

تحليل الصلادة في نظم تحصيل المعطيات باستخدام النمذجة الرياضية

الدكتور حسن البستاني*

(تاريخ الإيداع 26 / 6 / 2011. قُبل للنشر في 2 / 10 / 2011)

□ ملخص □

تستخدم نظم تحصيل المعطيات لقياس الزاوية في كثير من التطبيقات (السيارات الحديثة، نظم الطيران الحديث)، حيث تُستخدم لهذه الغاية حساسات تعتمد على مبدأ (AMR) Anisotropic magneto-resistive التي تقوم بإعطاء إشارة جهد كهربائية توافق زاوية دوران مسنن ما. قد تتعرض هذه الإشارات الناتجة نتيجة عدد من العوامل كالضجيج ودرجة الحرارة العالية فتؤدي إلى انحرافات في إشارات الدخل التي بدورها تؤدي إلى قيم غير صحيحة للزاوية المُقاسة.

وتعرف الصلادة Robustness بأنها قدرة النظام على الاستمرار بعمله بشكل صحيح بالرغم من وجود انحرافات في بعض بارامترات النظام. أما بالنسبة للصلادة في نظام قياس الزاوية فإنها تُعرف بأنها قدرة النظام على إعطاء القيم الصحيحة لزاوية دوران مسنن ما رغم وجود هذه الانحرافات في إشارات الدخل الناتجة عن الحساس. لذلك قمنا في هذا البحث بدراسة تأثير الانحرافات في إشارات الدخل على الصلادة لنظام قياس زاوية دوران مسنن أساسي معشق مع مسننين ثانويين، كل منهما مربوط مع حساس لقياس زاوية الدوران يعمل وفق مبدأ AMR. وقد تم استخدام بيئة MATLAB لعملية النمذجة الرياضية والمحاكاة ودراسة النتائج وتقويمها.

الكلمات المفتاحية: الصلادة، النمذجة، النظم المتحركة الحديثة، الحساسات، AMR، نظم قياس الزاوية.

* مدرس - كلية هندسة تكنولوجيا المعلومات والاتصالات بطرطوس - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

Using Mathematical Modelling for Analysing Robustness in Data Acquisition Systems

Dr. Hasan Albustani*

(Received 26 / 6 / 2011. Accepted 2 / 10 / 2011)

□ ABSTRACT □

Data acquisition systems are used for angle measurement in many applications, such as modern car and flight systems. Sensors depending on anisotropic magneto-resistive (AMR) effect are used to deliver an electrical voltage signal corresponding to the angle of a rotating gear. These signals may be affected by many causes, such as noise and a high temperature leading to deviations in input signals which in turn lead to incorrect values of the measured angle.

Robustness is defined by the ability of the system to continue its work correctly in spite of the perturbations in some system parameters. In angle measurement systems, robustness is defined by the ability of the system to deliver the correct angle values of a rotating gear despite deviations in input signals delivered by sensors. In this paper, we study the deviation effects in input signals on robustness for the angle measurement of a main rotating gear engaged with two secondary gears. Each secondary gear is attached to an AMR sensor. MATLAB environment will be used for modeling, simulating, and evaluating the results obtained.

Keywords: Robustness, Modelling Modern Automotive Systems, Sensors, AMR, Angle Measurement Systems.

* Assistant Professor, Faculty of Information and Communication Technology Engineering, Tartus, Tishreen University, Syria.

مقدمة:

يعتمد تصميم السيارات الحديثة وإنتاجها اعتماداً كبيراً على نظم تحصيل المعطيات، فمن هذه النظم يتم اختبار جودة تصميم مكونات السيارة، فعلى سبيل المثال يمكن تحصيل المعطيات لاختبار جودة تصنيع مجموعة الحركة أو جودة عمل المحركات أو غير ذلك من عناصر عمل الآليات وذلك تحت ظروف عمل مختلفة.

يتم تحصيل المعطيات في هذه النظم باستخدام حساسات مخصصة لكل نوع من أنواع المقادير الفيزيائية (حرارة، ضغط، سرعة، رطوبة، زاوية، الخ). يقوم الحساس بإعطاء إشارة جهد كهربائية موافقة للمقدار الفيزيائي، ثم تحول هذه الإشارات الكهربائية إلى إشارات رقمية بواسطة مبدلات الإشارة التشابيهية/ الرقمية A/D Converters. يقوم الحاسوب الرقمي بمعالجة المعطيات المجمعة وتحليلها وقياسها وتخزينها، وقد تتعرض الإشارات الناتجة عن الحساسات إلى انحرافات عن القيم الاسمية؛ بالرغم من ذلك يجب على النظام أن يعطي قيمة صحيحة لقياس المعطيات المجمعة. تُسمى هذه العملية بتحليل الصلادة Robustness Analysis.

تم إنجاز العديد من الأعمال السابقة في مجال تحليل الصلادة في مجالات متعددة (كهربائية، الكترونية، تطبيقات متحركة Automotive Applications، برمجيات Software). في المرجع [1] قام المؤلف بتحليل الصلادة للقطع الميكانيكية في السيارات الحديثة اعتماداً على طريقة تحليل الأخطاء Failure Model FMEA Effect Analysis. تعدّ هذه الطريقة من الطرق الحديثة لتحليل الصلادة وتحليل الوثوقية Reliability Analysis وتحليل الأمان Safety Analysis وتحليل الجودة Quality Analysis وتستخدم في كثير من التطبيقات. وقام نفس المؤلف في المرجع [2] بالدراسة نفسها لتحليل الصلادة ولكن باستخدام تحليل الحالة الأسوأ Worst Case Analysis. وفي كلتا الحالتين تم استخدام لغة VHDL-AMS لبناء النموذج الميكانيكي للنظام المدروس خوارزمية Monte Carlo لتحليل النتائج. في المرجع [3] قام المؤلف بدراسة تحليل الصلادة للخوارزميات التطورية Evolutionary Algorithms وتطبيقاتها لتحليل خوارزميات الأمثلة Optimization من خلال تحديد درجة الصلادة وتحديد البارامترات التي تؤثر على صلادة النظام. أما في بحثنا هذا فسوف نقوم بدراسة تحليل الصلادة بشكل مختلف عن الأعمال السابقة من حيث طبيعة النظام المدروس والخوارزميات المستخدمة. فالنظام المدروس هو نظام تحصيل المعطيات لقياس زاوية دوران مسنن ما بحيث يتم استخدام حساسات مغناطيسية لتحويل المقدار الفيزيائي (وهو عبارة عن زاوية دوران) إلى إشارات جهد كهربائية. أما بالنسبة للخوارزمية المستخدمة فسوف نعتمد على بناء لنموذج الخطأ ودراسة صلادة النظام اعتماداً على التحليل الرياضي وخوارزمية تحليل الحالة الأسوأ Worst Case Analysis.

أهمية البحث وأهدافه:

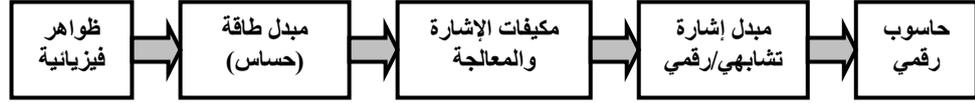
في هذا البحث سوف نقوم بدراسة تحليل الصلادة لنظام تحصيل المعطيات لقياس زاوية دوران مسنن. نتيجة لهذه الدراسة سوف نحدد النقطتين الآتيتين:

- تأثير الانحرافات في إشارات الدخل الكهربائية التي تم الحصول عليها بواسطة الحساسات المغناطيسية، وذلك على صحة الزاوية المقاسة.
- اقتراح مواصفات نظام القياس (عدد سنن المسنن الرئيسي، وعدد سنن المسنن الثانوي) التي تؤدي إلى نظام قياس أكثر صلادة.

