

التصميم التجريبي والتحليلي لنظام التحكم الذكي بقوة القمط في آلة التشغيل المبرمجة الرقمية CNC المعتمد على نظام محاكاة كهروهوائي

محمد بسام الخباز*

(تاريخ الإيداع ٢٩ / ٣ / ٢٠٢٠ . قُبل للنشر ٢٣ / ٦ / ٢٠٢٠)

الملخص

نظام التحكم الذكي بقوة القمط يتكيف لقمط مشغولة حساسة باستخدام مفتاح التقريب المغناطيسي من خلال عملية التشغيل على الآلة المبرمجة الرقمية. تمت محاكاة طريقة تشغيل وأداء القمط ، وتم تقديم النتائج التي تم التحقق منها على محطة عمل فيستو. ومن ثم تم التأكد من خلال التحميل المختلف للمشغولات مختلفة المواد والاشكال خلال عملية التشغيل ظهرت مشكلة تآكل القطع، فإن هذا العمل يفسر بشكل أكبر معيار التصميم الأساسي لقوى تحميل الأدوات الآلية والتصنيع الكمي لمكوناته.

الكلمات المفتاحية: نظام التحكم الذكي بقوة القمط - مفتاح التقريب المغناطيسي.

Experimental and analytical design of clamping force intelligent control system in electro-programmed CNC operating machine

Mohammad Bassam ALkhabbaz*

(Received 29 / 3 / 2020 . Accepted 23 / 6 / 2020)

ABSTRACT

The clamping force intelligent control system adapts sensitive busy clamps using the magnetic proximity switch through the operation of the digital programmed machine. And. The mode of operation and performance of the switcher was simulated, and the verified results were presented on the Festo workstation. Hence, it was confirmed by the different loading of the different works of materials and shapes during the operation process. The problem of cutting wear appeared, this work further explains the basic design standard for robotic loading forces and the quantitative manufacture of its components.

Key words: Smart Clamping Force Control - Magnetic Zoom.

*Professor , Faculty of Mechanical Engineering and Electrical Engineering , Damascus University .

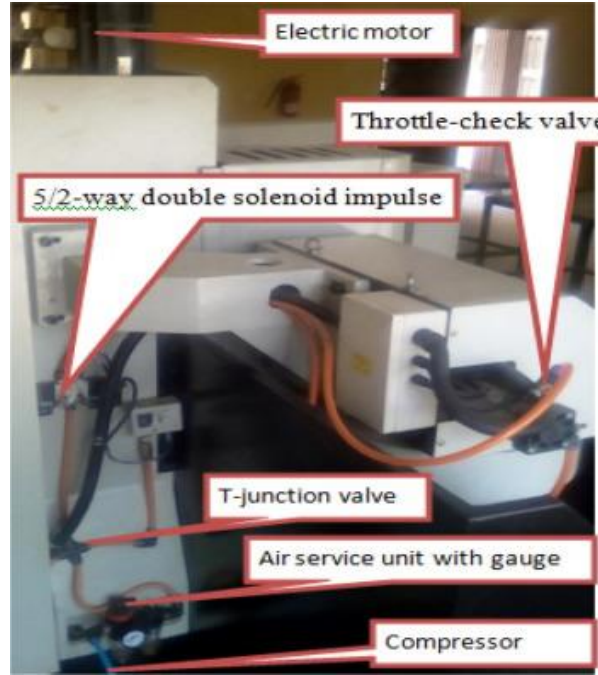
المقدمة :

واجهت الشركة المصنعة للمعدات الأصلية، في الآونة الأخيرة، مشاكل متنوعة في تصميم وتطوير المنتجات الرائدة لتلبية المنافسة العالية لطلب السوق العالمية [1]. فعلى سبيل المثال، عن التعقيد والقدرة على إنتاج سلامة سطح مقبولة في عمليات التصنيع، وخاصة في عمليات التشغيل تم الإبلاغ من قبل بالوغون وآخرون، ٢٠١٥ و ٢٠١٦ [٢،٣]. و أصبح اعتماد آلة التشغيل ذات الخمس محاور على نطاق واسع نظرا لقدرتها على إنتاج و تشغيل أسطح أفضل و استخدامها لتصنيع أشكال هندسية معقدة [٤].

يتعلق استراتيجية عمل الآلة في جزئيين: نظام تشغيل غير الملائم نتيجة لبارامترات قطع مختلفة، ومواد المشغولة المستخدمة، اللذان يؤديان إلى اهتزاز آلة التشغيل، وبالتالي التأثير السلبي على عملية الإنتاج ككل [٥،٦]، نتيجة اهتراء أداة القطع المفرط وتوليد الحرارة داخل المشغولة.

وقد ثبت أنه مع التخطيط والتحليل المناسب للقطع وعملية التصنيع، والوقت، والموارد يمكن أن يكون عمل الآلة بالشكل الأمثل [٧-٩]. و إدارة الوقت والتحسين هي الحكم الهام في جودة العمل في آلة التشغيل الرقمية CNC ذات خمسة محاور، أيضا جودة الطبقة المسطحة و تدرجها للمشغولة والأداة تطرح تحديا صعبا آخر لمهندسي الآلات. هذا يمكن أن يؤدي إلى الأضرار المختلفة خلال عملية التشغيل [١٠-١٣]. وتعد الطبقة السطحية (الانسلاخ) هو النوع الأكثر شيوعا من الأضرار التي تلحق بالمشغولة. و يحدث هذا في الجانب العلوي من المشغولة و يسمى "التقشر المتتابع" وفي الطرف الأدنى من المشغولة يسمى "التشقق التدريجي" [١٤]. ان تعدد الطبقات تحدث غالبا بسبب عملية الاحكام أو أساليب عمل أجهزة القمط على المشغولة ، من أجل تجنب الأضرار الناجمة عن عملية القمط أثناء عملية القطع، و أيضا هندسة المشغولة و طبيعة مادتها يجب أن توضع في الاعتبار. وعلاوة على ذلك، هناك حاجة إلى أنظمة قمت معقدة للمواد الهندسية المعقدة خلال عمليات التصنيع الميكانيكية لضمان دقة الآلات من خلال أدوات القطع على المشغولة [١٢،١٥]. ويظهر عدد قليل من الباحثين [٦،٧] أيضا أن نوعية المشغولات المنتجة تعتمد على نطاق واسع على بارامترات التشغيل، مادة المشغولة ، قوة القمط، وتحديد مواقع ونظام نقاط القمط.

