

إنشاء الموديل الرياضي لتصميم بروفيل حدبات أعمدة الحدبات من النوع من دون الضرب على قاعدة الصمام لمحركات الديزل

الدكتور بسام عبده *

(تاريخ الإيداع 9 / 10 / 2008. قُبِلَ للنشر في 12/1/2009)

□ الملخص □

يعدّ عمود الحدبات من أهم العناصر الحساسة في محركات الديزل نظراً لوجود الحدبات، وبما أن تزييت هذه الحدبات صعب فإن ذلك يرفع من نسبة اهترائه ويزيدها. وكما هو معلوم فإن أهم مؤشرات عمود الحدبات هي: مخطط رفع الصمامات، أطوار التعبئة، ومفهوم مقطع-زمن الصمامات، وينعكس تأثير هذه المؤشرات بشكل حاد ومباشر في شوط الامتصاص في المحرك وتزويده بالشحنة الجديدة، وفي التبادل الحراري، وبشكل عام في المؤشرات الاقتصادية والقدرية والبيئية للمحرك.

إن الموديل الرياضي المطروح في هذا البحث يمكن من تصميم بروفيل لحدبات عمود الحدبات من النوع المعروف من دون ضربات، حيث إن البروفيل المذكور سيكون أقل تعرضاً للاهتراء وبالتالي سيكون العمر الزمني لاستثماره أطول مقارنة بالبروفيلات العادية، ولقد تم البرهان على جودة البروفيل من خلال مخططات المسار، والسرعة والتسارع للدافع، وكل ذلك بهدف رفع جودة استثمار المحرك وفعالته.

الكلمات المفتاحية: بروفيل - عمود الحدبات - محركات الديزل - تزييت المحركات.

* مدرس - قسم هندسة القوى الميكانيكية - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

Development of A Mathematical Model for Designing The Camprofile of the Camshaft Without Knocking on the Diesel Engine Valve Base

Dr. Bassam Abdeh *

(Received 9 / 10 / 2008. Accepted 12 / 1 / 2009)

□ ABSTRACT □

The camshaft is considered as the most sensitive aspect of the diesel engine, because the difficulty of cam lubrication increases its wearing percentage. The most important parameters of the camshaft are the diagram of the valve rising, the suction strokes and the time-section valves. These parameters will, directly and sharply, affect the suction strokes, fresh charge, heat exchange as well as the economic, environmental and power parameters of the engine.

The mathematical model proposed in this research facilitates designing a camshaft profile without knocking on the valve base. The referred to profile will be less prone to wear down. Thus, its investment duration will be longer, compared to normal profiles. The profile reliability has been proved through the impalare velocity and acceleration diagrams, in the hope of improving the engine's quality and efficiency.

Key words: Profile, camshaft, diesel engine, lubrication engine.

* Assistant Professor, Department of Mechanical Power Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

مقدمة:

تعدّ الحالة الفنية لعمود الحدبات في محركات الديزل إحدى أهم العوامل المؤثرة في فعالية الاستثمار لوسائل النقل، ويعدّ عمود الحدبات من أهم العناصر الحساسة في محركات الديزل نظراً لوجود الحدبات التي يعد تزييتها من الصعوبة بمكان مما يرفع من نسبة اهترائها ويزيدها [1].

ومع التطور الهائل في معدات التصنيع ومصانع التعدين لوحظ أن المشكلة الأساسية تنحصر في تحسين تصميم المحركات ومنها تصميم أعمدة الحدبات ومراقبة مراحل تصنيعها.

إن انكسار نوابض الصمامات واحتراقها وتفحمها واهتراء مقاعدها واهتراء السطح العامل لبروفيل الحدبات نتيجة لسوء التصميم أو التصنيع أو الاستخدام... إلخ. كل ذلك يسبب مشاكل يتعرض لها وبشكل كبير صانعو السيارات والمحركات.

دلّت نتائج الدراسات المستمرة إلى أنه عند زيادة عدد دورات المحرك فإن ترددات نوابض الصمامات وصلت إلى حد غير مسموح به وغير متوقع مما أدى إلى تحرك الصمامات بشكل غير نظامي، وازدادت بالتالي الاهتزازات بين الأجزاء المتحاكة بغض النظر عن التصميم المتبع لآلية التوقيت وبغض النظر عن نوع المعدن المستخدم في التصنيع، كما دلّت الدراسات إلى أن تصميم حدبات أعمدة كامات مع بروفيل مصنع بعدة أقواس ذات أقطار ثابتة ليس جيداً وغير صالح لمحركات الديزل السريعة الأشواط [2].

إن تصميم بروفيل جديد للحدبات يتم عن طريق إنشاء نقط متتالية ومتسلسلة من هذا البروفيل ورسمها وفقاً لإحداثيات محددة تكون عادة خلال درجة واحدة من دوران عمود الحدبات. وتبعاً لإحداثيات هذه النقاط يتم إنشاء القرص الأساسي الذي يتم على أساسه تصنيع الحدبات بالأبعاد الحقيقية. وبالتالي، فإن عملية التأكد من دقة تصنيع حدبات أعمدة الحدبات ومدى مطابقتها للمخططات الفنية يتم وفقاً واستناداً لهذه النقاط.

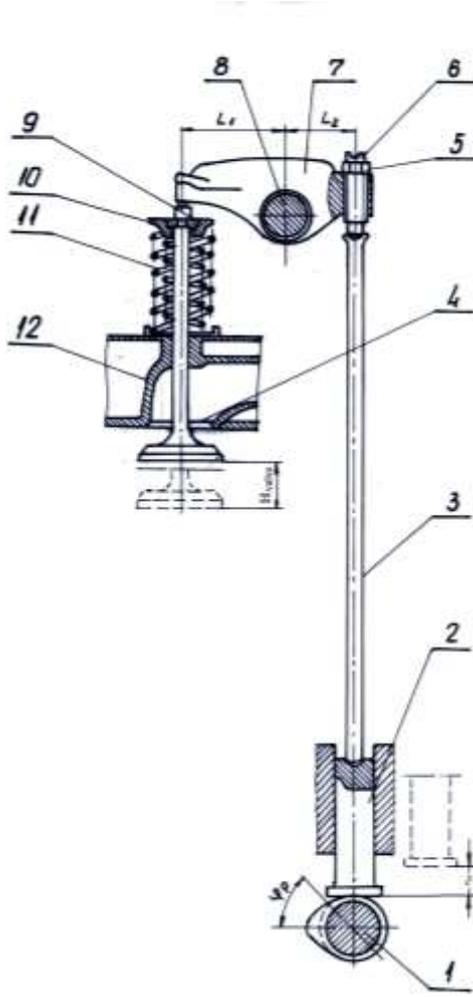
تستخدم محركات الاحتراق الداخلي الحديثة أعمدة الحدبات بحدبات ذات بروفيل يؤمن حركة سهلة وسلسة من دون تسارعات عشوائية. إن استخدام مثل هذه الأعمدة في محركات الاحتراق الداخلي يؤدي إلى تحسين المؤشرات القدرية والاقتصادية من جهة، ومن جهة أخرى يقلل احتمال حدوث الأعطال لأجزاء آلية التوقيت وقطعها، وبالتالي يسهم في تقليل الأخطاء والأعطال والتوقفات في فترة العمل والاستثمار للمحركات.

