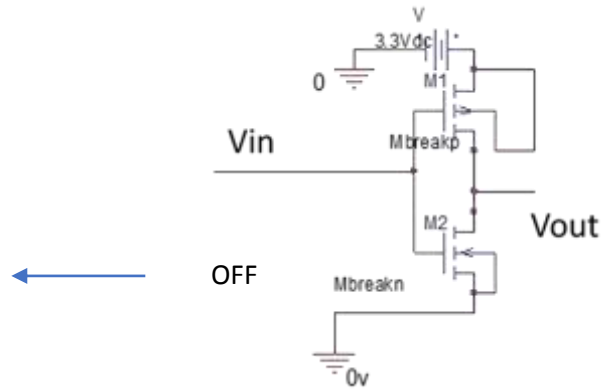
: (10)



الشكل (10) الجهد الأعظمي على الخرج

وبالتالي يكون $V_{OH} = V_{DD}$

- الحصول على الجهد الأدنى V_{OL} : يقع عندما ($V_{in} = V_{DD}$) وبالتالي يكون وضع ترانزستورات العاكس كما في الشكل (11): pMOS is OFF, nMOS is ON

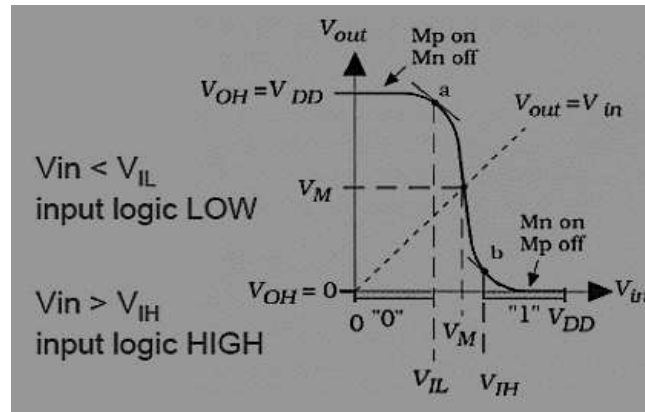


الشكل (11) الجهد الأدنى على الخرج

حيث يتم توصيل $V(out)$ مع الأرض من خلال الترانزستور nMOS.

ويكون: $V_{OL} = 0 V$ ، أي أن جهد الخرج يتراوح بين $V_{OL} = 0 V$ كقيمة دنيا وبين $V_{OH} = V_{DD}$ كقيمة عليا

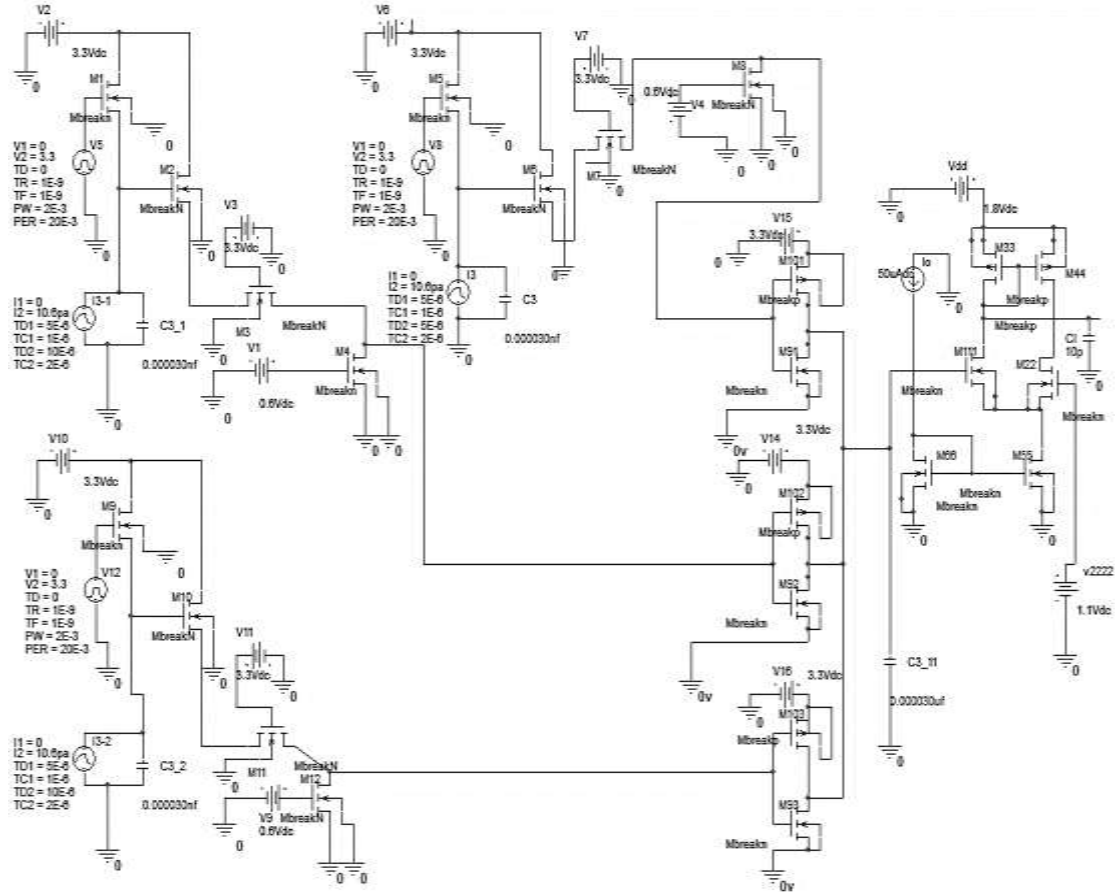
بمطال V_{DD} ، أما بالنسبة لمميزة دخل خرج للعاكس تعطى بالشكل (12):