أنظمة التحكم الكهرومائية الهوائية تلعب دورا كبيرا جدا في أنظمة الأتمتة الصناعية بسبب مزايا سهولة الصيانة، والنظافة، وانخفاض تكلفة الإنتاج، وتوافر واستهلاك منخفض للطاقة [٨-١١]. و يستخدم هذا النظام بشكل خاص تغذية ٢٤ فولت كمصدر للطاقة وتعمل على ضغط منخفض ٦ بار. وهو شائع لمعظم أنظمة التحكم الكهرو هوائية للتحكم بالأسطوانات ثنائية التأثير. على الرغم من أن المحركات الهوائية تعمل على النطاق الهامد بسبب التشريد، وقوى الاحتكاك العالية والوقت الميت بسبب الهواء المضغوط، ويجري التقليل من جراء إدخال النظام الكهرو هوائي ودمجها في النظام للمساعدة في التوافق، ترابط جيد، و عملية سهلة. ويبين الشكل (١) عرض لتجميع نموذجي للتوصيلات الكهروهوائية لنظام القمط لآلة التشغيل الرقمية CNC.



الشكل (١) يبين الدارة الكهربائية الهوائية لآلة CNC

مما سبق وبسبب المشاكل التي واجهتها (أي تعدد الطبقات)، يكون من المناسب التحقيق وتحليل أنظمة القمط خلال عمليات القطع، و خصوصاً عند تشغيل مواد حساسة للغاية. ونظراً لهذا، فإن الهدف من هذا البحث الجديد هو نمذجة ومحاكاة نظام التحكم الذكي بقوة القمط SCFC، الذي يتكيف للقمط في الصناعة التحويلية، مع قدرة على الاستشعار عن بعد في "ON" و "OFF" أنظمة القمط خلال عمليات التصنيع الميكانيكي.

١.١. هدف البحث:

في أدوات التصنيع الصناعية باستخدام الحاسب الآلي، المتاحة تجارياً والمعتمدة لإنتاج مختلف قطع غيار الآلات والمكونات، وتتبع أساليب العملية في السعي وراء التباين في كفاءة الآلة والتصنيع الكمي، وتتم مراقبة منتجات المستهلكين يدوياً من مرحلة إلى مرحلة من خلال الملاحظات الفردية للجودة والمطابقة. ويتم إيقاف الجهاز إذا كان هناك أي شكل من أشكال الضرر أو يتم تشغيل نظام إنذار في حالة عدم المطابقة [١٣]. وأصبح هذا ممكناً منذ أن تم مراقبة ظروف التشغيل أثناء المعالجة من خلال أساليب مختلفة داخل نظام التشغيل. لذلك، هناك خطر أكبر من كسر الأداة، التي يمكن تقليصها جزئياً أو كلياً من خلال وجود نظام تثبيت جيد وعملي (نظام تحكم كهرو هوائي). والهدف من هذا البحث هو اقتراح نموذج تصميم جديد لنظام التحكم الذكي بقوة القمط لآلة التشغيل الرقمية CNC، و لتحقيق استراتيجية القمط، يتم محاكاة نظام التحكم الذكي بقوة القمط لفهم مبادئ العمل مع مساعدة برنامج FluidSIM، والنتيجة مقارنة مع الأفكار المطروحة.

الهدف من الدراسة:

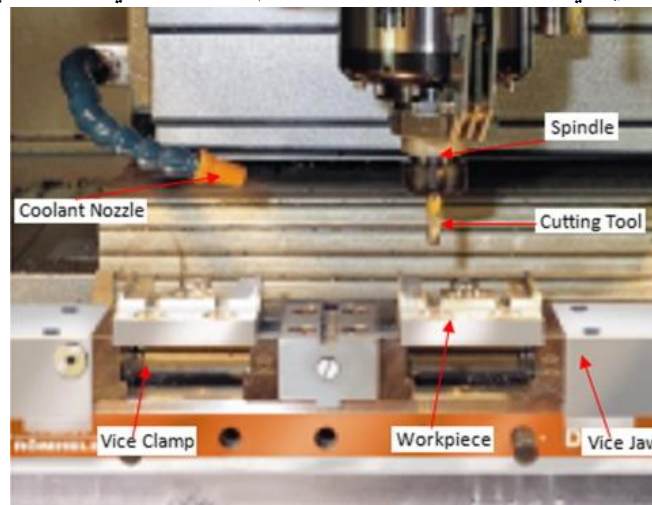
الهدف من هذه الدراسة هو ضبط تقدم المقمط الى الامام وتقليل الضرر الذي يسببه المقمط على المشغولة اعتماداً على مادة المشغولة. ويتم تقليل سرعة المقمط باستخدام صمام خنق للتحكم في التدفق ومفتاح التقريب المغناطيسي. فإنه يوفر التعامل الدقيق مع المشغولة ويحميها من الضرر وكذلك يحسن الحركة إلى الأمام عبر

الاسطوانة. وتستند الاستراتيجية المقترحة على تحميل الآلة المتحركة التي تقع تحت تأثير القوة المطبقة لتحسين نظام القمط بأحسن صورة.