لتجنب ظهور الأعطال في أجزاء محرك الاحتراق الداخلي ولاسيما تلك المتعلقة بميكانيزم آلية التوقيت، فإنه لا بد من تأمين قانون لحركة بروفيل حدبات أعمدة الحدبات بحيث يكون الفرق بين التسارعات الموجبة والسالبة للأجزاء المتحركة منه أصغر ما يمكن [3]..

في الحالة المعاكسة فإن قوى العطالة الموجبة والسالبة الناتجة عن الأجزاء المتحركة ستخلق شروطاً تزيد من قوى التحميل على البروفيل، هذه القوى والضربات الناتجة عنها ستكون بترددات كبيرة ويمكن أن تخلق ظروفاً لنشوء قوى احتكاك وتلامس كبيرة مما يسيء إلى مقاومة السطوح العاملة للحدبات للاهتراء والتآكل.

كما أن هذه الإجراءات ستخلق ظروفاً لنشوء عمليات اهتراء وأكسدة مما يؤدي إلى ظهور تغيرات كبيرة في زمن - مقطع الصمام (أي العلاقة بين زمن فتح الصمام ومقطع عبور الهواء من خلاله) وانخفاض في المؤشرات الاقتصادية والقدرية والبيئية للمحرك مما يمهد لخروج المحرك من العمل ودخوله إلى مرحلة الإصلاح والترميم.

وبالتالي، فإنه لابد من تصميم بروفيل للحدبات بحيث يؤمن تغيرات بطيئة وسلسه وغير متقطعة لمنحني التسارع



ويؤمن حركة سلسلة وملتسلسلة للأجزاء المتحركة في آلية التوقيت. تمتلك أغلب محركات الاحتراق الداخلي العصرية والمستخدمة في يومنا أعمدة كامات بحدبات ذات بروفيل من دون ضربات يبدأ من بناء مخطط التسارع للصمام. واستناداً إلى المخطط الناتج يتم تحديد قانون أو طريقة تغير سرعة الصمام ومساره.

على التوازي، مع البحث عن المخطط المناسب والأفضل لتسارع الصمام، لابد من البحث عن إمكانية الحصول على مخطط العلاقة بين زمن فتح الصمام ومقطعه بحيث يكون كبيراً ومناسباً.

بهذه الطريقة نحصل على تعبئة و شحن أفضل ومثالي للمحرك بالشحنة الجديدة، ونصل إلى مؤشرات عالية لأدائه وموثوقية كبيرة لعمله في الشروط التي يتم فيها عادة استثمار المحركات وعملها.

أكثر الموديلات انتشاراً و يمكن الاعتماد عليه في إعداد أعمدة الحدبات ذات بروفيل للحدبات بدون ضربات وتصميمها هو موديل أو طريقة كورتس [4]. سيتم، استناداً إلى هذه الطريقة، تصميم الشكل المبدئي والوضعية الأولى لعمود الحدبات ذي بروفيل من دون ضربات، وبعد ذلك سوف يتم مقارنة هذا البروفيل المصمم ومع البروفيلات العادية المستعملة في محركات الاحتراق الداخلي، أو مع بروفيلات أعمدة الحدبات العاملة

وذلك بعد زمن معين من العمل والاستثمار.

الشكل 1. المخطط الكينماتيكي لآلية التوقيت

أهمية البحث وأهدافه:

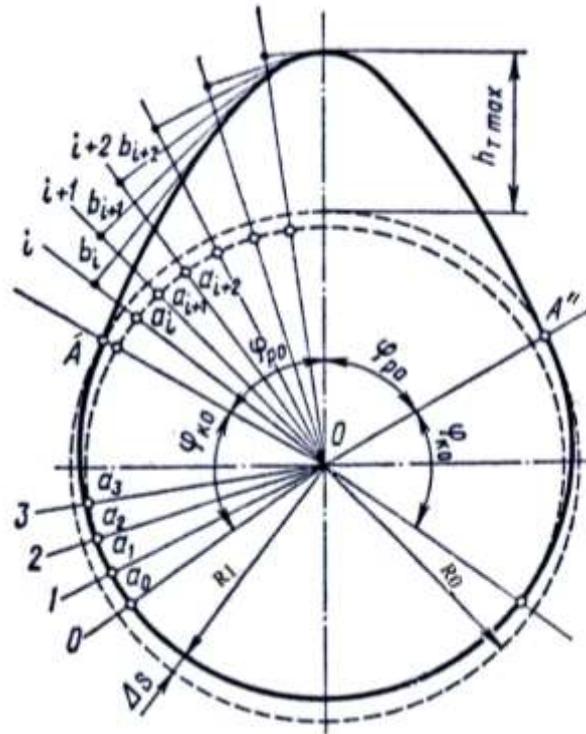
يهدف هذا البحث إلى إنشاء موديل رياضي لتصميم بروفيل لحدبات عمود كامات محرك الاحتراق الداخلي من النوع الانسيابي وهو المعروف من دون ضربات، وذلك لما لهذا التصميم من أهمية كبرى بإطالة عمر هذا الجزء الحساس من أجزاء المحرك، كما أنه من جهة أخرى يؤمن شروط تعبئة أفضل ومثالية للمحرك بالشحنة الجديدة، وبالتالي نصل إلى مؤشرات عالية وموثوقية كبيرة لعمله في ظروف الاستثمار [5].

طرائق البحث ومواده:

استخدم في هذا البحث برنامج رياضي يعتمد لغة MathCat في اختبار الموديل الرياضي الخاص بتصميم بروفيل الحدبات من النوع المقترح في البحث.

مراحل تصميم بروفيل حدبات عمود الحدبات من النوع من دون ضربات:

يمر إنشاء بروفيل حدبات أعمدة الحدبات وتصميمه من النوع من دون ضربات بعدة مراحل [6]:



الشكل 2. البارامترات الأساسية للحدبة

1. المرحلة الأولى:

وتشتمل على المعالم التالية:

- تحديد البارامترات الأساسية لتوزيع المحرك والحدبات وتنسيقها وفقاً للمخطط الموضح في الشكل (2)

و الشكل (3)

- تحديد أطوار توزيع الغازات φ_{p0} من النقاط التي يبدأ عندها الصمام بالفتح A' وينتهي عندها الإغلاق A'' .

- تحديد القيمة العظمى لشوط الصمام $H_{v \max}$ وللدافع $H_{d \max}$ المبين في الشكل (1).

- تحديد الدائرة الأولية للحدبة والذي يبلغ نصف قطرها R_0 ونصف القطر بعد إجراء التصحيح R_1 نتيجة

لوجود الخوصات الحرارية ΔS .