الشكل (12) مميزة دخل خرج للعاكس

3- خوارزمية تسامحية العطل:

لتطبيق الخوارزمية نحتاج إلى ثلاث نسخ من الحساس الذي قمنا بتصميمه نربط مع TMR السابق الذكر كما في الشكل (6) عندئذ نحصل على الدارة في الشكل (13):



الشكل (13) تطبيق خوارزمية TMR وربط ثلاث نسخ كاملة من الحساس

يضمن TMR مع التكرار الكامل للحساس التعامل مع عطل واحد في إحدى النسخ والأعطال التي تم دراستها هي الأعطال الأكثر شيوعاً في حساسات الصورة وهي:

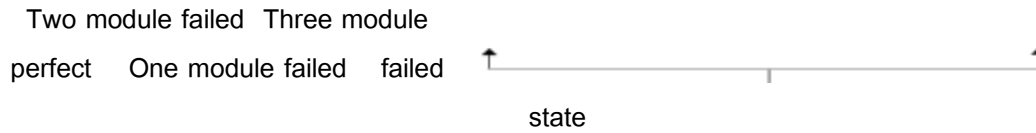
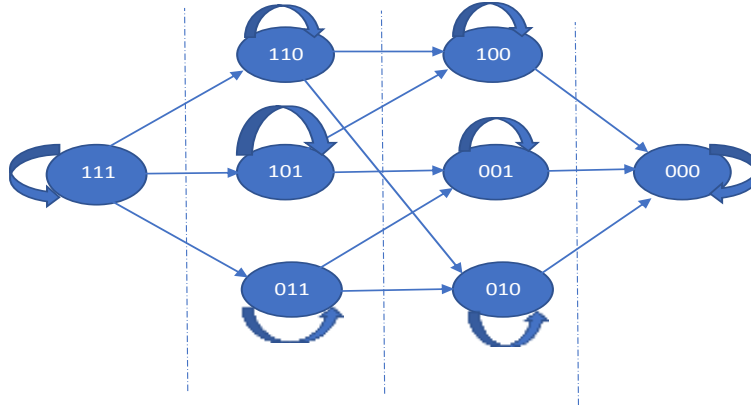
1. Stuck high: أي أن أحد عناصر مصفوفة الصورة (pixel) يبقى بحالة الإشباع الضوئي بشكل دائم.
2. Stuck low: غياب الإشارة الضوئية عن أحد عناصر مصفوفة الصورة (pixel).
3. low sensitivity: ضعف حساسية الديود الضوئي، الناتج عن زمن التشغيل الطويل للحساس أو تراكم الغبار أو أي من المؤثرات الخارجية.

4- تصميم خوارزمية TMR المعدلة:

بعد إدخال التعديل سوف يقتصر التكرار على (ترانزستور تصفير الحساس وترانزستور ملاحقة جهد المنبع بالإضافة إلى الديود الضوئي) لاختصار عدد الترانزستورات فتصبح الدارة كما في الشكل (14) وذلك من دون أي تعديل على دارة المقارن:

أما الانتقالات فهي إما انتقال العنصر من حالة العمل إلى حالة العطل أو أن يتم إصلاحه أي الانتقال بالحالة المعاكسة.