٢. التجارب :

٢,١. النطاق التجريبي:

للتحقيق في طريقة القمط المختلفة للمشغولة في أداة التشغيل المبرمجة باستخدام الحاسب الآلي، تم محاكاة أنظمة القمط المختلفة. كما تم تصميم نظام قمط مع نظام التحكم الهوائي. وعلاوة على ذلك، تم في البداية اعتماد مجموعة كهربائية تعمل بالهواء المضغوط مع زر ضغط للقمطين الأمامية والخلفية، ليساعد مستشعر التثبيت على اكتشاف مادة المشغولة ويسمح لها بالتحرك بسرعة بطيئة بمقدار الشوط الامامي. وهذا هو سماح القمط دون ضرر بالمشغولة. النظام متاح تجاريا في آلة التشغيل المبرمجة باستخدام الحاسب الآلي CNC في فكرة عملية



الشكل (٢) يبين نظام تثبيت مزدوج مرن (SCFC): نظام تثبيت مثالي

القمط ، كما الشكل(٢)، يضمن نظام التحكم الذكي بقوة القمط SCFC، و إعادة هيكلة درجات الحرية وعدم حدوث انحراف (حيث يتم تثبيت المشغولة في مكانها في الآلة من قبل اسطوانة ثنائية التأثير).

٢,٢. جهاز التحكم الذكي بقوة القمط SCFC التجريبي والمحاكاة:

في الشكل(٣) مخطط لدارة لنظام التحكم الذكي بقوة القمط SCFC الذي تم اعتماده للمحاكاة، أما الأدوات المعتمدة للتجريب والمحاكاة فهي مبينة في الجدول (١)، وذاكرة الوصول العشوائي (RAM) ٨ غيغابايت، والكمبيوتر المحمول (Core-i5) المتوافق مع معالج بسرعة ٢,٤ غيغاهيرتز ، وكان يستخدم لنموذج التحكم ومحاكاة العملية. شوط ذراع الاسطوانة ثنائية التأثير (DSNU-20-100-PPV-A) لقمط ١٠٠ مم في حين أن قطر العامل هو ٢٠ ملم مع مساحة سطح داخلية ٣١٤,١٦ مم². قطر المكبس العامل ومنطقة الحلقة من الاسطوانة ثنائية التأثير هي ٨ مم و ٢٦٣,٨٩ مم^٢ على التوالي. وتم استخدام مقياس خطي طوله ٢٠٠ مم لقياس الازاحة الخطية التجريبية للأسطوانة ذات التأثير المزدوج. أقصى ضغط في النظام هو ١٠ بار بينما ضغط العمل هو ٦ بار، و يقاس بمقياس الضغط الشكل (٤).

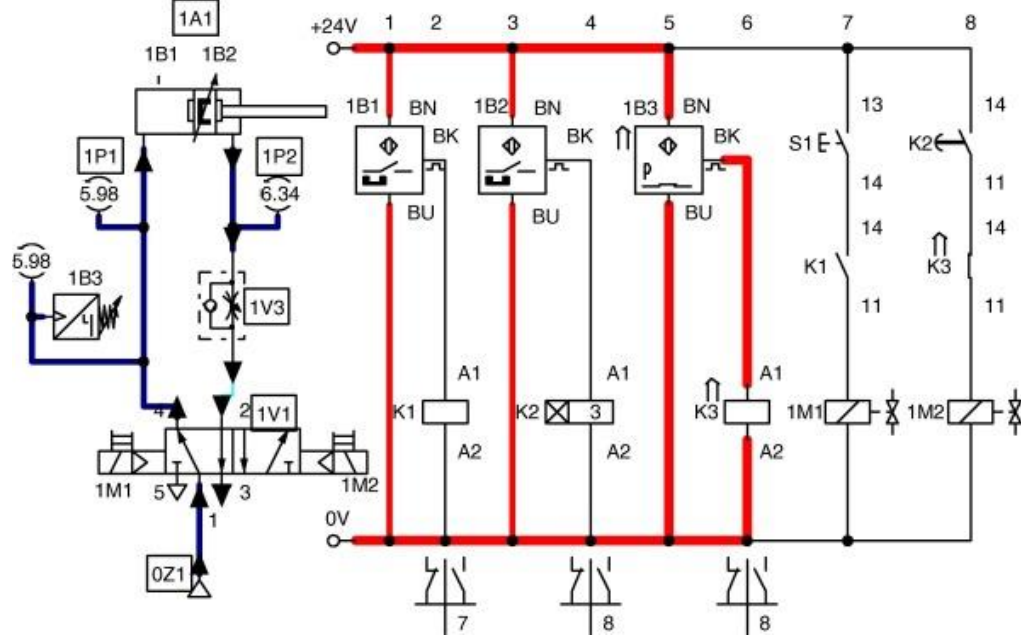
حيث:

1A1 تمثل اسطوانات تعمل بالهواء المضغوط مزدوجة التأثير مع وسادة مغناطيسية تعمل كأنظمة فرملة داخلية وتسمح بربط سلس مع مسمار الضبط للتحكم في الوسادة المغناطيسية.

1B1 ، 1B2 : (D: TP-BG-PZVT-3/2G-3OS-Q4) وهذا هو التمثيل الرمزي لمفتاحي التقريب المغناطيسيين. مسطرة مترية لقياس المسافة من طول إجمالي ٢٠٠ مم ، ٢٧١ يمثل صمام التحكم في التدفق في اتجاه واحد الذي هو مزيج من صمام خنق وصمام ضبط، التي تبطئ حركة نظام القمط إلى الأمام. علماً ان معدل التدفق الاسمي لصمام الخنق والضبط صمام معيار هو ٤٥ لتر / دقيقة و ٦٥ لتر / دقيقة على التوالي.