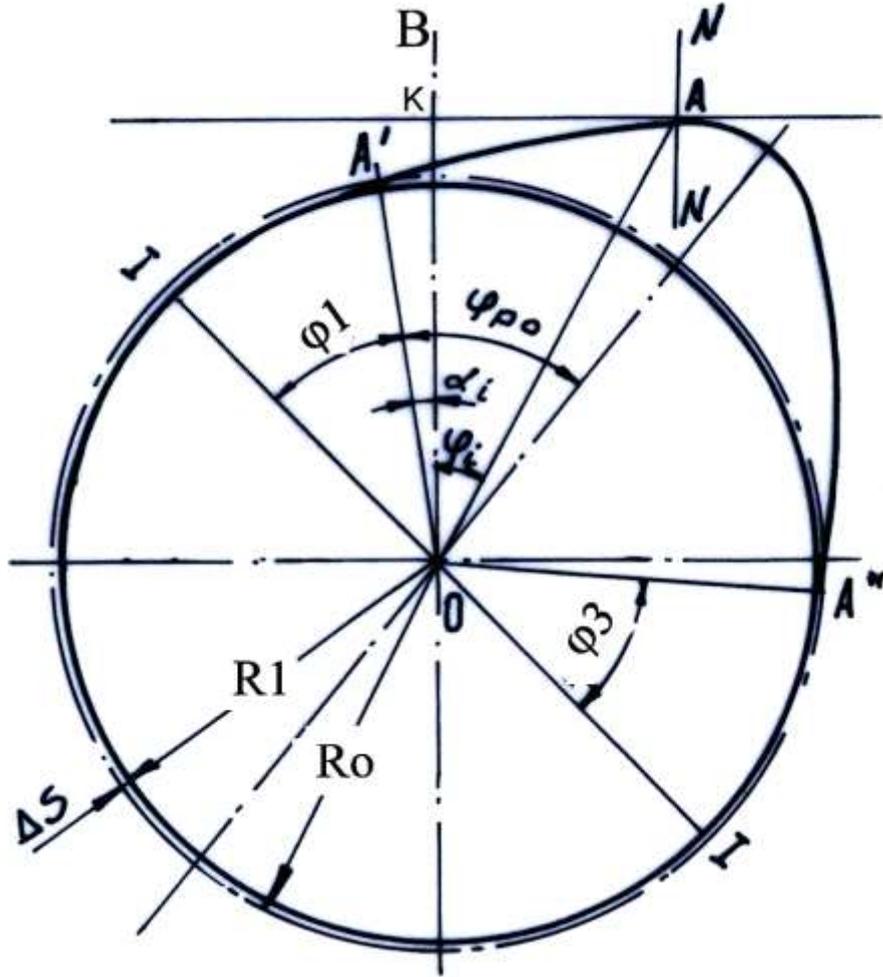
$$\varphi_{p0} = \frac{(\varphi_1 + 180 + \varphi_3)}{4}$$

يتم تحديد الزاوية φ_{p0} بواسطة العلاقة التالية:

حيث: φ_1 - الزاوية المحصورة بين المستوي $I-I$ للحدبة، واللحظة التي يبدأ عندها الصمام بالارتفاع والفتح في النقطة A' .

φ_3 - الزاوية المحصورة بين المستوي $I-I$ للحدبة، واللحظة التي ينغلق فيها الصمام في النقطة A''

φ_{p0} - الزاوية المحصورة بين بداية فتح الصمام ونهاية إغلاقه.



الشكل 3. مخطط توضع البارامترات الأساسية للتوزيع الغازي في المحرك

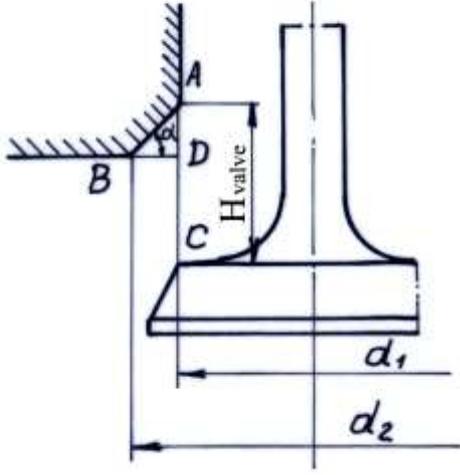
2. المرحلة الثانية:

وتشتمل على تحديد قانون تغير تسارع الدافع بحيث لا تتجاوز قيم التسارعات الموجبة $(1500 \div 3500) m/s^2$ ، وقيم التسارعات السالبة $(500 \div 1500) m/s^2$.

3. المرحلة الثالثة:

وتشتمل على الخطوات التالية:

- تقسيم السطح العامل لبروفيل الحدبات إلى أجزاء متساوية ϕ مع مجال زاويّ محدد ϕ_i .
- عادة يتم تقسيم السطح العامل لبروفيل الحدبات إلى أربعة مجالات زاوية بحيث تكون قيم التسارعات ذات نوع وخصائص محددة، ويمكن تقسيم هذا السطح إلى مجالات زاوية أكثر من ذلك.



الشكل 4. البامترات الأساسية للصمام

وسوف نعتمد خلال التصميم على افتراض تقسيم السطح العامل للبروفيل إلى أربعة مجالات زاوية فقط:

- الجزء الأول (المجال الزاوي الأول) والمرمز له بـ ϕ_0 ، ويكون بزاوية مقدارها ϕ_4 بحيث يعوض هذا المجال الخلوصات الحرارية لميكانيزم آلية التوقيت (يقبل بأن منحنى هذا الجزء يتم حسابه رياضياً وهو عبارة عن مُنْحَنٍ تجيبي).
 - الجزء الثاني (المجال الزاوي الثاني) والمرمز له بـ ϕ_1 ، وهو الجزء الخاص بالتسارعات الموجبة لميكانيزم آلية التوقيت (يقبل بأن منحنى هذا الجزء عبارة عن نصف موجة جيبيية).
 - الجزء الثالث (المجال الزاوي الثالث) والمرمز له بـ ϕ_2 ، وهو الجزء الخاص بالتسارعات السالبة لميكانيزم آلية التوقيت (يقبل بأن منحنى هذا الجزء عبارة عن ربع موجة جيبيية).
 - الجزء الرابع (المجال الزاوي الرابع) والمرمز له بـ ϕ_3 ، وهو جزء آخر خاص بالتسارعات السالبة لميكانيزم آلية التوقيت (يقبل بأن منحنى هذا الجزء عبارة عن جزء من قطع زائد).
- إنّ هذه المجالات الزاوية المحددة لمختلف الأقسام تكون مرتبطة مع بعضها بعضاً بالعلاقات التالية:

$$\phi_1 + \phi_2 + \phi_3 = \frac{\pi}{180} \phi_{p0}$$

$$\phi_2 = (0.1 \div 0.25) \phi_3$$

$$\phi_2 + \phi_3 = (1.5 \div 3) \phi_1$$

يحدد المجال الزاوي الأول ϕ_0 طبقاً للخلوص الحراري المعتمد ΔS واستناداً إلى سرعة حركة الدافع في نقطة الرفع A' والمرمز لها بـ W' ، أي:

$$\phi_0 = \frac{\pi \cdot \Delta S}{2 \times 180 \cdot W'}$$

4. المرحلة الرابعة:

وتشتمل هذه المرحلة على تحديد مسار، سرعة الدافع وتسارعه وذلك لمختلف الأقسام:

- المجال الزاوي الأول: $0 \leq \varphi_{G0} \leq \phi_0$

$$H_{d0} = \Delta S \left(1 - \cos \frac{\pi}{2\phi_0} \cdot \varphi_{G0} \right)$$

$$W_{d0} = \Delta S \cdot \omega_G \cdot \frac{\pi}{2\phi_0} \cdot \sin \frac{\pi}{2\phi_0} \cdot \varphi_{G0}$$

$$j_{d0} = \omega_G^2 \cdot \Delta S \left(\frac{\pi}{2\phi_0} \right)^2 \cdot \cos \frac{\pi}{2\phi_0} \cdot \varphi_{G0}$$

- المجال الزاوي الثاني: $0 \leq \varphi_{G1} \leq \phi_1$

$$H_{d1} = \Delta S + C_{11} \cdot \varphi_{G1} - C_{12} \cdot \sin \frac{\pi}{\phi_1} \cdot \varphi_{G1}$$

$$W_{d1} = \omega_G \left(C_{11} - C_{12} \cdot \frac{\pi}{\phi_1} \cdot \cos \frac{\pi}{\phi_1} \cdot \varphi_{G1} \right)$$

$$j_{d1} = \omega_G^2 \left[C_{11} \cdot \left(\frac{\pi}{\phi_1} \right)^2 \cdot \sin \frac{\pi}{\phi_1} \cdot \varphi_{G1} \right]$$