يعطى مخطط الحالة للنظام وفقاً لسلاسل ماركوف كما في الشكل (15):



System failed

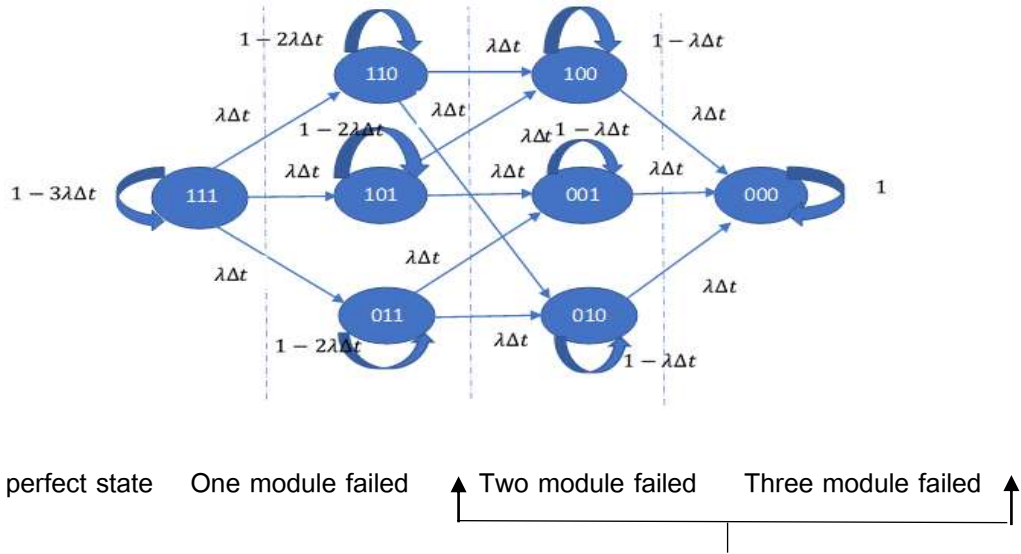
TMR الشكل (15) مخطط الحالة لنظام

يظهر الشكل (15) أربع حالات ممكنة للنظام ككل:

- 1- الحالة المثالية: لا يوجد أي عطل في النظام
- 2- حالة عطل في نسخة واحدة: وفي هذه الحالة يبقى النظام يعمل بشكل صحيح
- 3- حالة عطل في نسختين معاً: وهي إحدى حالات فشل النظام
- 4- حالة تعطل كامل النسخ: وهي حالة فشل كامل للنظام.

ويتوزع الحالات والانتقالات الممكنة مع احتمالات حدوثها تبعاً لمعدل الخطأ (λ) Failure Rate نحصل

على الشكل (16):



حيث λ معدل الخطأ للحساس System failed

الشكل (16) الانتقالات الممكنة مع احتمالات حدوثها

يعرف معدل الخطأ (λ) بأنه عدد المرات التي يتعرض فيها نظام معين للفشل خلال فترة زمنية محددة أو أي وحدة قياس محددة أخرى (عدد مرات تشغيل)

يشرح الجدول التالي المخطط السابق:

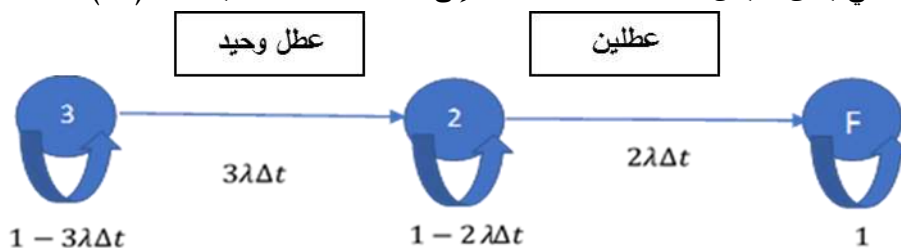
جدول (1) الحالات الممكنة للنظام والأعطال المقابلة لها

الحالة	العطل	ملاحظة
State 3: (111)	عمل كامل النسخ	النظام يعمل بالشكل الصحيح
State 2: 110-101-011	عطل في إحدى النسخ (أولى - ثانية أو ثالثة)	
State 1: 100-010-001	عطل في نسختين: (أولى - ثانية)-(أولى - ثالثة) (ثانية - ثالثة)	فشل النظام
State 0: 000	عطل في كامل النسخ	

وبافتراض:

- الحالة (State 3) هي الحالة التي تكون فيها نماذج نظام (TMR) تعمل جميعها بالشكل الصحيح، والحالة (State 2) هي الحالة التي يكون فيها نموذجين فقط من النظام يعملان بالشكل الصحيح والحالة (State F) هي الحالة التي يكون فيها اثنين من النماذج أو أكثر في حالة العطل.
- وعلى اعتبار احتمالات الانتقالات بين الحالات (State transitions) بنيت على أساس مراعاة عطل واحد في النماذج في كل انتقال.
- على سبيل المثال احتمال الانتقال من الحالة 3 إلى الحالة 2 يعتمد على احتمال تعطل أحد النماذج الثلاثة.
- وبالتالي احتمال الانتقال من 3 إلى 2 هو $3\lambda\Delta t$ واحتمال الانتقال من 2 إلى F هو $2\lambda\Delta t$.

- وبالتالي يمكن تقليص مخطط الحالة لـ TMR إلى الحالات الثلاثة التالية شكل (17):



الشكل (17) حالات TMR المختصرة

حيث احتمال كون النظام في حالة معينة S في اللحظة $t + \Delta t$ يعتمد على احتمال كون النظام في اللحظة t في حالة يمكن من خلالها الانتقال إلى الحالة المطلوبة S واحتمال أن يحدث هذا الانتقال.

يمكن كتابة معادلات الانتقال لهذا المخطط بشكلها المصفوفي كما يلي:

$$\begin{bmatrix} P3(t + \Delta t) \\ P2(t + \Delta t) \\ Pf(t + \Delta t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - 3\lambda\Delta t & 0 & 0 \\ 3\lambda\Delta t & 1 - 2\lambda\Delta t & 0 \\ 0 & 2\lambda\Delta t & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P3(t) \\ P2(t) \\ Pf(t) \end{bmatrix} \quad (2)$$

حيث: $P3(t + \Delta t)$: احتمال كون النظام في الحالة 3 state

$P2(t + \Delta t)$: احتمال كون النظام في الحالة 2 state

$Pf(t + \Delta t)$: احتمال كون النظام في الحالة f state وهي حالة فشل النظام

نحل المعادلات السابقة باستخدام تحويلات لابلاس [9] وتكون النتيجة:

$$R_{tmr}(t) = P3(t) + P2(t) = e^{-3\lambda t} + 3e^{-2\lambda t} - 3e^{-3\lambda t} \quad (3)$$

$$= 3e^{-2\lambda t} - 2e^{-3\lambda t}$$

وذلك أن الوثوقية هي مجموع حالات النظام التي توافق عمله بالحالة الصحيحة $[P(3) + P(2)]$

وباعتبار وثوقية الحساس المنفرد تعطى بالشكل الأسّي [8] كما يلي:

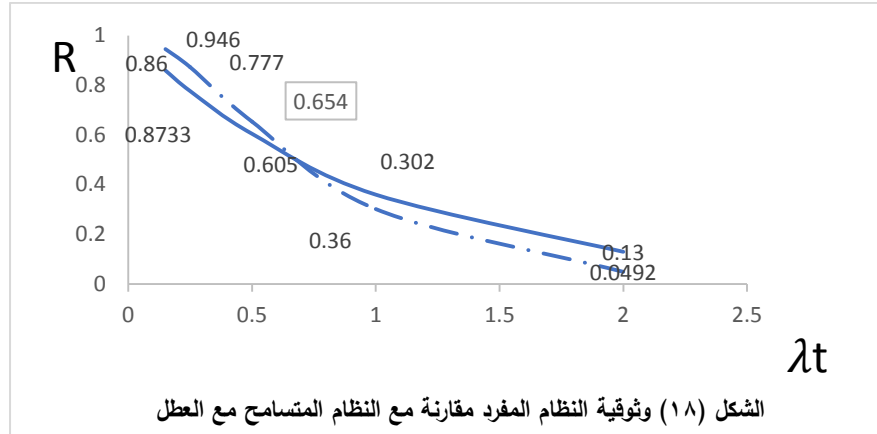
$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (4)$$

يكون:

$$R_{tmr}(t) = 3R^{-2} - 2R^{-3} \quad (5)$$

وهي العلاقة بين وثوقية النظام المفرد (من دون فائضية) ووثوقية نظام TMR المقترح وبشكله البياني عندما

($\lambda = 0.0005 \text{ fault/hour}$) يكون كما في الشكل (18)