طرائق البحث ومواده:

أ- نظام قياس الزاوية

نظم تحصيل المعطيات هي نظم تقوم بتجميع الإشارات من مصادر العالم الفيزيائي وتحويلها إلى إشارات كهربائية تشابهية يمكن قياسها، ومن ثم تحويلها إلى إشارات رقمية بواسطة دارات مبدلات الإشارة التشابهية/الرقمية (A/D converters) من أجل التخزين والمعالجة والتحليل بواسطة الحاسوب. يبين الشكل (1) المكونات الأساسية لنظام تحصيل المعطيات التقليدي.



الشكل (1) نظام تحصيل معطيات

يتكون نظام تحصيل المعطيات من العناصر الأساسية الآتية [4,5]:

1- الظاهرة الفيزيائية physical phenomena المراد قياسها أو معالجتها أو تخزينها كدرجة الحرارة، والرطوبة، والضغط، والزاوية، والضوء... الخ.

2- مبدلات الطاقة transducers أو الحساسات sensors: يقوم مبدل الطاقة بتحويل الطاقة energy من شكل إلى آخر (تحويل الطاقة الميكانيكية إلى طاقة حرارية) بينما تنحصر وظيفة الحساس بتحويل أي نوع من الطاقة إلى طاقة كهربائية electrical energy.

3- مكيفات الإشارة signal conditioning: تقوم مكيفات الإشارة باستقبال الإشارة الكهربائية من خرج الحساس وإعدادها لتقديمها إلى مبدل الإشارة التشابهي/الرقمي، وتقوم بمجموعة وظائف منها على سبيل المثال:

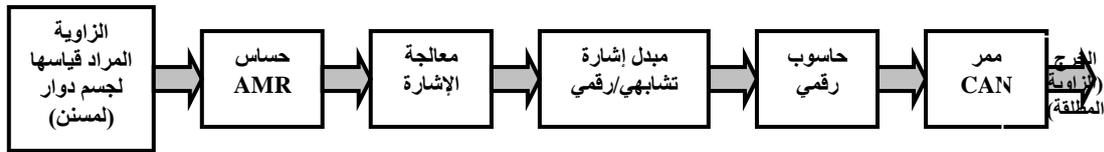
- الترشيح filtering.
- التضخيم amplification.
- حذف الضجيج noise elimination.
- الخطية linearization.

4- مبدلات الإشارة التشابهية/الرقمية analog to digital converters: تقوم مبدلات الإشارة بتحويل الإشارة الكهربائية التشابهية إلى إشارة رقمية من خلال عمليات التقطيع sampling والتكميم quantization، ومن ثم يتم إرسالها إلى الحاسوب الرقمي عبر ممرات نقل المعطيات (PCI, RS232, RS-485, UART, CAN bus).

5- الحاسوب الرقمي: يقوم الحاسوب بمعالجة المعطيات المجمعَة وتخزينها وتحليلها؛ حيث يتم تحميل الحاسوب الرقمي ببرمجيات خاصة بنظم تحصيل المعطيات قابلة للبرمجة باستخدام لغات برمجة خاصة أو باستخدام لغات برمجة عالية المستوى high level programming languages. تقوم هذه البرمجيات بدراسة خصائص نظام تحصيل المعطيات كالدقة accuracy والثوقية reliability والاستقرار stability والحساسية sensitivity والصلادة robustness.

يوجد العديد من البرمجيات الخاصة بنظم تحصيل المعطيات مثل MATLAB, LabView, SCADA، التي يتم اختيارها وفقاً للتطبيق المستخدم. في بحثنا هذا سوف نستخدم بيئة MATLAB [6] لأنه يحوي مجموعة كبيرة من Toolbox تُمكن من عملية النمذجة والمحاكاة وتقييم النتائج وإظهارها.

يبين الشكل (2) نظام تحصيل المعطيات لقياس الزاوية المراد دراستها (لمسنن ما) المستخدم في كثير من وسائط النقل الحديثة [5].



الشكل (2) نظام تحصيل معطيات لقياس الزاوية

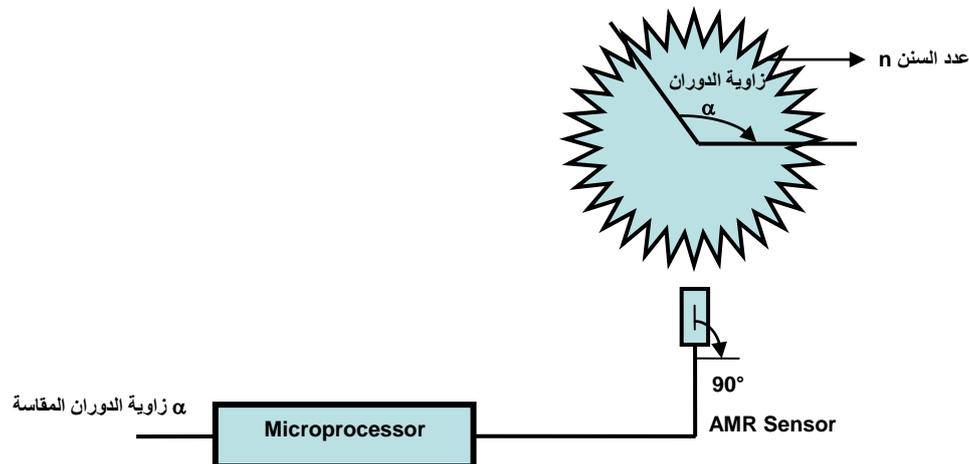
يقوم الحساس بتوليد إشارة جهد كهربائية توافق زاوية دوران المسنن المراد قياس زاوية دورانه. نتيجة لعدة أسباب كالضجيج، ودرجة الحرارة العالية، وأخطاء التجهيزات المستخدمة. وقد تتعرض هذه الإشارة الكهربائية إلى انحرافات تؤدي إلى قيم غير صحيحة لزاوية الدوران. وهنا يأتي دور تحليل الصلادة لدارسة إمكانية إعطاء قيم صحيحة للزاوية المقاسة بالرغم من وجود هذه الانحرافات.