- المجال الزاوي الثالث: $0 \leq \varphi_{G2} \leq \phi_2$

$$H_{d2} = H_{1G} + C_{21} \cdot \varphi_{G2} + C_{212} \cdot \sin \frac{\pi}{2\phi_2} \cdot \varphi_{G2}$$

$$H_{1G} = \Delta S + C_{11} \cdot \phi_1$$

$$W_{d2} = \omega_G \left(C_{21} + C_{22} \cdot \frac{\pi}{2\phi_2} \cdot \cos \frac{\pi}{2\phi_2} \cdot \varphi_{G2} \right)$$

$$j_{d2} = \omega_G^2 \left[-C_{21} \cdot \left(\frac{\pi}{2\phi_2} \right)^2 \cdot \sin \frac{\pi}{2\phi_2} \cdot \varphi_{G2} \right]$$

- المجال الزاوي الرابع: $0 \leq \varphi_{G3} \leq \phi_3$

$$H_{d3} = H_{2G} + C_{31} (\phi_3 - \varphi_{G3})^4 - C_{32} (\phi_3 - \varphi_{G3})^2 + C_{33}$$

$$H_{2G} = \Delta S + C_{11} \phi_1 + C_{21} \phi_2 + C_{22}$$

$$W_{d3} = \omega_G \left[-4C_{31} (\phi_3 - \varphi_{G3})^3 + 2C_{32} (\phi_3 - \varphi_{G3}) \right]$$

$$j_{d3} = \omega_G^2 \left[12C_{31} (\phi_3 - \varphi_{G3})^2 - 2C_{32} \right]$$

حيث إن:

ω_G : السرعة الزاوية لحذبة عمود الحذبات.

φ_G : القيمة الجارية لزاوية دوران حذبات عمود الحذبات وذلك من أجل جزء ما من الأجزاء السابقة.

السابقة على التوالي. φ_{G3} ، φ_{G2} ، φ_{G1} ، φ_{G0} : القيمة الجارية لزاوية دوران حذبات عمود الحذبات لكل قسم من الأقسام

على التوالي. H_{d3} ، H_{d2} ، H_{d1} ، H_{d0} : قيم الانزياحات الجارية للدافع وذلك من أجل كل قسم من الأقسام السابقة

على التوالي. J_{d3} ، J_{d2} ، J_{d1} ، J_{d0} : تسارعات الدافع وذلك من أجل كل قسم من الأقسام المحددة على التوالي.

C_{33} ، C_{32} ، C_{31} ، C_{22} ، C_{21} ، C_{12} ، C_{11} : معاملات قانون الحركة للدافع في كل مرحلة.

يتم تحديد المعامل C_{ij} من معاملات المسار، ومعاملات السرعة، والتسارع لحذبات أعمدة الحذبات ، وذلك وفقاً

للعلاقات الرئيسية التالية:

$$H_{3G} = H_{d\max} + \Delta S$$

$$C_{11}\phi_1 + C_{21}\phi_2 + C_{22} + C_{33} - H_{d\max} = 0$$

$$C_{31}\phi_3^4 - C_{32}\phi_3^2 + C_{33} = 0$$

$$W_{diH} = W_{TOK}$$

$$C_{11} - C_{12} \frac{\pi}{\phi_1} - W_{TOK} = 0$$

$$W_{d2H} = W_{dik}$$

$$C_{11} \frac{\pi}{\phi_1} - C_{21} - C_{22} \frac{\pi}{2\phi_2} = 0$$

$$W_{d3H} = W_{d2K}$$

$$C_{21} + 4C_{31}\phi_3^3 - 2C_{32}\phi_3$$

$$J_{d3H} = J_{d2K}$$

$$C_{22} \left(\frac{\pi}{2\phi_2} \right)^2 + 12C_{31}\phi_3^2 - 2C_{32} = 0$$

$$\frac{J_{d2G}}{J_{d3G}} = \frac{5}{8} = Z$$

من أجل المساعدة في حل المعادلات السابقة، يمكن أن نقبل بأن:

$$K_1 = 8Z \left(\frac{\phi_2}{\pi} \right)^2$$

$$K_2 = \frac{5+Z}{6} \phi_3^2$$

$$K_3 = \frac{4+2Z}{3} \phi_3$$

$$K_1 = K_2 + K_3 \cdot \phi_2$$

$$K_2 = K_3 + \frac{4Z \cdot \phi_2}{\pi}$$

وبالتالي، يمكن إيجاد قيم المعاملات C_{ij} بالشكل النهائي طبقاً لمايلي:

$$C_{11} = \frac{K_1 W' + K_2 H_{d \max}}{2K_1 + K_2 \phi_1}$$

$$C_{12} = \frac{(C_{11} - W') \phi_1}{\pi}$$

$$C_{32} = \frac{(2C_{11} - W')}{\pi}$$

$$C_{31} = \frac{(C_{32})(1 - Z)}{6\phi_3^2}$$

$$C_{21} = C_{32} \cdot K_3$$

$$C_{22} = C_{32} \cdot K_1$$

$$C_{33} = C_{32} \cdot K_2$$

5. المرحلة الخامسة:

وتشتمل هذه المرحلة على عملية تصميم بروفيل الحدبات ليكون من النوع من دون ضربات؛ وذلك باتباع الخطوات التالية:

- نقوم برسم الشعاع OK من مركز الحدبة O وذلك من خلال نصف قطر موحد (شكل 3).
 - نقوم بتثبيت الطول المحسوب لمسار الصمام على الشعاع OK ، حيث يتم تحديد الطول $r_i B_i$ حتى النقطة K_i .

- نقوم برسم عمود يمر من النقطة K وذلك انطلاقاً من مركز محور التناظر للحدبة.
 - نقوم برسم المستوي $N-N$ المار عبر النقطة A وبالتالي يتم تحديد نقطة من البروفيل.
 يتحدد وفقاً لما سبق الشعاع OA المتوضع بزاوية معتبرة مقدارها ϕ_i .
 بعد الانتهاء من تصميم بروفيل حدبات عمود الحدبات من النوع من دون ضربات، لا بدّ من اختبار البروفيل المصمم وتدقيق عناصره، ومن ثمّ إجراء تصنيع لهذا العمود وفقاً للبروفيل المصمم.