ملاحظة: قيمة λ هي قيمة مفترضة حيث تختلف قيمة معدل الخطأ للحساس من شركة مصنعة إلى أخرى. يشير الخط المنقط إلى الوثوقية في حالة النظام المتسامح مع العطل، ويلتقي مع الخط البياني لوثوقية الحساس المفرد عندما تكون قيمة الوثوقية (0.5) أي عند زمن تشغيل (1386.29 h) حيث قبل هذه النقطة الزمنية يكون الحساس المتسامح مع العطل أكثر وثوقية من النسخة الواحدة والعكس يكون بعد هذه النقطة. وبناء على الافتراض السابق لقيمة معامل الخطأ للحساس يمكن حساب الزمن الوسطي لتعطل النظام (Main time to failure) أو اختصاراً (MTTF):

$$1- \quad \text{MTTF} = \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{0.0005} = 2000 \text{ h}$$

وهو MTTF في حالة النسخة الواحدة، أما في حالة TMR يكون MTTF:

$$2- \quad \text{MTTF} = \int_0^{\infty} (3e^{-2\lambda t} - 2e^{-3\lambda t}) dt = \frac{5}{6\lambda} = 1666.6 \text{ h}$$

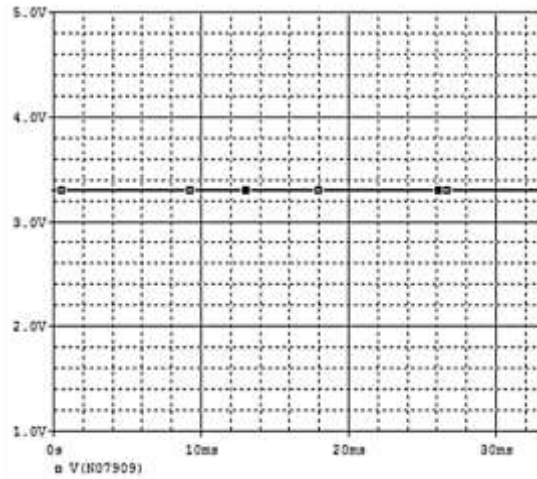
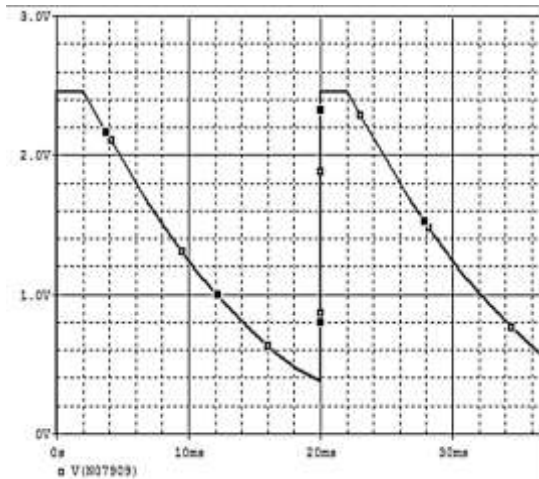
النتائج والمناقشة:

عند تنفيذ التصميم السابقة على برنامج Pspice كانت النتائج كما يلي:

1- الحساس من دون فائضية:

- حالة العمل الطبيعي (بدون أعطال): يبين الشكل (19- أ) خرج حساس الصورة في حالة العمل الطبيعي من القمة إلى القمة حيث يعتبر مطال الإشارة العامل الأهم المدروس لأنه يعبر عن قيمة الإضاءة أي أننا نهتم بالفرق بين القيمة العليا للإشارة والقيمة الدنيا (2.02 v) بين نبضتي التصفير (reset).

- حالة العمل مع وجود عطل (Stuck high) الشكل (19- ب) حيث يبقى خرج الحساس عالماً (stuck) عند المطال الأعلى (3.3 v) وكأن عنصر الصورة يتعرض للإضاءة بشكل مستمر وبقية عالية، تم اصطناع هذا العطل من خلال إنشاء دائرة قصيرة (Shorted Circuit) بين خرج الحساس والقطب الموجب لمنع الجهد:



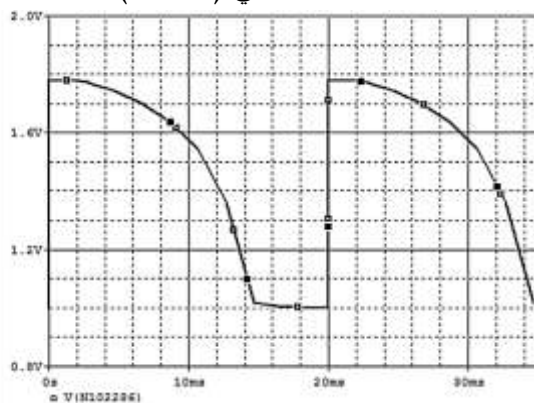
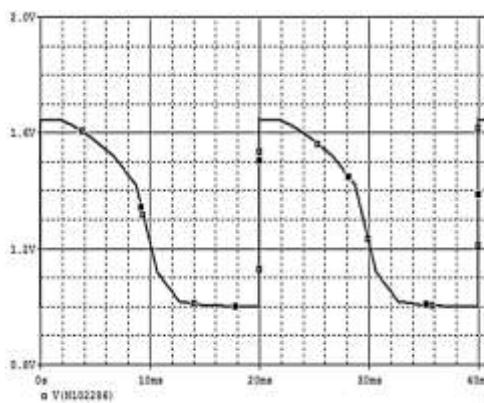
الشكل (19-ب) خرج الحساس في حالة العطل (Stuck high) الشكل (19-أ) خرج الحساس عند العمل الطبيعي

- حالة العمل مع وجود عطل (Stuck low): في هذه الحالة يتم قصر الخرج مع أرضي الدارة ذي الكمون (0 v) ويقابله فيزيائياً حجب الشدة الضوئية عن العنصر الحساس للضوء والنتيجة خرج الحساس مساوي للصفر حتماً (0 v).

2- في حال الخوارزمية المتسامحة مع العطل (تكرار النسخة كاملة):

- حالة العمل الطبيعي (من دون أعطال) يظهر الشكل (20 - أ) نتائج المحاكاة على خرج الحساس المتسامح مع العطل وفق الخوارزمية المطروحة، من الملاحظ انخفاض قيمة مطال الإشارة من (2.02 v) في حالة الحساس الأساسي (بدون فائضية) إلى (0.79 v) في حال تطبيق الخوارزمية وذلك بسبب ازدياد ضياعات الإشارة في العناصر المضافة للدارة.

- حالة وجود عطل في إحدى النسخ (Stuck low) وهو ما يظهره الشكل (20 - ب) حيث على عكس الحال مع الحساس في وضعه الطبيعي (بدون فائضية) بقي الخرج محافظاً على شكل الإشارة المتوقع مع جهد (قمة - قمة) شبه مطابق لحالة العمل الطبيعي (0.65 v).

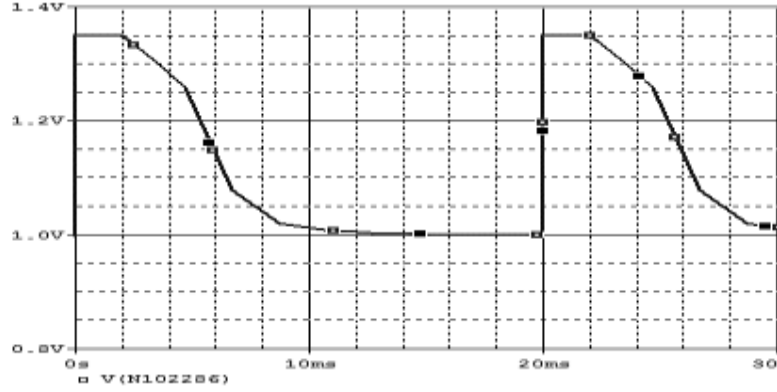


الشكل (20-ب) خرج الحساس في حال عطل (Stuck low)

الشكل (20-أ) خرج الحساس عند العمل الطبيعي

- حالة تعطل نسختين معاً (Stuck low) عندما يحدث العطل في نسختين في الوقت نفسه ينخفض جهد

خرج الحساس إلى (0.35 v) الشكل (21).



الشكل (21) تعطل نسختين معاً

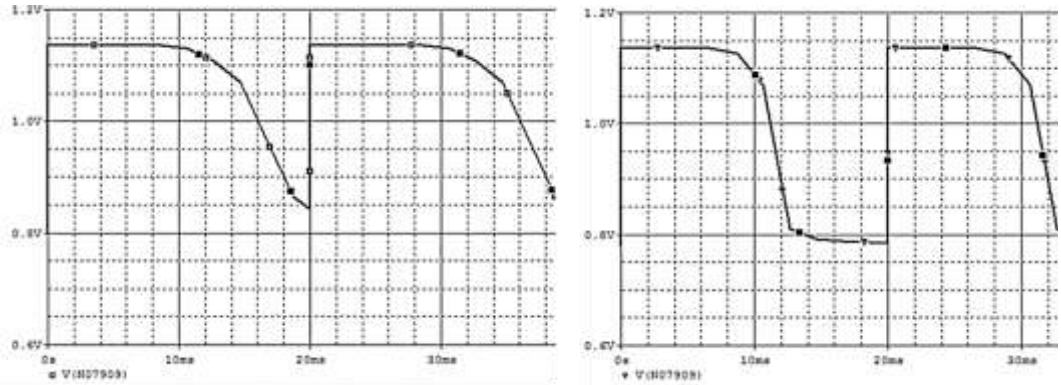
3- حالة TMR المعدلة:

- حالة العمل الطبيعي (من دون أعطال) الشكل (22-أ) بالمقارنة مع الحالات المدروسة سابقاً يعطى جهد

خرج الحساس (قمة - قمة) ب (0.34 v)

- حالة العمل مع وجود عطل في إحدى النسخ (stuck high) الشكل (22-ب) يصبح جهد الخرج للحساس

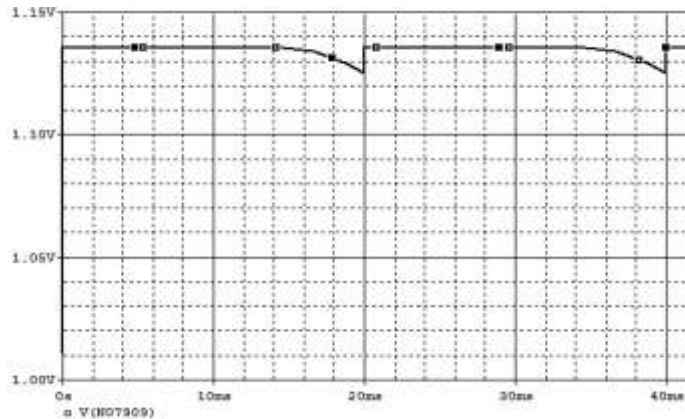
(0.3 v) أي يفارق (0.04 v) عنه في الحالة الطبيعية:



الشكل (22-أ) خرج الحساس في حالة العمل الطبيعي الشكل (22-ب) الخرج في حال عطل في نسخة واحدة

- حالة العمل مع وجود عطل في اثنتين من النسخ (stuck high) ينخفض مطال خرج الحساس من القمة إلى

القمة إلى (0.01 v) الشكل (23):



الشكل (23) خرج الحساس عند وجود عطل في اثنتين من النسخ (stuck high)

مناقشة النتائج:

جدول (1) يبين الجدول مقارنة بين الخوارزميتين المطروحتين من حيث عدد الترانزستورات اللازمة والأعطال المسموحة

الأعطال التي تسبب فشل النظام	الأعطال المسموحة	عدد الترانزستورات	مستوى الفائضية
كل الأعطال	لا يوجد	4	من دون أي تكرار
تعطل النسخ الثلاث بشكل متزامن	أي عطل على مستوى النسخة الواحدة	24	تكرار ثلاث نسخ كاملة (الحالة الأولى)
أي عطل في أي عنصر غير مكرر	أي عطل في الأجزاء المكررة	20	تكرار أجزاء من الحساس (الحالة الثانية)

يلاحظ من خلال نتائج المحاكاة انخفاض مطال إشارة الخرج عند تطبيق الفائضية في كلا الحالتين حيث تمثل القيم بالجدول

التالي:

جدول (2): خرج الحساس في الحالات المدروسة ومقارنته مع الحالة الافتراضية (من دون فائضية)

مستوى الفائضية	العمل الطبيعي	عطل في نسخة واحدة	عطل في نسختين	عطل في ثلاث نسخ
من دون فائضية	2.02 v	لا يوجد فائضية - فشل الحساس	لا يوجد فائضية - فشل الحساس	لا يوجد فائضية - فشل الحساس
خوارزمية TMR	0.79 v	0.65 v	0.35 v (فشل الحساس)	فشل الحساس
خوارزمية TMR المعدلة	0.34 v	0.3 v	0.01 v (فشل الحساس)	(فشل الحساس)

- ينخفض الجهد في حال تطبيق TMR من (2.02 v) إلى (0.79 v) أي أن الخرج بعد تطبيق الخوارزمية

هو % 39 من الخرج بدون فائضية

- ينخفض الجهد في حال تطبيق TMR المعدلة من (2.02 v) إلى (0.34 v) أي أن الخرج بعد تطبيق

الخوارزمية هو % 16.8 من الخرج بدون فائضية

- هوامش الاختلاف بين حالة العمل الطبيعية وحالة وجود عطل واحد (النظام متسامح مع العطل) هي: في