ب- حساب الزاوية α لمسنن وحيد مع حساس وحيد

لقياس زاوية دوران مسنن يدور بزاوية α نقوم بتركيب حساس مغناطيسي يعمل وفق مبدأ AMR [7] حول المسنن. تتغير المقاومة الداخلية للحساس تبعاً لاتجاه الحقل المغناطيسي وشدته. يقوم الحساس بتوليد إشارة جيبية يتم تحويلها إلى إشارة رقمية بواسطة مبدل إشارة A/D. تعالج من قبل المعالج الرقمي كما هو مبين بالشكل (3). تتغير المقاومة الداخلية للحساس وفقاً للزاوية بين اتجاه التيار المار في المقاومة الداخلية للحساس واتجاه الحقل المغناطيسي الناتج عن دوران المسنن. تعطى علاقة المقاومة الداخلية على النحو الآتي [8]:

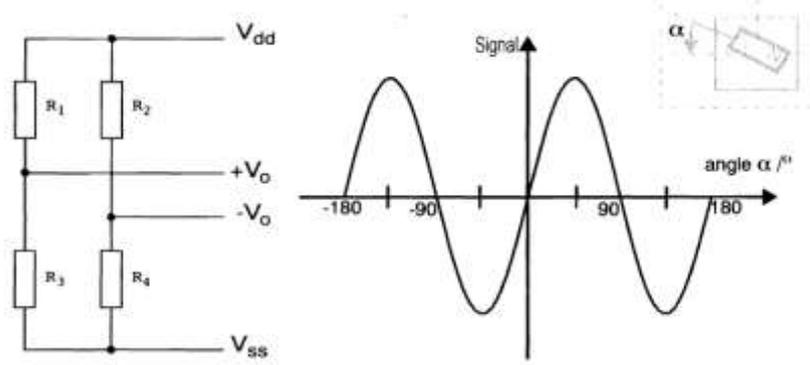
$$R = R_0 + \Delta R_0 \cos^2 \alpha \quad (1)$$

حيث $R_0, \Delta R_0$ هي ثوابت المادة المستخدمة في تصنيع الحساس التي يتم الحصول عليها من النشرات الفنية للحساس، R هي المقاومة الداخلية للحساس، الزاوية α هي زاوية دوران المسنن.



الشكل (3): قياس زاوية دوران مسنن بواسطة حساس AMR

يمكننا رسم الدارة المكافئة للحساس (هي دارة جسر واطسطون) والإشارة الناتجة على خرج الحساس كما هو مبين بالشكل (4) [9].



الشكل (4): الدارة المكافئة للحساس مع إشارة خرج الحساس

يعطى جهد خرج الحساس بالعلاقة الآتية [9]:

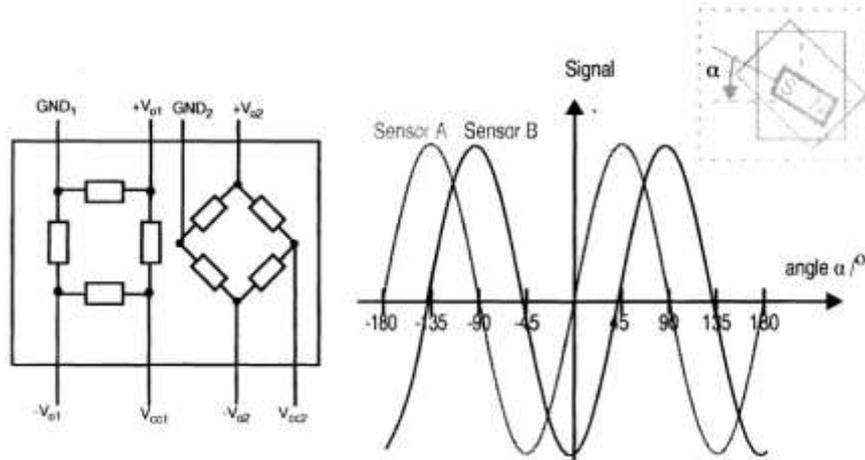
$$V_o = (V_{dd} - V_{ss}) \left(\frac{R_3}{R_3 + R_1} - \frac{R_4}{R_4 + R_2} \right) \quad (2)$$

اعتماداً على العلاقة (1) يمكن كتابة العلاقة (2) على النحو الآتي:

$$V_o = (V_{dd} - V_{ss}) b \sin 2\alpha \quad (3)$$

حيث b ثابت يتعلق بنوع الحساس المستخدم (يتم الحصول عليه من الشركات المصنعة للحساسات).

يتمكن الحساس من قياس زاوية مقدارها 90°. لزيادة مجال قياس الزاوية إلى 180° قامت شركة Philips Semiconductors بتصنيع حساس لقياس الزاوية يستخدم جسري وطسطون two Wheatstone Bridges يسمى KMZ41 أو KMZ43 ضمن دارة متكاملة لمكيفات الإشارة تدعى UZZ9000 للخروج التشابهي و UZZ9001 للخروج الرقمي [10,11,12]. يُزاح كل جسر عن الآخر بمقدار زاوية 45°. يبين الشكل (5) الدارة المكافئة لحساس ذي جسري وطسطون مع إشارة الخرج الناتجة عن كل جسر من جسري وطسطون.



الشكل (5): دارة حساس ثنائي جسر وطسطون مع إشارات الخرج

يولد كل جسر إشارة خرج جيبيّة مزاحة عن بعضها بمقدار 90 درجة. يمكن كتابة علاقة الإشارتين الناتجتين رياضياً على النحو الآتي [8,9].

$$x(\alpha) = X_0 \sin 2\alpha \quad (4)$$

$$y(\alpha) = Y_0 \cos 2\alpha$$

حيث X_0, Y_0 هما مطال الإشارتين الناتجتين، وهما قيمتين متساويتين ($X_0=Y_0$). بقسمة الإشارتين x, y ينتج:

$$\alpha = \frac{1}{2} \arctan \frac{x}{y} \quad (5)$$

حيث α الزاوية المراد قياسها، x الإشارة الجيبية الناتجة عن جسر وطسطون الأول، y الإشارة الجيبية الناتجة عن جسر وطسطون الثاني.

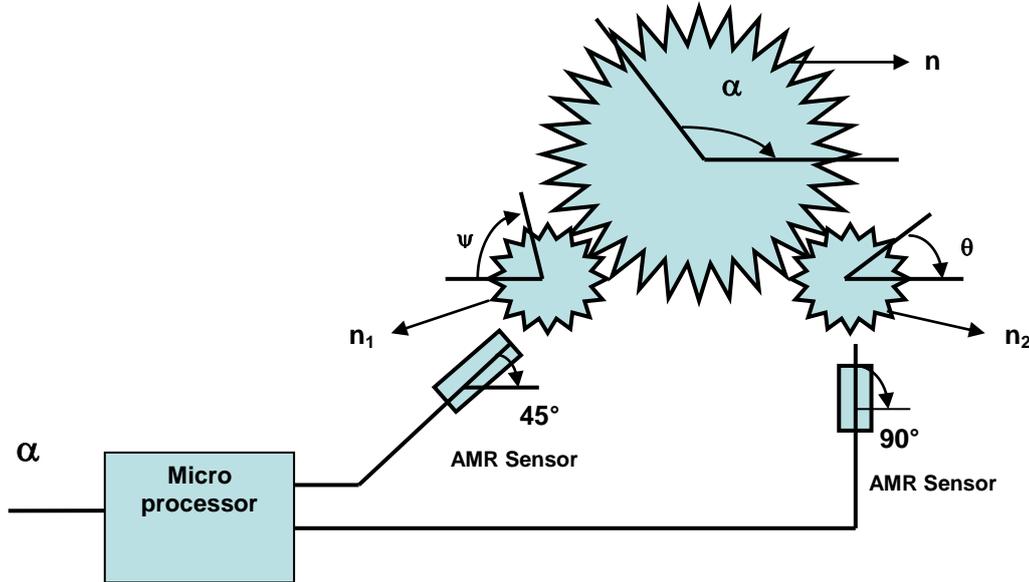
ج- حساب الزاوية α لمسنن رئيسي في نظام ثنائي الحساس

تتأثر الزاوية α تأثيراً كبيراً بدرجة الحرارة التي يعمل فيها الحساس مما يؤدي إلى فرق كبير بين قيمة الزاوية الحقيقية وبين القيمة المقاسة. لذلك تم اللجوء إلى نظام قياس الزاوية α باستخدام حساسين كل منهما مربوط إلى مسنن بحيث ($n_1 > n_2$)، تتعشق هذه المسننات مع مسنن رئيسي المراد قياس زاوية دورانه α (n سن) كما هو مبين بالشكل (6) [8,9]. يعطي كل من الحساسين زاوية نسبية على النحو الآتي [8]:

$$\psi = \frac{n}{n_1} \alpha (\text{mod } \Omega) \quad 0 < \psi < \Omega \quad (6)$$

$$\theta = \frac{n}{n_2} \alpha (\text{mod } \Omega) \quad 0 < \theta < \Omega$$

حيث n_1 عدد سنن المسنن الصغير الأول، و n_2 عدد سنن المسنن الصغير الثاني، و n عدد سنن المسنن الكبير، و ψ زاوية دوران المسنن الصغير الأول (n_1)، و θ زاوية دوران المسنن الصغير الثاني (n_2)، و α زاوية دوران المسنن الكبير، و Ω المجال الزاوي الممكن قياسه بواسطة الحساس، ويساوي 180° للحساس KMZ41.