يتم حساب نصف القطر للشعاع اعتماداً على العلاقة التالية:

$$OA = \frac{OK}{\cos \phi_i}$$

النتائج والمناقشة:

- تطبيق عملي لاختبار النموذج الرياضي وحساب مسار، الدافع وسرعته وتسارعه في حالة عمود الحدبات من دون ضربات:

1 - المعطيات الأساسية للمحرك المفترض:

| | | |
|------------------------------------|--------------|-----------------------------|
| $l_2 = 36mm$ | $l_1 = 54mm$ | أطوال أذرع الذراع المتأرجح: |
| $S = 127mm$ | | شوط المكبس: |
| $D = 98.42mm$ | | قطر الأسطوانة: |
| $n_{c.sh} = 2500 \text{ min}^{-1}$ | | عدد دورات عمود المرفق: |
| $R = 63.5mm$ | | نصف قطر عمود المرفق: |
| $f_{valve} = 0.002098m^2$ | | مساحة مقطع الدخول للصمام: |
| $\lambda = R/l = 0.2289$ | | العلاقة R/l : |
| $\alpha = 45 \text{ deg}$ | | زاوية مقعد الصمام: |
| $d_2 = 46mm$ | $d_1 = 40mm$ | أبعاد الصمام: |

2- السرعة الزاوية لعمود المرفق:

$$\omega_K = 261.799S^{-1}$$

$$\omega_K = 2 \cdot \pi \cdot n_{c.sh}$$

3- سرعة المكبس الوسطية:

$$V_p = 10.583m.s^{-1}$$

$$V_p = 2 \cdot S \cdot n_{c.sh}$$

4- مساحة مقطع المكبس:

$$F_p = 76.078m^2$$

$$F_p = 0.25 \cdot \pi \cdot D^2$$

5- سرعة دخول الهواء عبر الصمام:

$$W_{air} = \frac{n_{c.sh} \cdot R \cdot \pi^2 \cdot D^2}{2 \cdot f_{valve}} \cdot \sqrt{1 + \lambda^2}$$

$$W_{air} = 62.75m.s^{-1}$$

6- مساحة مقطع الصمام:

$$F_{valve} = \frac{V_p \cdot F_p}{W_{air}}$$

$$F_{valve} = 12.831cm^2$$

7- المسار الأعظمي للصمام:

$$H_{valve-max} = \frac{(d_2 - d_1) \cdot \tan(\alpha) + \sqrt{(d_2 - d_1)^2 \cdot \tan^2(\alpha) - 4 \cdot \left[\frac{(d_2 - d_1)^2}{2} \cdot \left(1 + \frac{\tan^2(\alpha)}{2}\right) - \frac{4 \cdot F_{valve}^2}{\pi^2 \cdot (d_1 - d_2)^2} \right]}}{2}$$

$$H_{valve-max} = 11.498mm$$

8- مسار الدافع:

$$h_K = h_{valve-max}$$

$$h_t = h_K \cdot \frac{l_2}{l_1}$$

$$h_t = 7.665mm$$

9- نصف قطر الدائرة الأساسية:

$$r_0 = 0.017m$$

$$r_0 = 1.5 \cdot h_k$$

10- زاوية تسبيق فتح صمام السحب:

$$\phi_{pr} = 33 \text{ deg}$$

11- زاوية تأخير إغلاق صمام السحب:

$$\phi_{za} = 63 \text{ deg}$$

$$\Delta S = 0.3mm$$

12- الخلوص الحراري:

13- تحديد أطوار التبادل الغازي:

$$\Phi_{p0} = 0.25 \cdot (\Phi_{pr} + \Phi_{za} + 180 \cdot \text{deg})$$

$$\phi_0 = \frac{\pi^2 \cdot \Delta S}{2.180 \text{ deg} \cdot \omega_{tok}}$$

$$\Phi_1 = 1 \cdot \text{deg}$$

$$\Phi_2 = 1 \cdot \text{deg}$$

$$\Phi_3 = 1 \cdot \text{deg}$$

باعتبار أن:

$$\Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 = \frac{\pi}{180 \cdot \text{deg}} \cdot \Phi_{p0}$$

$$\Phi_2 = 0.1 \cdot \Phi_3$$

$$\Phi_2 + \Phi_3 = 1.4 \cdot \Phi_1$$

$$\Phi = \text{find}(\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3)$$

$$\Phi_1 = 28.75 \text{ deg}$$

$$\Phi_2 = 3.659 \text{ deg}$$

$$\Phi_3 = 36.591 \text{ deg}$$

14- معاملات معادلات مسار الدافع:

$$Z = \frac{5}{8}$$

$$k_1 = 8 \cdot Z \cdot \left(\frac{\Phi_2}{\pi}\right)^2$$

$$k_1 = 0.00207$$

$$k_2 = \frac{5+Z}{6} \cdot (\Phi_3)^2$$

$$k_2 = 0.382$$

$$k_3 = \frac{4+2 \cdot Z}{3} \cdot \Phi_3$$

$$k_3 = 1.118$$

$$K_1 = k_1 + k_2 + k_3 \cdot \Phi_2$$

$$K_1 = 0.456$$

$$K_2 = k_3 + 4 \cdot Z \cdot \frac{\Phi_2}{\pi}$$

$$K_2 = 1.168$$

$$\omega_{tok2} = \omega_{tok} \cdot \frac{180 \cdot \text{deg}}{\pi}$$

$$\omega_{tok2} = 1.14592 \frac{mm}{rad}$$

$$c_{11} = \frac{K_1 \cdot \omega_{tok2} + K_2 \cdot h_t}{2 \cdot K_1 + K_2 \cdot \Phi_1}$$

$$c_{11} = 6.328mm$$

$$c_{12} = \frac{1}{\pi} \cdot (c_{11} - \omega_{tok2}) \cdot \Phi_1$$

$$c_{12} = 0.828mm$$

$$c_{32} = \frac{1}{K_2} (2 \cdot c_{11} - \omega_{tok2})$$

$$c_{32} = 9.851mm$$

$$c_{21} = c_{32} \cdot k_3$$

$$c_{21} = 11.01mm$$

$$c_{22} = c_{32} \cdot k_1$$

$$c_{22} = 0.02035mm$$

$$c_{31} = c_{32} \cdot \frac{1-Z}{6 \cdot \Phi_3^2}$$

$$c_{31} = 1.51mm$$

$$c_{33} = c_{32} \cdot k_2$$

$$c_{33} = 3.767mm$$

$$c_{11} \cdot \Phi_1 + c_{21} \cdot \Phi_2 + c_{22} + c_{33} - h_t = 0 \cdot m$$

$$c_{31} \cdot \Phi_3^4 - c_{32} \cdot \Phi_3^2 + c_{33} = 0 \cdot m$$

$$c_{11} - c_{12} \cdot \frac{\pi}{\Phi_1} - \omega_{tok2} = 0 \cdot m$$

$$c_{11} + c_{12} \cdot \frac{\pi}{\Phi_1} - c_{21} - c_{22} \cdot \frac{\pi}{2 \cdot \Phi_2} = 0 \cdot m$$

$$c_{21} + 4 \cdot c_{31} \cdot \Phi_3^3 - 2 \cdot c_{32} \cdot \Phi_3 = 0 \cdot m$$

$$c_{22} \cdot \left(\frac{\pi}{2 \cdot \Phi_2}\right)^2 + 12 \cdot c_{31} \cdot \Phi_3^2 - 2 \cdot c_{32} = 0 \cdot m$$

15-الخطوة الزاوية المفروضة من أجل عملية الحساب:

$$i = 0, \frac{2 \cdot (\Phi_0 + \Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3)}{100} \dots \dots \dots 2 \cdot (\Phi_0 + \Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3)$$

