

### **Recenzja**

**rozprawy doktorskiej mgr inż. Konrada Buczka pt. „Influence of Firing Order on Crankshaft Torsional Vibration in Four-stroke Engines” (Wpływ kolejności zapłonów w silniku czterosuwowym na drgania skrętne wału korbowego)**

Podstawą opracowania recenzji jest pismo Pana Prodziekana Wydziału Mechanicznego Politechniki Krakowskiej prof. dr. hab. inż. Marka S. Kozienia z dnia 20.09.2021 r.

### **I. Ogólna charakterystyka rozprawy**

Przedstawiona do recenzji praca jest zwartym opracowaniem liczącym 156 stron druku. Zaopatrzona jest bogatą dokumentacją w postaci wykresów i tabel oraz starannym, logicznym opisem poszczególnych zagadnień. Praca jest starannie usystematyzowana i podzielona na kolejnych 8 rozdziałów tematycznych a także opatrzona treściwym podsumowaniem (rozdz. 9) i wnioskami (rozdz.10) oraz starannym doбором wybranej cytowanej literatury o 65 pozycjach.

Tytuł rozprawy w sposób jednoznaczny i jasny precyzuje obszar rozważań w niej zawarty.

Rozważania te dotyczą wpływu zmiany kolejności zapłonów w tłokowych silnikach 4-suwowych spalinowych na drgania skrętne wałów korbowych, ze szczególnym uwzględnieniem silników wielocylindrowych (o ilości cylindrów  $12 \div 20$ ) zabudowanych w układzie V.

Autor już na wstępie zauważa, iż dobór kolejności zapłonów ma istotny wpływ na parametry drgań skrętnych wału korbowego, a w konsekwencji na poziom drgań całego silnika.

Należy podkreślić wciąż istotną aktualność tego zagadnienia ze względu na ciągle rosnące ciśnienia spalania (obciążenia gazowe) a także rosnącą wartość nominalnej prędkości obrotowej współczesnych silników - także tych o dużej mocy, będących przedmiotem rozważań autora.

Na bardzo pozytywną ocenę zasługuje fakt ścisłego powiązania, a także wykorzystania osiągniętych przez Autora wyników rozważań w firmie, w której Autor jest zatrudniony, tj. FEV Group.

Pozytywną cechą pracy jest fakt starannego przemyślenia postawionej tezy pracy sprowadzającej się do stwierdzenia, że w wielocylindrowych silnikach czterosuwowych zmiana kolejności zapłonów skutkuje jedynie zmianą amplitudy harmonik połówkowych rzędów drgań skrętnych wału korbowego. Teza ta jest wynikiem logicznych rozważań wstępnych Autora.

Opisana teza została starannie udokumentowana (rozdz. 7 i 8) i udowodniona.

Należy bardzo pozytywnie podkreślić, że stwierdzenia takiego nie doszukano się w dostępnej bogatej literaturze dotyczącej prezentowanej tematyki i należy je poczytać jako wyraźne osiągnięcie naukowe Autora.

Bardzo pozytywną ocenę osiągnięcia opisanego w omawianej pracy doktorskiej wzmacnia fakt udokumentowania poprawności postawionej tezy na 10 wybranych typach silników (rozdz.7) ale także uzasadnienie, iż teza ta jest prawdziwa dla dowolnego wielocylindrowego tłokowego silnika spalinowego.

## **II. Ocena treści rozprawy**

Jak wspomniałem w treści wstępnej opinii, całość pracy została podzielona na 8 logicznie usystematyzowanych rozdziałów, pozwalających na przejrzyste opisanie zagadnienia.

### **Rozdział 1 (Wstęp)**

W rozdziale tym Autor uzasadnia aktualność podjętego tematu tj. problemu doboru kolejności zapłonów w wielocylindrowych tłokowych silnikach spalinowych dużej mocy. Wykazuje, że dobór kolejności występowania zapłonów wywiera wpływ na wiele zjawisk zachodzących w silniku, tj. na poziom drgań skrętnych, wzdłużnych, całej struktury silnika, obciążenia łożysk głównych i korbowodowych. Uzasadnia także, że poruszony problem podstawowy to jest, dotyczący doboru kolejności zapłonów, wymaga niestety kompromisu wynikającego z generowania opisanych wyżej skutków.

Już w tym rozdziale Autor zauważa, że dotychczasowe doniesienia literaturowe mówią jedynie o tym, że zmiana kolejności zapłonów w silnikach czterosuwowych, rzędowych nie wpływa na harmoniki główne drgań skrętnych.

Pozytywną cechą tego rozdziału jest zwięzłe podsumowanie motywacji Autora co do przyjętej tematyki pracy, a także wykazanie, że wnioski z pracy znajdują bezpośrednie zastosowanie przy rozwoju współczesnych wielocylindrowych silników spalinowych dużej mocy.