الشكل(6): قياس الزاوية في نظام ثنائي الحساس

يمكن إعادة كتابة المعادلات (6) على النحو الآتي:

$$\alpha_i = \frac{n_1}{n}(\psi + i \Omega) \quad (7)$$

$$\alpha_j = \frac{n_2}{n}(\theta + j \Omega)$$

حيث i, j هي أعداد صحيحة.

باعتبار أن $\alpha_j = \alpha_i$ هذا يؤدي إلى:

$$n_1 i - n_2 j = \frac{n_2 \theta - n_1 \psi}{\Omega} \quad (8)$$

باعتبار أن الجانب الأيمن للمعادلة هو عدد صحيح؛ وبالتالي فإن الطرف الأيسر أيضاً هو عدد صحيح أي:

$$k = \frac{n_2 \theta - n_1 \psi}{\Omega} \quad (9)$$

و

$$n_1 i - n_2 j = k \quad (10)$$

تُدعى المعادلة (10) Diophantine Equation [13,14] وهي عبارة عن معادلات تحوي متغيرين صحيحين i, j وتملك حلاً متقطعاً Discrete solution. يمكن من المعادلة (9) تحديد مجال للقيمة k وفق الآتي:

من أجل $\psi = 0$ و $\theta = 180^\circ$ تكون قيمة $k < n_2$

من أجل $\psi = 180^\circ$ و $\theta = 0$ تكون قيمة $k > -n_1$

والنتيجة: $-n_1 < k < n_2$

تمكن كتابة المعادلات (7) وفق الصيغة الآتية:

$$\alpha_i = \frac{n_1}{n} \psi + \frac{n_1}{n} i \Omega \quad (11)$$

$$\alpha_j = \frac{n_2}{n} \theta + \frac{n_2}{n} j \Omega$$

تمكن كتابة دور الزاوية α على النحو الآتي [3]:

$$\text{period of } \alpha = \frac{n_1 n_2}{n \gcd(n_1, n_2)} \Omega \quad (12)$$

حيث \gcd القاسم المشترك الأعظم greatest common divisor.

يمكن حساب مجال الزاوية α إذا كان $i = n_2$ و $j = n_1$ ويفرض $n_1 > n_2$ فإن مجالات كل من k, i, j هي على النحو الآتي:

$$-n_1 < k < n_2 \quad 0 \leq i < n_2 \quad 0 \leq j < n_1 \quad 0 \leq i \leq j$$

لحل المعادلة (10) لدينا ثلاث حالات يمكن أخذها بعين الاعتبار:

$$n_1 = n_2 + 1 \quad (أ)$$

من أجل $k \geq 0$ يكون الحل $i = j = k$ ، من أجل $k < 0$ يكون الحل $i = k + n_2$ و $j = i + 1$

(ب) $n_1 > n_2 + 1$ و $\gcd(n_1, n_2) = 1$ تصبح المعادلة (10) على الشكل $i n_1 - j n_2 = k$ ويتحول المعادلة إلى

صيغة متطابقة congruence على الشكل $n_1 i \equiv k \pmod{n_2}$ يمكن حل هذه المتطابقة بطريقة Gaussian trick

[13,14] على الشكل الآتي:

$$i \equiv \frac{k}{n_1} \pmod{n_2} \quad (13)$$

(ج) إذا كان $gcd(n_1, n_2) = c$ (بحيث c عبارة عن ثابت صحيح) تصبح المعادلة (10) على الشكل الآتي:

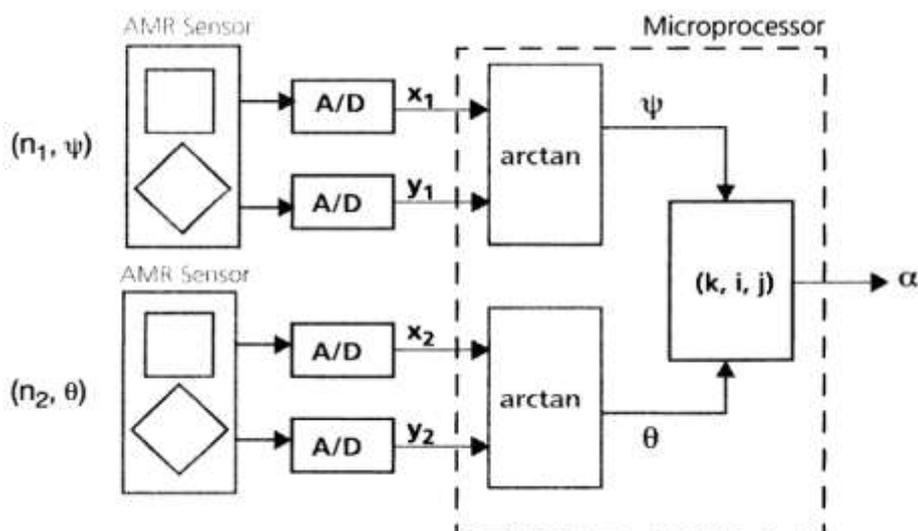
$$i \frac{n_1}{c} - j \frac{n_2}{c} = \frac{k}{c} \quad (14)$$

أو

$$n'_1 i - n'_2 j = k' \quad (15)$$

وبالتالي يمكن حل هذه المعادلة كما في الحالة (ب).

يبين الشكل (7) مخططاً كاملاً لنظام حساب الزاوية α . بعد تشغيل الحساسين يولدان الإشارتين y, x . يقوم المعالج بحساب الزاويتين النسبيتين θ و ψ من خلال المعادلة (6) وبحساب كل من k, j, i من خلال المعادلتين (9) و (10). وفي النهاية يقوم المعالج بحساب الزاوية المطلوبة α من المعادلة (11).



الشكل (7): مخطط تفصيلي لنظام حساب الزاوية α

تحليل الصلادة لنظام ثنائي الحساس

أ- نموذج الخطأ:

يوجد العديد من الأخطاء (الخصائص غير مثالية للعناصر المستخدمة كمبدل الإشارة على سبيل المثال) التي تتسبب بانحراف عن القيم الاسمية nominal values للإشارات x_1, y_1, x_2, y_2 . يمكن صياغة هذا الانحراف في كل إشارة على الشكل الآتي: $\Delta x_1, \Delta y_1, \Delta x_2, \Delta y_2$. سوف نفترض أن الانحراف يتم في كل إشارة بشكل مستقل عن الإشارات الأخرى. يُعطى الانحراف الأعظمي في كل إشارة على النحو الآتي:

$$\Delta x_{1\max} = \Delta y_{1\max} = \Delta x_{2\max} = \Delta y_{2\max} = \Delta xy \quad (16)$$

سوف نقوم بتحليل الصلادة كتابع للزاوية α وبفرض وجود الانحراف الأعظمي في كل إشارة Δxy .