16-حساب مسار الدافع:

$$h_d(i) = \begin{cases} \phi - i & \text{if } i \leq \Phi_0 \\ (i - \Phi_0) & \text{if } \Phi_0 < i \leq \Phi_0 + \Phi_1 \\ (i - \Phi_0 - \Phi_1) & \text{if } \Phi_0 + \Phi_1 < i \leq \Phi_0 + \Phi_1 + \Phi_2 \\ (i - \Phi_0 - \Phi_1 - \Phi_2) & \text{if } \Phi_0 + \Phi_1 + \Phi_2 < i \leq \Phi_0 + \Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 \\ (\Phi_0 + \Phi_1 + \Phi_2 + 2 \cdot \Phi_3 - i) & \text{if } \Phi_0 + \Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 < i \leq \Phi_0 + \Phi_1 + \Phi_2 + 2 \cdot \Phi_3 \\ (\Phi_0 + \Phi_1 + 2 \cdot \Phi_2 + 2 \cdot \Phi_3 - i) & \text{if } \Phi_0 + \Phi_1 + \Phi_2 + 2 \cdot \Phi_3 < i \leq \Phi_0 + \Phi_1 + 2 \cdot \Phi_2 + 2 \cdot \Phi_3 \\ (\Phi_0 + 2 \cdot \Phi_1 + 2 \cdot \Phi_2 + 2 \cdot \Phi_3 - i) & \text{if } \Phi_0 + \Phi_1 + 2 \cdot \Phi_2 + 2 \cdot \Phi_3 < i \leq \Phi_0 + 2 \cdot \Phi_1 + 2 \cdot \Phi_2 + 2 \cdot \Phi_3 \\ (2 \cdot \Phi_0 + 2 \cdot \Phi_1 + 2 \cdot \Phi_2 + 2 \cdot \Phi_3 - i) & \text{if } \Phi_0 + 2 \cdot \Phi_1 + 2 \cdot \Phi_2 + 2 \cdot \Phi_3 < i \leq 2 \cdot \Phi_0 + 2 \cdot \Phi_1 + 2 \cdot \Phi_2 + 2 \cdot \Phi_3 \\ \Delta S \cdot \left(1 - \cos \left(\frac{\pi}{2 \cdot \Phi_0} \phi \right) \right) & \text{if } i \leq \Phi_0 \\ \Delta S + c_{11} \cdot \phi - c_{12} \cdot \sin \left(\frac{\pi}{\Phi_1} \phi \right) & \text{if } \Phi_0 < i \leq \Phi_0 + \Phi_1 \\ \Delta S + c_{11} \cdot \Phi_1 + c_{21} \cdot \phi + c_{22} \cdot \sin \left(\frac{\pi}{2 \cdot \Phi_2} \phi \right) & \text{if } \Phi_0 + \Phi_1 < i \leq \Phi_0 + \Phi_1 + \Phi_2 \\ \Delta S + c_{11} \cdot \Phi_1 + c_{21} \cdot \Phi_2 + c_{22} + c_{31} \cdot (\Phi_3 - \phi)^4 - c_{32} \cdot (\Phi_3 - \phi)^2 + c_{33} & \text{if } \Phi_0 + \Phi_1 + \Phi_2 < i \leq \Phi_0 + \Phi_1 + \Phi_2 \\ \Delta S + c_{11} \cdot \Phi_1 + c_{21} \cdot \phi + c_{22} \cdot \sin \left(\frac{\pi}{2 \cdot \Phi_2} \phi \right) & \text{if } \Phi_0 + \Phi_1 + \Phi_2 + 2 \cdot \Phi_3 < i \leq \Phi_0 + \Phi_1 + 2 \cdot \Phi_2 + 2 \cdot \Phi_3 \\ \Delta S + c_{11} \cdot \phi - c_{12} \cdot \sin \left(\frac{\pi}{\Phi_1} \phi \right) & \text{if } \Phi_0 + \Phi_1 + 2 \cdot \Phi_2 + 2 \cdot \Phi_3 < i \leq \Phi_0 + 2 \cdot \Phi_1 + 2 \cdot \Phi_2 + 2 \cdot \Phi_3 \\ \Delta S \cdot \left(1 - \cos \left(\frac{\pi}{2 \cdot \Phi_0} \phi \right) \right) & \text{if } \Phi_0 + 2 \cdot \Phi_1 + 2 \cdot \Phi_2 + 2 \cdot \Phi_3 < i \leq 2 \cdot \Phi_0 + 2 \cdot \Phi_1 + 2 \cdot \Phi_2 + 2 \cdot \Phi_3 \end{cases}$$

$h_d(84 \text{ deg}) = 7.746 \text{ [mm]}$

17- حساب سرعة الدافع:

$$w_d(i) := \begin{cases} \phi - i & \text{if } i \leq \Phi_0 \\ (i - \Phi_0) & \text{if } \Phi_0 < i \leq \Phi_0 + \Phi_1 \\ (i - \Phi_0 - \Phi_1) & \text{if } \Phi_0 + \Phi_1 < i \leq \Phi_0 + \Phi_1 + \Phi_2 \\ (i - \Phi_0 - \Phi_1 - \Phi_2) & \text{if } \Phi_0 + \Phi_1 + \Phi_2 < i \leq \Phi_0 + \Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 \\ (\Phi_0 + \Phi_1 + \Phi_2 + 2 \cdot \Phi_3 - i) & \text{if } \Phi_0 + \Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 < i \leq \Phi_0 + \Phi_1 + \Phi_2 + 2 \cdot \Phi_3 \\ (\Phi_0 + \Phi_1 + 2 \cdot \Phi_2 + 2 \cdot \Phi_3 - i) & \text{if } \Phi_0 + \Phi_1 + \Phi_2 + 2 \cdot \Phi_3 < i \leq \Phi_0 + \Phi_1 + 2 \cdot \Phi_2 + 2 \cdot \Phi_3 \\ (\Phi_0 + 2 \cdot \Phi_1 + 2 \cdot \Phi_2 + 2 \cdot \Phi_3 - i) & \text{if } \Phi_0 + \Phi_1 + 2 \cdot \Phi_2 + 2 \cdot \Phi_3 < i \leq \Phi_0 + 2 \cdot \Phi_1 + 2 \cdot \Phi_2 + 2 \cdot \Phi_3 \\ (2 \cdot \Phi_0 + 2 \cdot \Phi_1 + 2 \cdot \Phi_2 + 2 \cdot \Phi_3 - i) & \text{if } \Phi_0 + 2 \cdot \Phi_1 + 2 \cdot \Phi_2 + 2 \cdot \Phi_3 < i \leq 2 \cdot \Phi_0 + 2 \cdot \Phi_1 + 2 \cdot \Phi_2 + 2 \cdot \Phi_3 \end{cases}$$

$$\Delta S \cdot \omega \cdot k \cdot \frac{\pi}{2 \cdot \Phi_0} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2 \cdot \Phi_0} \cdot \phi\right) \text{ if } i \leq \Phi_0$$

$$\omega \cdot k \cdot \left(c_{11} - c_{12} \cdot \frac{\pi}{\Phi_1} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{\Phi_1} \cdot \phi\right) \right) \text{ if } \Phi_0 < i \leq \Phi_0 + \Phi_1$$

$$\omega \cdot k \cdot \left(c_{21} + c_{22} \cdot \frac{\pi}{2 \cdot \Phi_2} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2 \cdot \Phi_2} \cdot \phi\right) \right) \text{ if } \Phi_0 + \Phi_1 < i \leq \Phi_0 + \Phi_1 + \Phi_2$$

$$\omega \cdot k \cdot \left[-4 \cdot c_{31} \cdot (\Phi_3 - \phi)^3 + 2 \cdot c_{32} \cdot (\Phi_3 - \phi) \right] \text{ if } \Phi_0 + \Phi_1 + \Phi_2 < i \leq \Phi_0 + \Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3$$