1V1 : صمام مزدوج 5/2 ذو ملف لولبي (VUVG-L10-B52-T-M5-1P3)، مع معدل تدفق اسمي ١٠٠٠ لتر / دقيقة الذي يغير اتجاه تدفق الهواء الى الداخل او الخارج وأيضا بمثابة قاطع الطوارئ.

K1 و K2 و K3 عبارة عن حاكمتا (ريليه) يتم تشغيلها على الفور بواسطة مفتاح نهاية الشوط لكل منها ، حيث يتم توفير التيار إلى النظام وإيقافه فوراً عندما يحين الخروج من النظام. 1B3 ، تمثل حساس الضغط الذي يكون متصلاً مع مفتاح التبديل لإرسال إشارة كهربائية عندما يتم تحسس الحساس من خلال النظام، والهواء المضغوط يكون في وضعية العمل. كما أنه يقيس الضغط الناتج ، ويمكن تنظيمها بواسطة زر صعودا وهبوطا كما مبين في الشكل (٣). أما وحدة القياس الرقمية لتكثيف للتحكم بتيار الحاكمتا الرقمية و مفاتيح التتابع ومؤقت التأخير الزمني للنظام الكهروهوائي. يمكن تعيين الوقت اعتمادا على وقت انتهاء عملية القطع على الآلة المبرمجة الرقمية CNC .

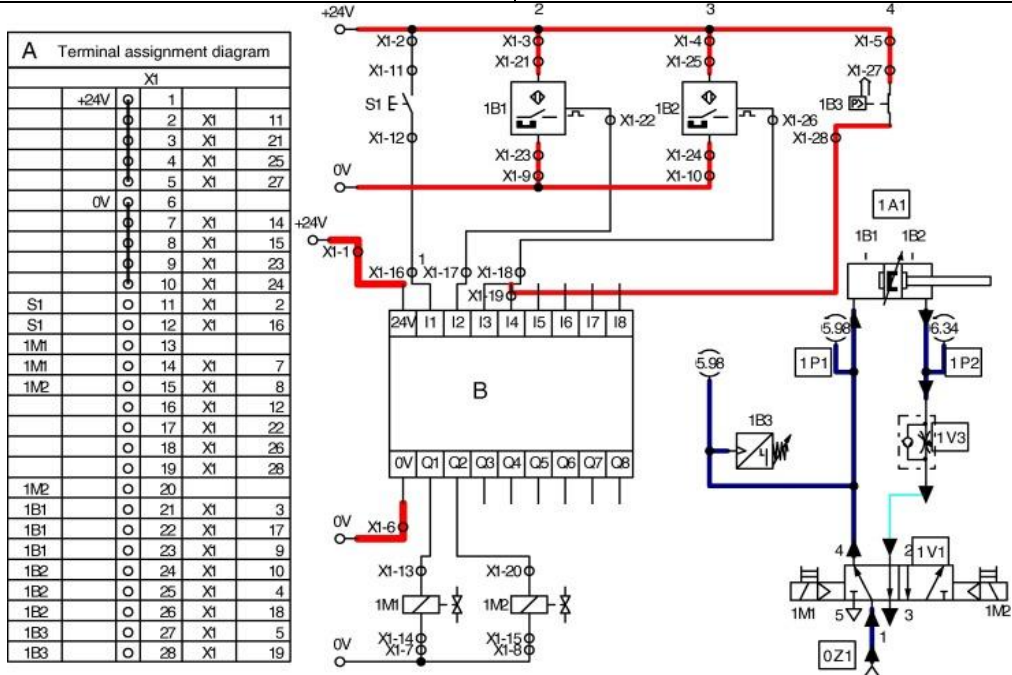


الشكل (٣) يبين الرسم التخطيطي لنظام SCFD

تم التحكم بقمط المشغولة بواسطة اسطوانة ثنائية التأثير الكتر وهوائية عن طريق الضغط على المفتاح S1 ثم ذراع مكبس الاسطوانة يتحرك بلطف لقمط المشغولة، مما ينشط مفتاح التقريب المغناطيسي. و هناك شريط مغناطيسي في نهاية الاسطوانة بمثابة وسادة ، مما يسمح بقمط الأجهزة للضغط على المشغولة بلطف ومنع حدوث التطبيق (انسلاخ و تجريح الطبقات السطحية). عودة المقمط تكون آلية عن طريق تفعيل المفتاح المغناطيسي في الجزء الأمامي من الاسطوانة بعد الانتهاء من عملية التشغيل اعتماداً على وقت محدد.

الجدول (1) الأدوات المعتمدة في التجريب و المحاكاة

الوصف	عدد القطع
اسطوانة ثنائية التأثير	١
منبع كهربائي ٢٤ فولت	١
منبع كهربائي ٧٠	١
مسطرة قياس المسافة	١
صمام ثنائي 5/2 ذو الملف اللولبي	١
مفتاح التقريب المغناطيسي	٢
حاكمة (ريليه)	٢
زر ضغط	١
مفتاح التبديل	٣
صمام ذو الملف اللولبي	٢
حساس الضغط	٢
المانومتر	١
صمام التحكم في التدفق أحادي الاتجاه	١
حاكمة (ريليه) مع مفتاح تأخير	١
تغذية بالهواء المضغوط	١
وحدة خدمة الهواء	١
صمام ثنائي الاتجاه	١