ب- تحليل الصلادة

يقود انحراف الإشارات x, y عن القيم الاسمية إلى قيمة حقيقية k' (من المفترض أن تكون قيمة صحيحة). في هذه الحالة نقوم بتقريب k' إلى أقرب عدد صحيح. إذا كان $k = \text{round}(k')$ نقول عن النظام أنه صلد robust (يعطي القيمة الصحيحة للزاوية المقاسة) وإذا لم تتحقق المساواة نقول عن النظام إنه غير صلد not robust (يعطي قيمة غير صحيحة للزاوية المقاسة).

بإدخال الانحراف في المعادلات (4) يمكن كتابتها على النحو الآتي:

$$\begin{aligned} x'_1 &= X_{01} \sin 2\psi + \Delta x_1 & y'_1 &= Y_{01} \cos 2\psi + \Delta y_1 \\ x'_2 &= X_{02} \sin 2\theta + \Delta x_2 & y'_2 &= Y_{02} \cos 2\theta + \Delta y_2 \end{aligned} \quad (17)$$

حيث:

$$\begin{aligned} |\Delta x_1| &\leq \Delta x_{1\max} & |\Delta y_1| &\leq \Delta y_{1\max} \\ |\Delta x_2| &\leq \Delta x_{2\max} & |\Delta y_2| &\leq \Delta y_{2\max} \end{aligned} \quad (18)$$

بفرض أن $X_{01} = Y_{01} = X_{02} = Y_{02} = 1$ (normalized) يصبح الانحراف الأعظمي في كل إشارة على النحو الآتي:

$$-\Delta xy \leq \Delta x_1, \Delta y_1, \Delta x_2, \Delta y_2 \leq \Delta xy \quad (19)$$

تحسب الزاويتين ψ', θ' وفق الآتي:

$$\begin{aligned} \psi' &= \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{x_1 + \Delta x_1}{y_1 + \Delta y_1}\right) \\ \theta' &= \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{x_2 + \Delta x_2}{y_2 + \Delta y_2}\right) \end{aligned} \quad (20)$$

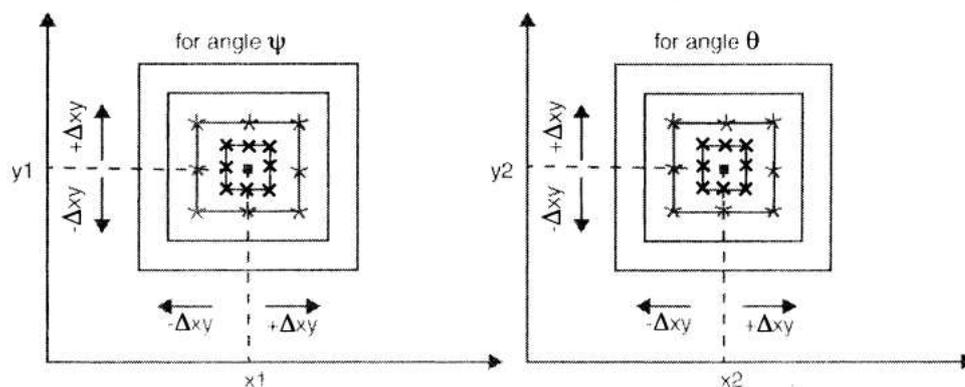
وبالتالي تصبح قيمة k' على الشكل الآتي:

$$k' = \frac{n_2 \theta' - n_1 \psi'}{\Omega} \quad (21)$$

لحساب كافة الاحتمالات الممكنة للقيمة k سوف نستخدم تحليل الحالة الأسوأ [15] worst case analysis. تبدأ خوارزمية تحليل الصلادة مع قيمة افتراضية للانحراف Δxy ومن ثمّ نقوم بحساب الزاويتين ψ', θ' وفق المعادلة (20) عند 9 نقط لكل قيمة للزاويتين ψ, θ وفق الحالات الآتية:

$$\Delta x_1, \Delta y_1, \Delta x_2, \Delta y_2 = (\Delta xy, 0, -\Delta xy)$$

نتيجة لذلك تحسب قيمة k عند 81 نقطة مختلفة كما هو موضح بالشكل (8). تُقرب k' إلى أقرب عدد صحيح، فإذا كانت كل القيم k' تساوي قيم k نقول عن النظام إنه صلد من أجل الانحراف المفترض Δxy . في الخطوة التالية نقوم بزيادة قيمة الانحراف Δxy ونعيد الحسابات نفسها لحساب القيمة k' ومقارنتها مع القيمة الاسمية لـ k ونستمر في هذه العملية حتى تصبح $k' \neq k$ عندها نقول: إن النظام غير صلد، والحالة الأسوأ للانحراف تكون Δxy_{\max} التي لأجلها النظام صلد.



الشكل (8): تحليل الصلادة باستخدام خوارزمية الحالة الأسوأ.

مثال عددي: إذا كان لدينا المعطيات الآتية: $n_1 = 37, n_2 = 29, n = 100$. وبالتالي فإن القيم الاسمية من أجل $\alpha = 4^\circ$ ستكون على الشكل الآتي:

α	x_1	y_1	x_2	y_2	ψ	θ	k
4.00°	0.3685	0.9296	0.4631	0.8863	10.8108°	13.7931°	0

باعتقاد الشكل (8) وبواسطة استخدام تحليل الحالة الأسوأ يمكن الحصول على الجدول (1). نلاحظ من الجدول أن قيمة الانحراف الأعظمي $\Delta xy_{max} = 0.0358$.

- من أجل قيمة الانحراف $\Delta xy = 0.0358$ نلاحظ أن قيمة k' الناتجة تساوي قيمة k الاسمية، وبالتالي فإن النظام صلد من أجل قيمة الانحراف $\Delta xy = 0.0358$.
- من أجل قيمة الانحراف $\Delta xy = 0.04$ نلاحظ أن قيمة k' الناتجة لا تساوي قيمة k الاسمية، وبالتالي فإن النظام غير صلد من أجل قيمة الانحراف $\Delta xy = 0.04$. (انظر الجدول (1)).