$$-\omega \cdot k \cdot \left[-4 \cdot c_{31} \cdot (\Phi_3 - \phi)^3 + 2 \cdot c_{32} \cdot (\Phi_3 - \phi) \right] \text{ if } \Phi_0 + \Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 < i \leq \Phi_0 + \Phi_1 + \Phi_2 + 2 \cdot \Phi_3$$

$$-\omega \cdot k \cdot \left(c_{21} + c_{22} \cdot \frac{\pi}{2 \cdot \Phi_2} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2 \cdot \Phi_2} \cdot \phi\right) \right) \text{ if } \Phi_0 + \Phi_1 + \Phi_2 + 2 \cdot \Phi_3 < i \leq \Phi_0 + \Phi_1 + 2 \cdot \Phi_2 + 2 \cdot \Phi_3$$

$$-\omega \cdot k \cdot \left(c_{11} - c_{12} \cdot \frac{\pi}{\Phi_1} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{\Phi_1} \cdot \phi\right) \right) \text{ if } \Phi_0 + \Phi_1 + 2 \cdot \Phi_2 + 2 \cdot \Phi_3 < i \leq \Phi_0 + 2 \cdot \Phi_1 + 2 \cdot \Phi_2 + 2 \cdot \Phi_3$$

$$-\Delta S \cdot \omega \cdot k \cdot \frac{\pi}{2 \cdot \Phi_0} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2 \cdot \Phi_0} \cdot \phi\right) \text{ if } \Phi_0 + 2 \cdot \Phi_1 + 2 \cdot \Phi_2 + 2 \cdot \Phi_3 < i \leq 2 \cdot \Phi_0 + 2 \cdot \Phi_1 + 2 \cdot \Phi_2 + 2 \cdot \Phi_3$$

$W_d(45 \text{ deg}) = 2.603 \text{ [m.s}^{-1}\text{]}$

18- حساب تسارع الدافع:

$$j_d(i) := \begin{cases} \phi - i & \text{if } i \leq \Phi_0 \\ (i - \Phi_0) & \text{if } \Phi_0 < i \leq \Phi_0 + \Phi_1 \\ (i - \Phi_0 - \Phi_1) & \text{if } \Phi_0 + \Phi_1 < i \leq \Phi_0 + \Phi_1 + \Phi_2 \\ (i - \Phi_0 - \Phi_1 - \Phi_2) & \text{if } \Phi_0 + \Phi_1 + \Phi_2 < i \leq \Phi_0 + \Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 \\ (\Phi_0 + \Phi_1 + \Phi_2 + 2\Phi_3 - i) & \text{if } \Phi_0 + \Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 < i \leq \Phi_0 + \Phi_1 + \Phi_2 + 2\Phi_3 \\ (\Phi_0 + \Phi_1 + 2\Phi_2 + 2\Phi_3 - i) & \text{if } \Phi_0 + \Phi_1 + \Phi_2 + 2\Phi_3 < i \leq \Phi_0 + \Phi_1 + 2\Phi_2 + 2\Phi_3 \\ (\Phi_0 + 2\Phi_1 + 2\Phi_2 + 2\Phi_3 - i) & \text{if } \Phi_0 + \Phi_1 + 2\Phi_2 + 2\Phi_3 < i \leq \Phi_0 + 2\Phi_1 + 2\Phi_2 + 2\Phi_3 \\ (2\Phi_0 + 2\Phi_1 + 2\Phi_2 + 2\Phi_3 - i) & \text{if } \Phi_0 + 2\Phi_1 + 2\Phi_2 + 2\Phi_3 < i \leq 2\Phi_0 + 2\Phi_1 + 2\Phi_2 + 2\Phi_3 \end{cases}$$

$$\Delta S \cdot \omega_k^2 \cdot \left(\frac{\pi}{2\Phi_0} \right)^2 \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2\Phi_0} \cdot \phi \right) \text{ if } i \leq \Phi_0$$

$$\omega_k^2 \cdot \left[c_{12} \cdot \left(\frac{\pi}{\Phi_1} \right)^2 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{\Phi_1} \cdot \phi \right) \right] \text{ if } \Phi_0 < i \leq \Phi_0 + \Phi_1$$

$$\omega_k^2 \cdot \left[-c_{22} \cdot \left(\frac{\pi}{2\Phi_2} \right)^2 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2\Phi_2} \cdot \phi \right) \right] \text{ if } \Phi_0 + \Phi_1 < i \leq \Phi_0 + \Phi_1 + \Phi_2$$

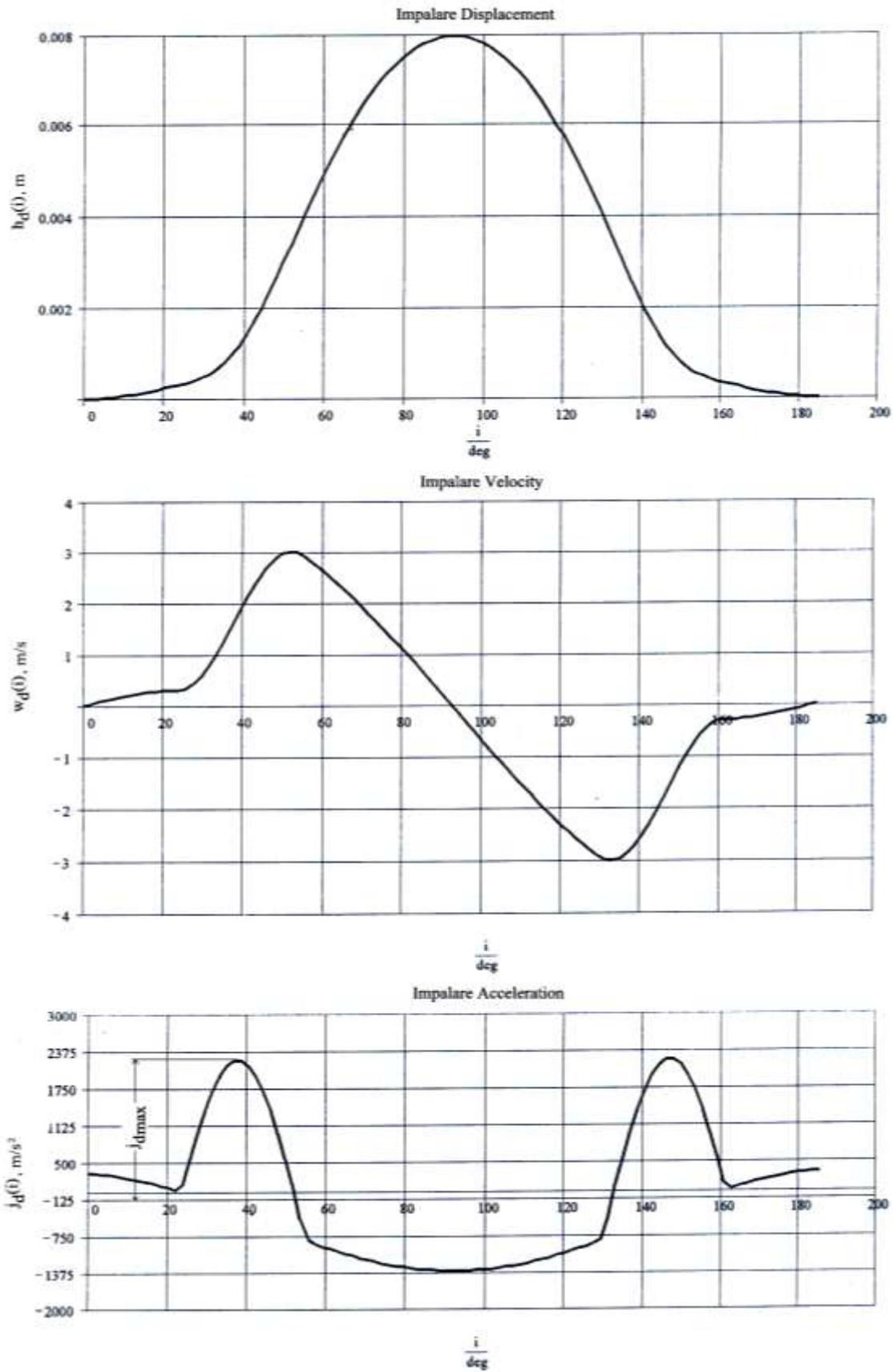
$$\omega_k^2 \cdot \left[12 \cdot c_{31} \cdot (\Phi_3 - \phi)^2 - 2 \cdot c_{32} \right] \text{ if } \Phi_0 + \Phi_1 + \Phi_2 < i \leq \Phi_0 + \Phi_1 + \Phi_2 + 2\Phi_3$$