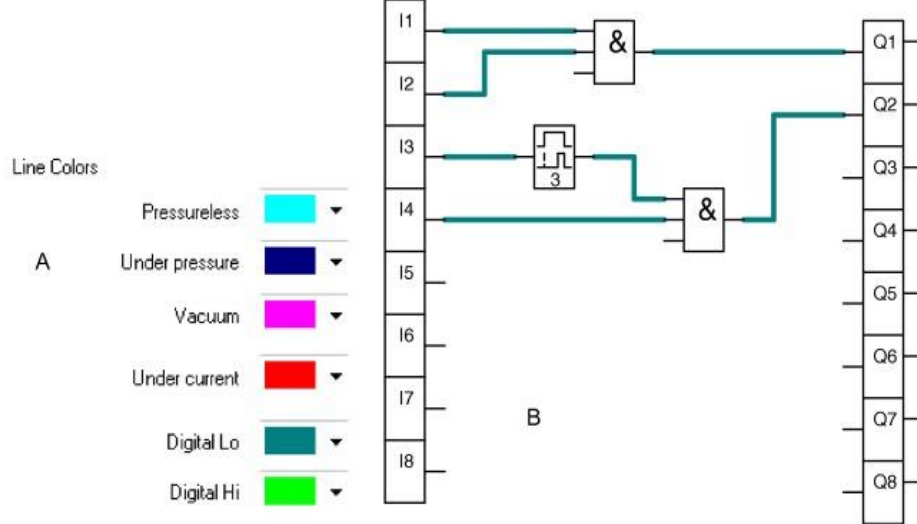


الشكل (٤) يبين (أ) قسم التحكم في الإشارة مع وحدة تحكم منطق قابلة للبرمجة (PLC) للوحدة الرقمية، (B) قائمة تخصيص المحطة الطرفية لنظام SCFC

٢,٣ . خصائص مفتاح التقريب المغناطيسي وصمام التأخير الزمني لنظام التحكم الذكي بقوة القمط:

من المهم أن نستوعب مبدأ عمل مفتاح التقريب المغناطيسي في النظام الكهروهوائي. حيث أن الاستشعار والاستشعار المتأخر يؤدي بالنظام إلى العودة إلى الموضع الابتدائي بطريقة الدفع أو التأثير [١٤، ١٥]. تم استخدام اثنين من مفاتيح التقريب المغناطيسي للمساعدة في التحرك للشوط الأمامي أو الخلفي لنظام القمط المطور الذي يحاكي نظام القمط في الآلة المبرمجة الرقمية CNC. ثم احتساب الزمن الضائع وزمن تشغيل النظام ضمن زمن تأخير الوقت المحدد لإنهاء عملية التشغيل. ليصبح الصمام 5/2 ذو الملف اللولبي مزدوج نشطا عند تطبيق الإشارة على النظام وعلى مفاتيح التقريب المغناطيسيين كما الشكل (٥).

تم اعتماد آلة التشغيل المبرمجة CNC الشكل (١) ، واعتماد نظام قمط في مكان العمل للإعداد التجريبي كما الشكل (٥). و كلاهما (١) و (٥) لهما نفس عملية التحكم الهوائية ، أي أن مكونات نظام القمط في الآلة المبرمجة الرقمية CNC ، و مكونات الوضع للإعداد التجريبي والمحاكاة لنظام التحكم الذكي بقوة القمط. و تم استخدام صمام 5/2 ذو ملف لولبي مزدوج، صمامات خنق و معايرة، وصلات على شكل T و وحدة تخدم هوائية في الآلة المبرمجة الرقمية CNC، الذي يشكل المتحكم الرئيسي في الاجراء التجريبي الجديد المقترح لنظام التحكم الذكي بقوة القمط.



الشكل (٥) يبين (أ) وصف خط جميع الدوائر. (ب) محاكاة حالة تحكم منطوق نظام SCFC مضغوط بعد التشغيل.

٣ . الحساب الرياضي:

يمكن حساب القوى العاملة من خلال ايجاد محصلة على الحبيبات بأصغر واحدة على طول حواف القطع للمشغولة وأداة القطع. وفقا لمعادلة كينزل [٢]، إذا تم تحديد القوة الإجمالية باتجاه أداة القطع وبشكل المماس لوجه الحبيبات وفقا لمعادلة حواف القطع:

$$f = -nk_{c,sim}bd_0 \left(\frac{d'}{d_0} \right) 1 - m_{c,sim}$$

حيث n: هو المتجه الطبيعي لوجه القطع.

$k_{c,sim}$: هو قوة القطع المحددة.

$m_{c,sim}$: هي البارامتر الأسي.

b : هو عرض حافة القطع.

d_0 : هو ١ مم، و d' : هو عمق انغماس الحبيبات المتوقع.

لحساب انحراف المستوي الحاوي b نحسب الانحراف الذي يحدث أثناء عملية التشغيل على المشغولة الذي يحدد بواسطة المعادلة أدناه [٦-٣].

$$b = \frac{FR^2}{16\pi K} \frac{3 + \mu}{1 + \mu}$$

ثابت صلابة مستوي القطع K يمكن أيضا أن يحسب على النحو التالي:

$$K = \frac{EK^3}{12(1 - \mu^2)}$$

F : هو قوة المنطقة

E : معامل يونغ

h : السماكة

μ : معامل بواسون.

$F_t = f(G, M, F_n, \xi_1)$. يمثل وصف تغير المركبة القطرية و المماسية لقوة القطع فيما يتعلق بالوقت يؤخذ

من العملية [٢٥-٢٨]. حيث:

G : المعامل الذي تحدد نوع الاتصال.

M : معاملات تتعلق بخصائص المادة.

F_n : المركبة الوجهية لقوة القمط.

ξ_1 : صلة الالتزام.