الجدول (1): حساب قيم k بوجود الانحراف Δxy

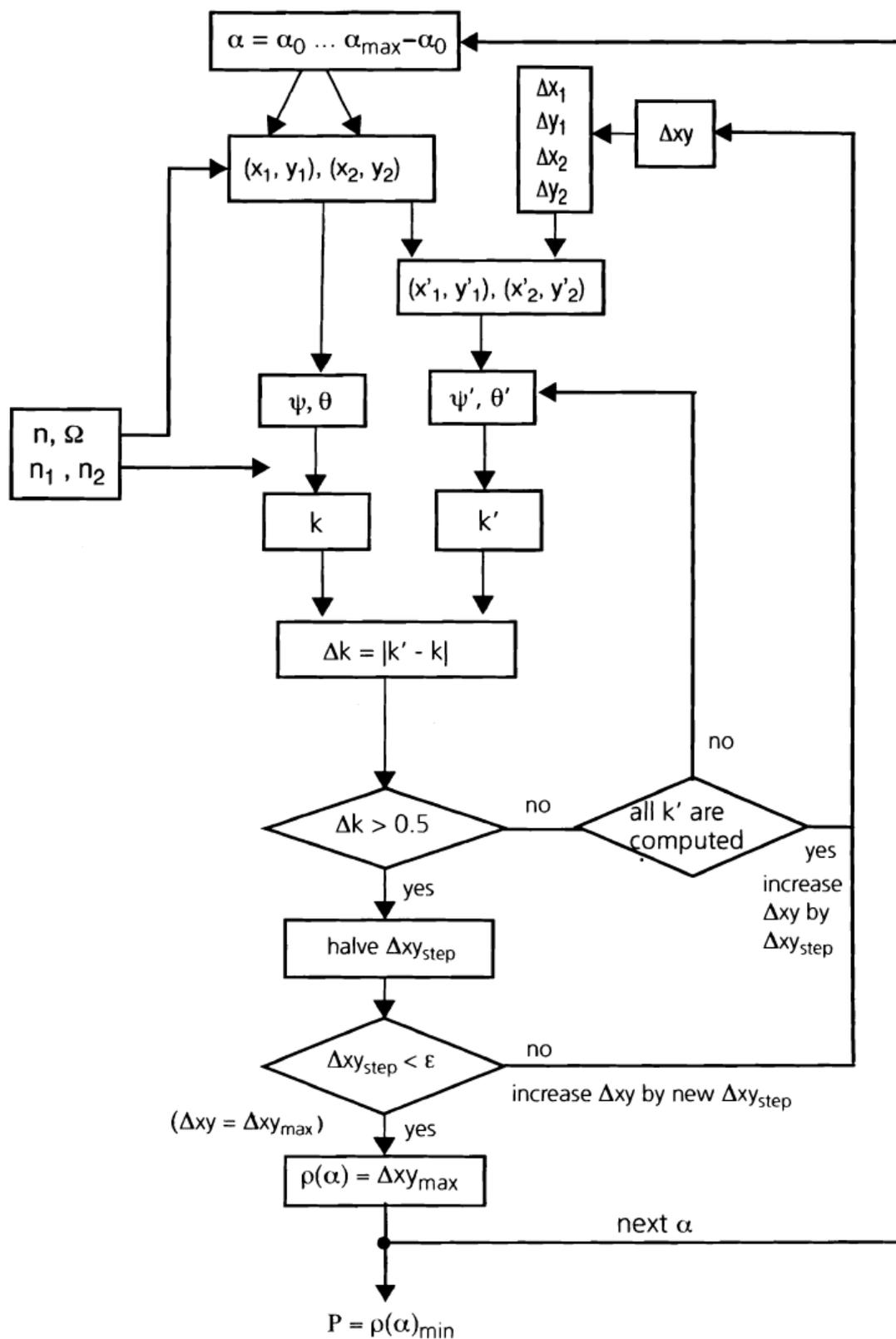
$\Delta xy = 0.02$			$\Delta xy = 0.04$			Maximum deviation position
ψ°	θ°	k	ψ°	θ°	k	
11.1242	14.0292	-0.0264	11.4220	14.2532	-0.0515	$x_1+\Delta xy, y_1+\Delta xy \dots x_2+\Delta xy, y_2+\Delta xy$
11.1242	13.5439	-0.1046	11.4220	13.2805	-0.2082	$x_1+\Delta xy, y_1+\Delta xy \dots x_2-\Delta xy, y_2-\Delta xy$
11.1242	14.5727	0.0612	11.4220	15.3645	0.1275	$x_1+\Delta xy, y_1+\Delta xy \dots x_2+\Delta xy, y_2-\Delta xy$
11.1242	13.0266	-0.1879	11.4220	12.2740	-0.3704	$x_1+\Delta xy, y_1+\Delta xy \dots x_2-\Delta xy, y_2+\Delta xy$
11.5628	14.0292	-0.1165	12.3311	14.2532	-0.2384	$x_1+\Delta xy, y_1-\Delta xy \dots x_2+\Delta xy, y_2+\Delta xy$
11.5628	13.5439	-0.1947	12.3311	13.2805	-0.3951	$x_1+\Delta xy, y_1-\Delta xy \dots x_2-\Delta xy, y_2-\Delta xy$
11.5628	14.5727	-0.0290	12.3311	15.3645	-0.0593	$x_1+\Delta xy, y_1-\Delta xy \dots x_2+\Delta xy, y_2-\Delta xy$
11.5628	13.0266	-0.2781	12.3311	12.2740	-0.5572	$x_1+\Delta xy, y_1-\Delta xy \dots x_2-\Delta xy, y_2+\Delta xy$
10.4807	14.0292	0.1059	10.1327	14.2532	0.2135	$x_1-\Delta xy, y_1-\Delta xy \dots x_2+\Delta xy, y_2+\Delta xy$
10.4807	13.5439	0.0277	10.1327	13.2805	0.0568	$x_1-\Delta xy, y_1-\Delta xy \dots x_2-\Delta xy, y_2-\Delta xy$
10.4807	14.5727	0.1934	10.1327	15.3645	0.3926	$x_1-\Delta xy, y_1-\Delta xy \dots x_2+\Delta xy, y_2-\Delta xy$
10.4807	13.0266	-0.0556	10.1327	12.2740	-0.1054	$x_1-\Delta xy, y_1-\Delta xy \dots x_2-\Delta xy, y_2+\Delta xy$
10.0755	14.0292	0.1892	9.3572	14.2532	0.3729	$x_1-\Delta xy, y_1+\Delta xy \dots x_2+\Delta xy, y_2+\Delta xy$
10.0755	13.5439	0.1110	9.3572	13.2805	0.2162	$x_1-\Delta xy, y_1+\Delta xy \dots x_2-\Delta xy, y_2-\Delta xy$
10.0755	14.5727	0.2767	9.3572	15.3645	0.5520	$x_1-\Delta xy, y_1+\Delta xy \dots x_2+\Delta xy, y_2-\Delta xy$
10.0755	13.0266	0.0277	9.3572	12.2740	0.0541	$x_1-\Delta xy, y_1+\Delta xy \dots x_2-\Delta xy, y_2+\Delta xy$

خوارزمية محاكاة تحليل الصلادة:

تتلخص خوارزمية الصلادة بالخطوات الآتية:

- 1- إعطاء قيمة أولية للانحراف (الحالية والسابقة) تساوي الصفر $\Delta xy_{curr} = \Delta xy_{previ} = 0$.
- 2- إعطاء قيمة لخطوة زيادة الانحراف Δxy_{step} . وتحديد معامل لتوقف الخوارزمية التكرارية وليكن ε .
- 3- حساب قيم إشارة الدخل x_1, y_1, x_2, y_2 .
- 4- حساب قيمتي الزاويتين النسبيتين ψ و θ و من ثم حساب قيمة k .
- 5- زيادة قيمة الانحراف وفق العلاقة $\Delta xy_{curr} = \Delta xy_{previ} + \Delta xy_{step}$.
- 6- حساب قيم إشارة الدخل x'_1, y'_1, x'_2, y'_2 الموافقة للانحراف Δxy_{curr} .
- 7- حساب قيمتي الزاويتين النسبيتين ψ' و θ' و من ثم حساب قيمة k' .
- 8- إذا كان $\Delta k = |k' - k| > 0.5$