$$\omega_k^2 \cdot \left[-c_{22} \cdot \left(\frac{\pi}{2\Phi_2} \right)^2 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2\Phi_2} \cdot \phi \right) \right] \text{ if } \Phi_0 + \Phi_1 + \Phi_2 + 2\Phi_3 < i \leq \Phi_0 + \Phi_1 + 2\Phi_2 + 2\Phi_3$$

$$\omega_k^2 \cdot \left[c_{12} \cdot \left(\frac{\pi}{\Phi_1} \right)^2 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{\Phi_1} \cdot \phi \right) \right] \text{ if } \Phi_0 + \Phi_1 + 2\Phi_2 + 2\Phi_3 < i \leq \Phi_0 + 2\Phi_1 + 2\Phi_2 + 2\Phi_3$$

$$\Delta S \cdot \omega_k^2 \cdot \left(\frac{\pi}{2\Phi_0} \right)^2 \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2\Phi_0} \cdot \phi \right) \text{ if } \Phi_0 + 2\Phi_1 + 2\Phi_2 + 2\Phi_3 < i \leq 2\Phi_0 + 2\Phi_1 + 2\Phi_2 + 2\Phi_3$$

$$j_d(84\text{deg}) = 1323 \text{ [m.s}^{-2}\text{]}$$



الشكل 5. مخططات مسار الدافع وسرعته وتسارعه

من مخططات سرعة الدافع وتسارعه (شكل 5) نلاحظ أنه عند استخدام بروفيل لحذبات أعمدة الحذبات من النوع من دون ضربات والذي تم شرح الموديل الرياضي لإنشائه، وعند البارامترات المستخدمة في التطبيق كانت أعلى قيمة للتسارع الموجب بحدود $2400 m/s^2$ ، بينما كانت أعلى قيمة للتسارع السالب بحدود $1070 \div 1320 m/s^2$. بينما تصل أعلى قيمة للتسارع الموجب لبروفيل من نوع آخر (على سبيل المثال من النوع العادي وعند البارامترات الابتدائية نفسها) لحدود $3700 m/s^2$ ، وهذه القيم الكبيرة للتسارعات سوف تقلل من عمر هذا الجزء الحساس من أجزاء المحرك (عمود الحذبات)، كما أنه من جهة أخرى سوف تسيء لشروط التعبئة والشحن للمحرك؛ لذلك من المفضل اختيار النوع الذي يؤمن قيم تسارعات موجبة وسالبة في الحدود المقبولة وهذا ما يحققه عمود الحذبات ذو البروفيل من النوع من دون ضربات.

الاستنتاجات والتوصيات:

- من خلال تحليل الدراسة النظرية والتجريبية للموديل الرياضي تم التوصل إلى النتائج التالية:
- تم إنجاز موديل رياضي عام لإنشاء بروفيل حذبات عمود الحذبات المستخدم في محركات الديزل من النوع من دون ضربات، والذي سيساعد تصميمه على تحسين جزء مهم من أجزاء المحرك وتصميمه ألا وهو عمود الحذبات.
- بمقارنة المؤشرات الأساسية للتعبئة عند استخدام بروفيل من النوع العادي، وآخر من دون ضربات نستطيع القول إنه وعند الشروط التصميمية الأولية نفسها ($\omega_{valve}, r_0, h_{valve. max}, h_{valve. min} \dots\dots\dots$) ستكون القيمة الأعظمية للتسارع الموجب عند استخدام البروفيل من دون ضربات أقل بـ 35% مما هي عليه عند البروفيل العادي (2400 مقابل $3700 m/s^2$)، وأما القيمة الأعظمية للتسارع السالب فلا تتجاوز $1050 \div 1300 m/s^2$.
- يسمح الموديل الرياضي بتنظيم قانون لتغير تسارع الدافع وتحديد حده بحيث لا تتجاوز قيم التسارعات الموجبة $(1500 \div 3000) m/s^2$ ، وقيم التسارعات السالبة لا تتجاوز $(500 \div 1500) m/s^2$ مما يقلل من تآكل حذباته، وبالتالي يزيد من العمر الزمني لعمود الحذبات.

المصطلحات العلمية

| | |
|-----------------------------|--------------------------|
| Camshaft | عمود الحدبات |
| Cams | الحدبات |
| Displacement of valve | مسار الصمام |
| Velocity of valve | سرعة الصمام |
| Impalare velocity | سرعة الدافع |
| Impalare acceleration | تسارع الدافع |
| Section area of inlet valve | مساحة مقطع الدخول للصمام |
| Timing-mechanism | آلية التوقيت |
| Timing opening valve | زمن فتح الصمام |
| Thermal clearance | الخلوص الحراري |
| Phases of gas exchange | أطوار التبادل الغازي |

المراجع:

- 1- ПОГОДАЕВ, Л. И.- ГОЛУБЕВ, Н. Ф. *АНАЛИЗ НАДЕЖНОСТИ ВЫПУСКНЫХ КЛАПАНОВ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ, МАШИНОСТРОИТЕЛЬ И НАДЕЖНОСТИ РУС.* № 5, 1995, 7-16.
- 2- ДЖОНЕВ, Г. Б.- КИРОВ, В. И. *АНАЛИЗ НА СЪСТОЯНИЕТО НА РАЗПРЕДЕЛИТЕЛНИТЕ ВАЛОВЕ НА ДВИГАТЕЛИ Д3900 ПОСТЪПВАЩИ ЗА ОСНОВЕН РЕМОТ*, ИЗВЕСТИЯ НА ВМЕИ BULGARIA "ЛЕНИН", VOL. 42, №. 4, 1987, 12-24. (In Bulgarian Language).
- 3- SHIRAI EJI and AISIN SEIKI. *Valve Control Device for an Engine.* Japan, VOL.34, №.1, 1990, 9-22.
- 4- ЛУКАНИНА, В. Н. И ДРУГИЕ. *ДВИГАТЕЛИ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ, (КОМПЬЮТЕРНЫЙ ПРАКТИКУМ)*, МОСКВА, 2005, 413.
- 5- SUZUKI YASUO and TEKEGUCHI SHUNSUKE . *Camshaft and method for producing the same* U.S.A. Vol. 419, №.8, 1991, 21-35.
- 6- ЛУКАНИНА, В. Н. И ДРУГИЕ. *ДВИГАТЕЛИ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ, (ДИНАМИКА И КОНСТРУИРОВАНИЕ)*, МОСКВА, 2005, 399.