R : ثابت الغاز

T : درجة حرارة خارج في النظام

$$(٤) \quad q_1 + q_2 + 2q_3 = c_0 \dot{P}_1 + (a_1 + a_2) \dot{x}$$

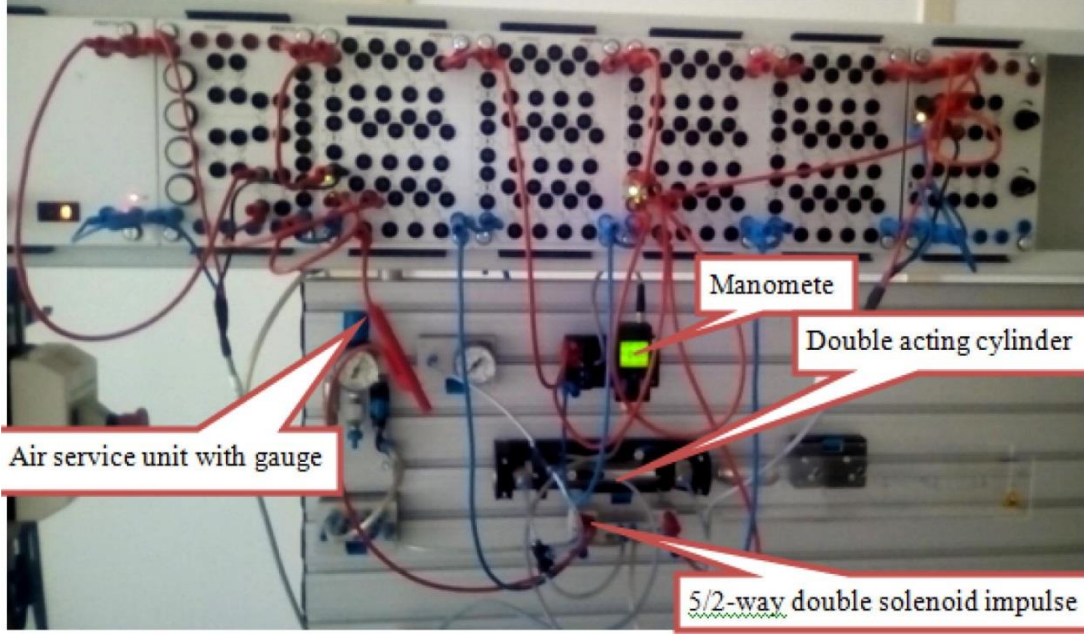
حيث $a_1 = P_1 A_1 / RTs$ و $a_2 = P_2 A_2 / RTs$ ؛ q_i هو معدل التدفق عبر كل الصمامات؛

x موضع اسطوانة التحكم. V_1 و V_2 هي حجوم الاسطوانة مزدوجة التأثير. P_1 و P_2 هي الضغوط الداخلة

والخارجة المطبقة على التوالي على النظام، و A_i هي المساحة الفعالة من الاسطوانة مزدوجة التأثير.

$$(٥) \quad \frac{dP_1}{dt} = n \cdot \frac{R \cdot T \cdot G_1 - A_1 \cdot P_1 \cdot v}{V_{02} - A_1 \cdot x}$$

$$(٦) \quad \frac{dP_2}{dt} = n \cdot \frac{-R \cdot T \cdot G_2 - A_2 \cdot P_2 \cdot v}{V_{02} - A_2 \cdot x}$$



الشكل (٦) يبين جهاز تجريبي لنظام SCFC

١, ٣. المعادلة المطورة لنظام التحكم الذكي بقوة القمط.

من المعادلة (١) نستبدل قيمة a_1 و a_2 ، تبقى درجة الحرارة ثابتة ثم نشق المعادلة النموذجية لتكون.

$$(٧) \quad q_1 + q_2 = c_0 P_i + \left(\frac{P_1 A_1 + P_1 A_2}{R} \right) \dot{x}$$

إذا أخذت جميع معاملات (بارامترات) النظام في الاعتبار. حيث $A_2 = A_1 = 0.00031415 \text{ m}^2$

، 0.0002638 m^2 ، $x = 0.1 \text{ m}$ و R هو ثابت ثابت للهواء الجاف $R = 287.05 \text{ J/Kg}^{-1}\text{K}^{-1}$ أو

$R = 0.28705 \text{ KJ/Kg}^{-1}\text{K}^{-1}$ و ضغط العمل هو $P_1 = 6.0$ بار و $P_2 = 0.0$ بار نتيجة الأشكال (٦)

و(٧). وهكذا عندما يكون هناك ضغط داخل فلا يوجد ضغط خارج و المعادلة النهائية تصبح :

$$(8) \quad q_1 + q_2 = C_0 P_i + 0.00656 \frac{d}{dt} (x)$$

مناقشة النتائج:

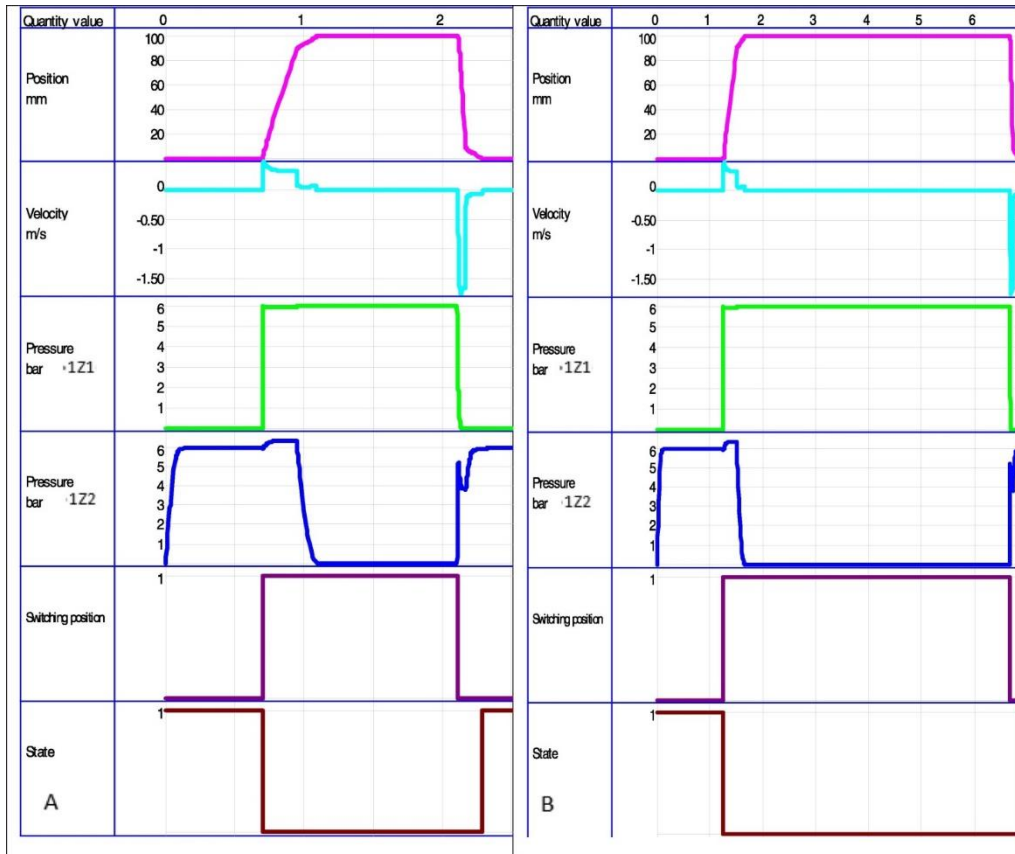
كلا الشكلين (٧) و(٨) يوضحان تمثيل بياني لنتائج المحاكاة و التجربة لقسم اشارة التحكم لنظام التحكم

الكهروهوائي الذكي بقوة القمط. و النتائج في النظام هو لمعالجة إشارة العمل الميكانيكي، كما لوحظ من الأشكال. (٧)

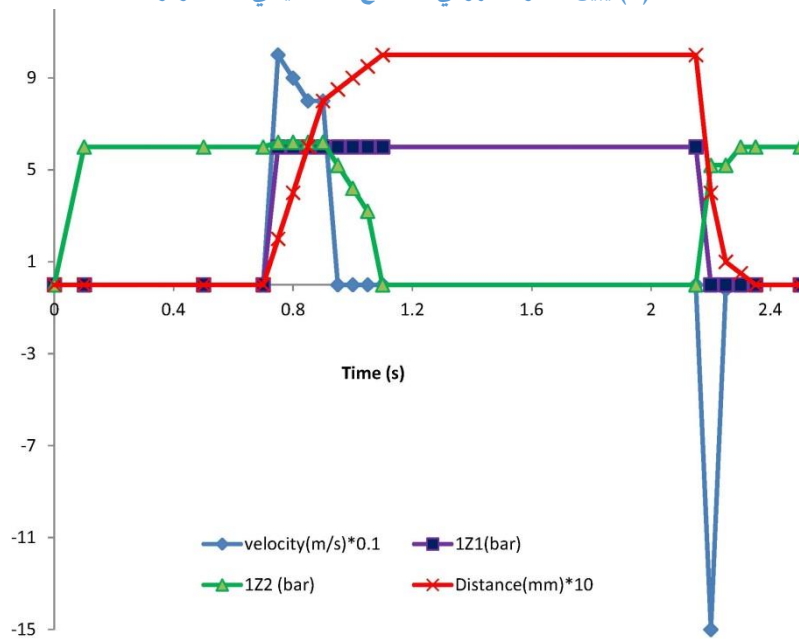
و(٨) وسرعة الاسطوانة ثنائية التأثير $1A1$ تتحرك في الاتجاه الموجب. أيضا، عند نقطة العمل، فإنه يتحرك إلى الاتجاه السالب ثم تعود النقطة إلى الاسطوانة.

لوحة الدوائر المنطقية تمثل أيضا قسم تحكم مختلف في النظام لخفض وتقليل مشاكل الأسلاك الصعبة. و

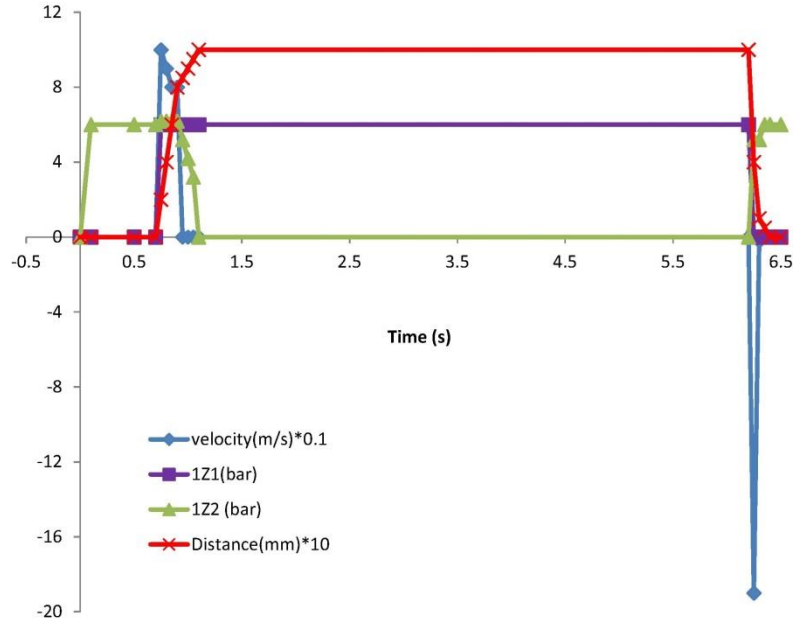
$1M1$ و $1M2$ هي صمامات $5/2$ ذات الملف اللولبي المزدوج مع صمامات التحكم الاتجاهي حيث يتم التحكم بالخرج من خلال حاكمات (ريليه) في النظام. و ترتبط مفاتيح التقريب المغناطيسي $1B1$ و $1B2$ بوحدة تحكم رقمي (PLC)، و رد فعل النظام كما الأشكال (٧-٩).