قم بزيادة الخطوة وفق العلاقة: $\Delta xy_{step} = 0.5 * \Delta xy_{step}$ إذا كان $\Delta xy_{step} > \varepsilon$ اجعل $\Delta xy_{curr} = \Delta xy_{previ} + \Delta xy_{step}$ وعد إلى الخطوة رقم 6. وإلا فإن الخوارزمية تكون قدأنهت حساب الصلادة ρ وهي في هذه الحالة $\rho = \Delta xy_{previ}$ (وهي الصلادة من أجل قيمة محددة للزاوية α)9- إذا كان $\Delta k = |k' - k| < 0.5$ حافظ على قيمة الخطوة نفسها: $\Delta xy_{curr} = \Delta xy_{previ} = \Delta xy_{previ} + \Delta xy_{step}$ وعد إلى الخطوة رقم 6.تُحسب القيمة الحسابية للصلادة من أجل كل قيمة للزاوية α ضمن المجال الزاوي المحدد. وتحدد القيمة النهائيةلصلادة النظام بالقيمة الصغرى للقيم السابقة الموافقة لكل قيمة للزاوية α . وتكتب رياضياً على النحو الآتي: $P =$ $\rho(\alpha)_{min}$. يبين الشكل (9) مخططاً صندوقياً مفصلاً لخوارزمية تحليل الصلادة.



الشكل(9): مخطط صندوقي مفصل لخوارزمية تحليل الصلادة

النتائج والمناقشة

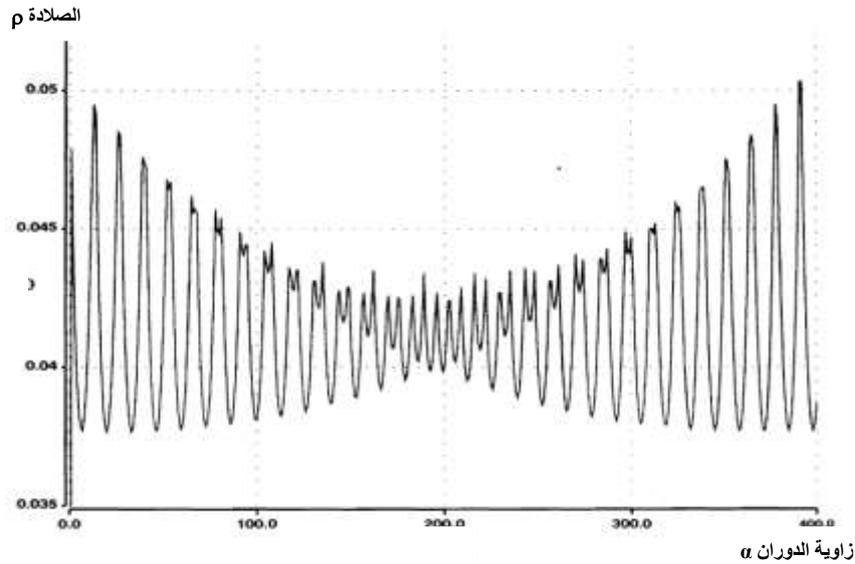
سوف نقوم بعرض نتائج محاكاة خوارزمية تحليل الصلادة على شكل منحنيات، بحيث يمثل كل منحنى صلادة النظام كتابع للزاوية α . سوف نأخذ الحالات الآتية:

- 1- الحالة الأولى: $n_1 = n_2 + 1$.
 - 2- الحالة الثانية: $n_1 > n_2 + 1$ و $gcd(n_1, n_2) = 1$.
 - 3- الحالة الثالثة: $n_1 > n_2 + 1$ و $gcd(n_1, n_2) = 2$.
 - 4- الحالة الرابعة: $n_1 > n_2 + 1$ و $gcd(n_1, n_2) = 2$ من أجل عدد مختلف من السنن عن الحالة الثالثة.
- سوف نختار أمثلة لمواصفات نظام القياس تحقق الحالات السابقة كما هو مبين بالجدول (2).

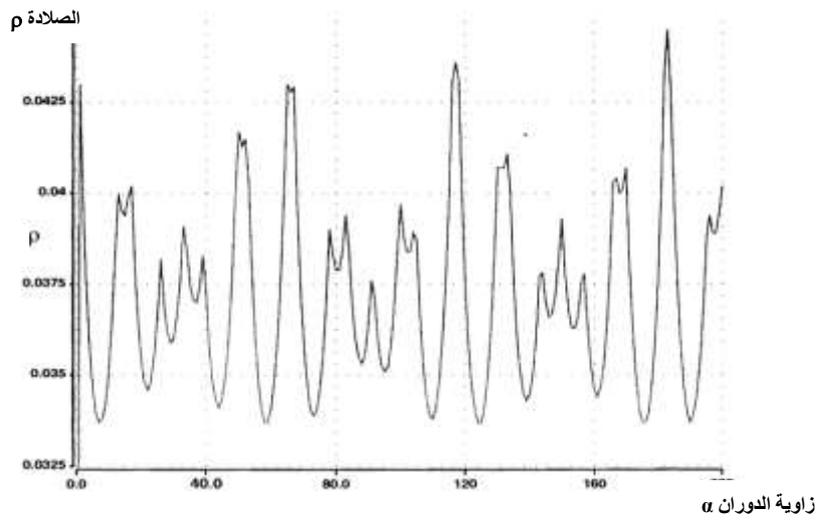
الجدول (2): مواصفات نظام القياس المختارة مع قيم الصلادة والأشكال الموافقة

الشكل الموافق	الصلادة P	(n, n ₁ , n ₂)	الحالات
الشكل (10)	0.03760	(100, 30, 29)	$n_1 = n_2 + 1$
الشكل (11)	0.03359	(100, 37, 29)	$n_1 > n_2 + 1$ و $gcd(n_1, n_2) = 1$
الشكل (12)	0.05691	(87, 40, 38)	$n_1 > n_2 + 1$ و $gcd(n_1, n_2) = 2$
الشكل (13)	0.08212	(42, 28, 26)	$n_1 > n_2 + 1$ و $gcd(n_1, n_2) = 2$

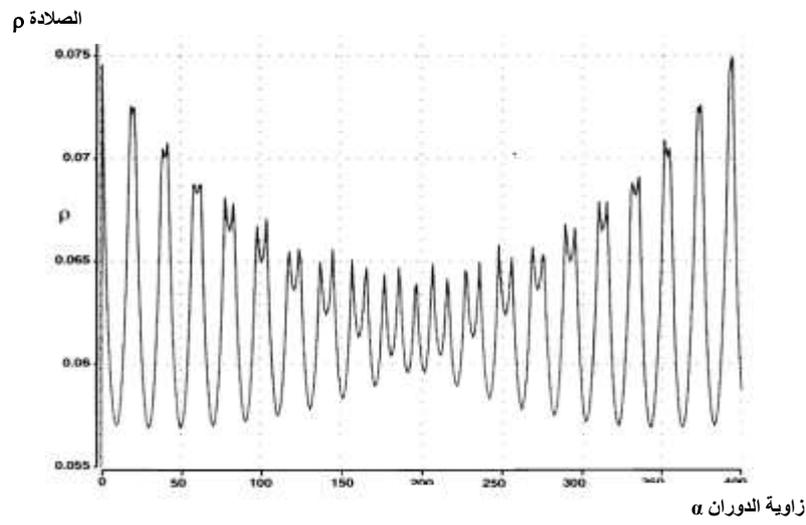
نلاحظ من الأشكال (10)، (11)، (12)، (13) أن النظام الذي يتمتع بمواصفات $(n, n_1, n_2) = (42, 28, 26)$ يملك صلادة أكبر. بمعنى آخر، تسمح هذه المواصفات بمجال انحرافات أكبر $\Delta xy = 0.08212$ في إشارات الدخل x_1, y_1, x_2, y_2 ورغم هذه الانحرافات فإن النظام يعطي قيمة صحيحة لزاوية دوران المسنن الرئيسي. وبالتالي يمكن اختيار المواصفات المبينة أعلاه ليكون النظام أكثر صلادة.