حال TMR % 17.7 وفي حال TMR معدلة % 11.7

- يتم تلافي هذه الخسارة في الجهد من خلال تعديل جهد الخرج برمجياً في المراحل اللاحقة لخرج الحساس والمسؤولة عن معالجة الإشارة حيث يتم ضرب جهد خرج الحساس على سبيل المثال على خرج TMR التقليدية بالقيمة (2.55) لنحصل على القيمة الحقيقية لخرج الحساس وبنفس الأسلوب يتم تعديل خرج TMR المعدلة.
- باعتبار الخرج في حال تعطل نسختين أو أكثر ينخفض إلى قيم بعيدة عن الخرج في الحالة الطبيعية والخرج عند وجود عطل في نسخة واحدة فإنه وحتى بعد التعديل البرمجي يبقى خارج المجال المسموح للعطل

الاستنتاجات والتوصيات:

- كلا الخوارزميتين تحققان الغرض المطلوب من حيث تسامحية العطل.
- الخوارزمية المعدلة تتفوق من حيث عدد الترانزستورات (التكلفة) بمقدار (4 ترانزستورات لكل عنصر صورة).
- الخوارزمية الأساسية ذات تكلفة مرتفعة ولكنها تخفض الضياع في مطال إشارة الخرج قياساً بالخوارزمية المعدلة.
- في حالة العطل فإن هوامش نقصان مطال جهد خرج الحساس عن حالة العمل الطبيعي أقل عند تطبيق الخوارزمية المعدلة.
- يحدد التطبيق أو الغرض الذي يستخدم فيه النظام الفيديوي أي الخوارزميتين يمكن اتباعها بناءً على حسابات التكلفة والمردود المطلوب تحقيقه من هذا النظام.
- من الواضح أن تقنية تسامحية العطل تزيد التكلفة من خلال تكرار النسخ، لكن هذه التكلفة يمكن تحليلها من أجل التطبيقات الحرجة (Critical Applications) كما هو الحال في أنظمة مراقبة المفاعلات النووية والتصوير الجوي.
- كأعمال مستقبلية يمكن تطوير البحث من خلال:
 - دراسة إحصائية تجريبية لأكثر العناصر عطلاً، ثم اعتماد مفهوم التكرار لهذه العناصر للتوفير في التكلفة.
 - مقارنة بين نظام تسامح العطل الذي يعتمد على العتاد الصلب (Hardware) ونظام تسامح العطل الذي يعتمد على العتاد البرمجي (Software).

المراجع:

1. FILGUEIRA, B. *Modelling and Characterization of small Photosensors in advanced CMOS Technologies*.2012,190.
2. DJAJA, S., CHAPMAN, G. H., CHEUNG, D. Y., & AUDET, Y. *Implementation and Testing of Fault-Tolerant Photodiode-based Active Pixel Sensor (APS)*. In Defect and Fault Tolerance in VLSI systems, proceedings. 18th IEEE International Symposium,2003,53-60.
3. DUBROVA, E. *Fault Tolerant Design: An Introduction*. Royal Institute of Technology, Sweden,2008
4. DUDAS, J., CORY J., GLENN H., ZAHAVA K.,ISRAEL K. *Robust Detection of Defects in Imaging Arrays*. International Society for Optics and Photonics, 2006, 286-297.

5. MAITY, N. P.; MAITY, R. *CMOS Active Pixel Design Using 0.6 mm Image Sensor Technology*. International Journal of Research in Engineering and Technology, India, VOL.03,2014,25-29.
6. LISBOA, C. A., SCHULER, E., CARRO, L. *Going Beyond TMR for Protection Against Multiple Faults*. 18TH Symposium on Integrated Circuits and Systems Design, IEEE,2005, 80-85.
7. JAN, M. R., ANANTHA, C., BORIVOJE, N. *Digital Integrated Circuits–A Design Perspective*. 2002,420.
8. BIROLINI, A. *Reliability Engineering Theory and Practice*. VOL. 5, Springer, Heidelberg,2007,588.
9. DHILLON, B. S. *Reliability, Quality, And Safety for Engineers*. CRC PRESS,2004.
10. BIANCO, S., SIMONE, S., RAIMONDO, S. *Error-Tolerant Color Rendering for Digital Cameras*. Journal of Mathematical Imaging and Vision 50, no. 3,2014, 235-245.
11. CHEUNG, D., GLENN H., SUNJAYA D., YVES A., BOB W., CORY J. *Fault-tolerant active pixel sensors for large-area digital imaging systems*. In Integrated Optoelectronic Devices 2004, 2004, 142-153.