الشكل (٧) يبين المكون الهوائي، المفتاح المغناطيسي B1 ومرحلته.



الشكل (٨) يبين تشغيل دائرة نظام SCFC لمدة ١ ثانية



الشكل ٩ يبين تشغيل دائرة نظام SCFC لمدة ٥ ثوان

الخاتمة:

تقدم هذه الورقة نتائج نمذجة جهاز التحكم الكهربائي الهوائي الذكي لنظام القمط في آلات التشغيل الرقمية CNC في العمليات الصناعية. تم توفير كميات من الطاقة كبيرة جدا . المقمط الكهروهوائي 24Vs سريع ودقيق في التحميل المستقل وهو تطوير لنظام القمط الذكي مع طريقة قمط متغيرة للتحكم بالقوة . والغرض من ذلك هو ضبط حركة المقمط الى الامام وتقليل الأضرار الناجمة عن المقمط على المشغولة اعتمادا على مادة المشغولة. يتم التحكم في قوة القمط بواسطة الوسادة المغناطيسية الموجودة في الأسطوانة، ويتم توقيت المقمط وفقا للوقت التشغيلي للآلة وأداة القطع مع زمن التأخير الذي تأخذه الاداة، وهذا يتم تعيينه وفقا لدارة الضغط ودائرة الأسلاك. المقمط يفتح تلقائيا عند التأثير على مفتاح التقريب المغناطيسي.

المراجع:

- [1] Felix Damrath, Anton StrahiloV, Thomas Bär, Michael Vielhaber, *Experimental validation of a physics-based simulation approach for pneumatic components for production systems in the automotive industry*, Proc. CIRP 31 (2015) 35–40.
- [2] V.A. Balogun, Isuamfon F. Edem, Paul T. Mativenga, *Specific energy based characterisation of tool wear in mechanical machining processes*, Int. J. Sci. Eng. Res. 6 (5) (2015) 1674–1680.
- [3] Vincent A. Balogun, Isuamfon F. Edem, A.A. Adeleke, P.T. Mativenga, *Specific energy based evaluation of machining efficiency*, J. Cleaner Prod. 116 (2016) 187–197.
- [4] D. Biermann, A. Zabel, T. Brüggemann, A. Barthelmey, *A comparison of low cost structure borne sound measurement and acceleration measurement for Engineering Science and Technology*, an International Journal 19 (2016) detection of workpiece vibrations in 5-axis simultaneous machining, Proc. CIRP 12 (2013) 91–96.
- [5] Ahmed Al-Khazraji, Samir Ali Amin, Saad Mahmood Ali, *The effect of SiC powder mixing electrical discharge machining on white layer thickness, heat flux and fatigue life of AISI D2 die steel*, Eng. Sci. Technol. Int. J. 19 (3) (2016) 1400–1415.
- [6] Ravindranadh Bobbili, V. Madhu, A.K. Gogia, *Modelling and analysis of material removal rate and surface roughness in wire-cut EDM of armour materials*, Eng. Sci. Technol. Int. J. 18 (2015) 664–668.
- [7] Mohammad Mi'radj Isnaini, Ryuta Sato, Keiichi Shirase, *Workpiece setup simulation based on machinable space of five-axis machining centers*, Proc. CIRP 14 (2014) 257–262.
- [8] T. Moriwaki, *Multi-functional machine tool*, CIRP Ann.-Manuf. Technol. 57 (2008) 736–749.
- [9] K. Shirase, S. Fujii, *Machine tool automation*, in: S.Y. Nof (Ed.), Handbook of Automation, Springer, New York, 2009, pp. 837–857.
- [10] W. König, C. Wulf, P. Graß, H. Willerscheid, *Machining of fibre reinforced plastics*, Ann. CIRP 34 (2) (1985) 537–548.
- [11] F. Ullmann, *Bearbeitbarkeit faserverstärkter Kunststoffe; Frankfurter Kunststoff Symposium, Faserverstärkte Polymerverbund- Werkstoffe im Großserien- und Kleinteilebereich; in: Schriftenreihe Praxis Forum, Fachbroschüre Kunststofftechnik 08(91) (1991) 78–93; Frankfurt a.M., Deutschland.*
- [12] S. Rummenhöller, *Werkstoffangepaßte Bearbeitung von Faserverbund Kunststoffen*, VDI Berichte Nr. 965 (2) (1992) 17–30.
- [13] W. König, *Grundlagen zur Bearbeitung von Verbundwerkstoffen und Werkstoffverbunden*, VDI Berichte Nr. 965 (2) (1992) 1–15.
- [14] H. Hocheng, C.K.H. Dharan, *Delamination during drilling in composite laminates*, J. Eng. Ind. 112 (1990) 236–239.
- [15] Bankole I. Oladapo, V.A. Balogun, A.O.M. Adeoye, C.O. Ijagbemi, Afolabi S. Oluwole, I.A. Daniyan, A. Esoso Aghor, Asanta P. Simeon, *Model design and simulation of automatic sorting machine using proximity sensor*, Eng. Sci. Technol. Int. J. 2 (2016).