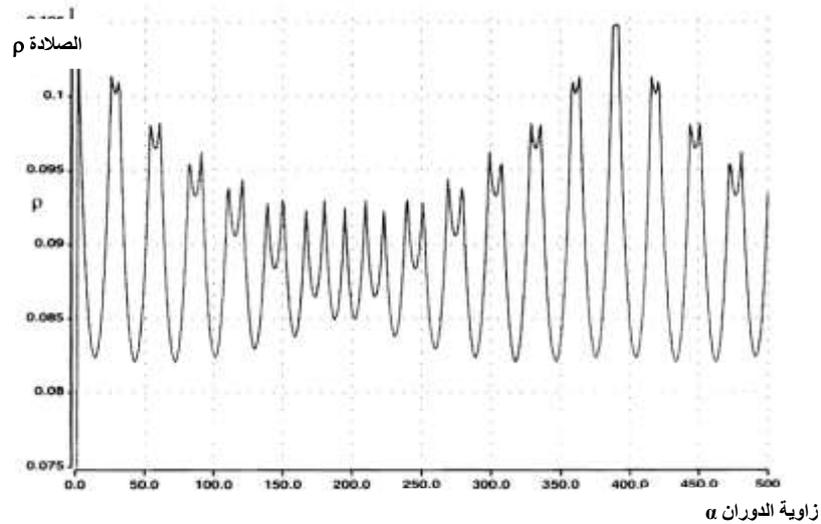
الشكل (10): الصلادة كتابع للزاوية α من أجل $(n, n_1, n_2) = (100, 30, 29)$



الشكل (11): الصلادة كتابع للزاوية α من أجل $(n, n_1, n_2) = (100, 37, 29)$



الشكل (12): الصلادة كتابع للزاوية α من أجل $(n, n_1, n_2) = (87, 40, 38)$



الشكل (13): الصلادة كتابع للزاوية α من أجل $(n, n_1, n_2) = (42, 28, 26)$

الاستنتاجات والتوصيات

قمنا في هذا البحث بدراسة تحليل الصلادة لنظام تحصيل المعطيات لقياس زاوية دوران مسنن يُستخدم في كثير من التطبيقات (كالمسارات الحديثة، ونظم الطيران الحديث). وكما ذكرنا فإن الصلادة تعنى بدراسة عمل النظام بشكل صحيح رغم وجود انحرافات في بعض بارامترات النظام. تبين أنه لدى وجود انحراف في إشارات الدخل لأسباب عديدة كالضجيج وتأثيرات درجة الحرارة العالية قد تؤدي هذه الانحرافات إلى نظام غير صلد. وقد تبين أن الصلادة تتبع لكل من قيمة زاوية دوران المسنن الرئيسي، وعدد سنن المسننات الثانوية. ووفقاً للنتائج التي حصلنا عليها يمكن اختيار عدد سنن المسننات الثانوية لتعطي قيمة أفضل لصلادة النظام على النحو الآتي:

$$(n, n_1, n_2) = (42, 28, 26)$$

وكأعمال مستقبلية سوف نقوم بدراسة النقاط الآتية:

- 1- قمنا في هذا البحث باختيار مواصفات نظام قياس الزاوية لتحقيق نظام أكثر صلادة اعتماداً على نتائج المحاكاة. وكعمل مستقبلي سوف نقوم باستنتاج علاقة رياضية تحدد علاقة صلادة النظام كتابع بعدد سنن المسننات الثانوية.
- 2- دراسة وثوقية نظام تحصيل المعطيات لقياس زاوية دوران مسنن في نظام ثنائي الحساس.
- 3- قامت بعض الشركات حديثاً بإنتاج حساسات جديدة تُدعى Integrated GMR [16] تمكن من قياس مجال زاوي يساوي 360° على عكس الحساسات التي استخدمناها التي تقيس مجالاً زاوياً يساوي 180°. سوف نقوم بدراسة لتحليل تأثير زيادة مجال القياس على صلادة النظام.
- 4- سوف نقوم بزيادة عدد الحساسات المستخدمة لدراسة الصلادة في النظم متسامحة الخطأ Fault Tolerance Systems.

المراجع العلمية

1. THORSTEN GERKE, *Robustness Validation, Teil 1 FMEA leicht gemacht*, 30 Elektronik automotive, 30 Elektronik automotive 3.2010, 1-3.
2. THORSTEN GERKE, *Robustness Validation, Teil 2: Dem Worst Case auf der Spur*, 34 Elektronik automotive 4/5.2010, 1-4.
3. C. BARRICO, C. H. ANTUNES, *Robustness Analysis in Evolutionary Multi-Objective Optimization*, in IEEE Evolutionary Computation, Congress on Computational Intelligence 2006, 1-34.
4. PARK, J ; MACKAY, S. *Practical Data Acquisition for Instrumentation and Control System*, Elsevier IDC Technologies, 2003, 1-12.
5. BISHOP, R. *Mechatronic System Control, Logic, and Data Acquisition*, CRC Press, 2008, 1-8.
6. TIMOTHY A. DAVIS, KERMIT SIGMON, *MATLAB Primer*, Chapman & Hall/CRC, 2005, 1-230.
7. FRADEN, J. *Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs, and Applications*. Springer Verlag, United States of America, 2004, 1-24.
8. DILGER; E. *Vorrichtung und Verfahren zur Messung der Winkellage eines Drehbaren Körpers*, Patent DE 198 55 960 A 1, 15. Juni 2000, 1-22.
9. DILGER, E.; GULBINS, M.; OHNESORGE, T.; STRAUBE B. *On a Redundant Diversified Steering Angle Sensor*. Proceedings of the 9th IEEE International On-Line Testing Symposium (IOLTS'03), 2003, 1-6.
10. DIETMAYER, K.; WESER M. *Contactless Angle Measurement using KMZ41 and UZZ9001*. Application Note AN00004, Philips Semiconductors, 17. January 2000, 1-17.
11. PHILIPS SEMICONDUCTORS *KMZ41 Magnetic field sensor, Objective specification, Data Sheet*, Philips Semiconductors, 18. April 2000, 1-13.
12. PHILIPS SEMICONDUCTORS *KMZ43, Magnetic field sensor, Objective specification, Data Sheet*, Philips Semiconductors, 24. August 2000, 1-8.
13. BURTON, D. M. *Elementary Number Theory*. McGraw-Hill, New York, 2007, 1-180.
14. MANFRED SCHROEDER. *Number Theory in Science and Communication*. Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2009, 1-430.
15. V. LITOVSKI, J. CHOMA, *VLSI Circuit Simulation and Optimization*, Chapman & Hall, 1997, 225-228.
16. K. KAPSER, S. ZARUBA, P. SLAMA, E. KATZMAIER. *Speed Sensors for Automotive Applications Based on Integrated GMR Technology* , in *Advanced Microsystems for Automotive Applications*, Springer-Verlag Berlin, 2008, 211-229.