## **Rozdział 2 (Cel i zakres pracy)**

Rozdział ten zawiera sformułowaną przez Autora tezę: „zmiana kolejności zapłonów na jakąkolwiek alternatywną realizowaną przez ten sam układ wykorbień wału korbowego wywiera wpływ jedynie na amplitudy harmonik rzędów połówkowych drgań wymuszonych całego systemu”.

Pojawia się w tym rozdziale, także cel praktyczny jakim jest zebranie i rozszerzenie wiedzy na temat drgań skrętnych wału korbowego i innych zespołów i jej wykorzystanie przy konstruowaniu wałów korbowych. Rozdział ten przybliży czytelnikowi przyjęty przez Autora zakres pracy poprzez krótką, zwięzłą charakterystykę kolejnych rozdziałów.

Na pozytywną uwagę zasługuje jasny i zwięzły opis celu i zakresu całości pracy.

## **Rozdział 3 (Analiza stanu wiedzy)**

W części wstępnej Autor przybliży podstawowe definicje, takie jak, np. sposób numeracji kolejnych cylindrów w silnikach o zróżnicowanej ich zabudowie (rzędowych, w układzie V, w układzie gwiazdzystym).

Autor ukazuje w tym rozdziale istotę wpływu kąta rozwidlenia cylindrów na wymuszenie drgań skrętnych czy też wzajemnej współzależności kolejności zapłonów, rozkładu mas i sztywności wału korbowego na poziom drgań skrętnych wału korbowego.

Autor zwraca też uwagę na wpływ kolejności zapłonów na konstrukcję wału korbowego, jego wyrównowanie i obciążenie łożysk głównych. Całość zaopatrjuje logicznym podsumowaniem literatury dotyczącej kolejności zapłonów.

Na uwagę zasługuje bardzo staranny wybór pozycji literaturowych z pokazaniem i wyszczególnieniem kolejnych historycznych „kroków milowych” na przestrzeni 100 lat rozwoju tłokowego silnika spalinowego.

Na szczególnie pozytywną ocenę zasługuje przybliżenie ogólnych założeń dotyczących przyjętego modelu obliczeniowego.

Ponadto za pozytywne cechy omawianego rozdziału należy uznać:

- przytoczenie prostych przykładów obliczeniowych ułatwiających czytelnikowi zrozumienie całości zagadnienia;
- kompleksowe ujęcie wpływu kolejności zapłonów nie tylko na drgania skrętne, ale także na inne istotne aspekty takie jak: odkształcenie wału korbowego, obciążenie i odkształcenie wynikające z działania momentu gnącego, obciążenia łożysk i grubość filmu olejowego, itp..

W wyniku przedstawionych w tym rozdziale rozważań nasuwa się pytanie do Autora czy nie należałoby w przyszłości zastanowić się nad wpływem spotykanego zjawiska „wypadania” zapłonów na poziom drgań skrętnych wału korbowego?

Pojawia się tu także kolejne pytanie dotyczące wpływu drgań wału korbowego na drgania struktury całego silnika co ma istotny wpływ na jego trwałość i niezawodność. Jakie jest zatem zdanie Autora na ten temat?

#### **Rozdział 4 (Liczba kolejności zapłonów)**

W rozdziale tym Autor przeprowadził analizę dla ponad 70 przypadków silników o różnej liczbie cylindrów i różnym ich układzie (od 2 cylindrowego do 56 cylindrowego). Autor przyjął do tych obliczeń własny algorytm (stanowiący niestety tajemnicę firmy FEV). Pewną pomocą dla ewentualnego sprawdzenia algorytmu są przytaczane przez autora wzory matematyczne służące do opracowania algorytmu.

Na pozytywną uwagę przedstawionych rozważań zasługuje przejrzyste podsumowanie w postaci załączonych tabel, uwzględnienie dużej ilości możliwych konfiguracji liczby cylindrów i ich układu. Lektura tego rozdziału nasuwa pytanie czy zaproponowany przez Autora algorytm mógłby być zastosowany do nieregularnych układów wykorbień (np. gwiazdzistych)?

#### **Rozdział 5 (Kolejność zapłonów i kierunek obrotów wału korbowego)**

Rozdział ten zawiera rozważania Autora dotyczące wzajemnej korelacji między kolejnością zapłonów a kierunkiem obrotów wału korbowego silnika przy założeniu, że w silniku o przeciwnym kierunku obrotów obciążenia skrętne i giętne wału korbowego będą takie same jak dla bazowego kierunku obrotów. Autor wykazuje w tym rozdziale konieczność zmiany układu wykorbień wału korbowego dla zachowania powyżej opisanego założenia.

Na pozytywną ocenę zasługuje wprowadzone przez Autora pojęcie „lustrzanej kolejności zapłonów” uzupełniające w sposób istotny problematykę wpływu kolejności zapłonów na drgania skrętne wału korbowego w silnikach, od których wymagana jest zmiana kierunku obrotów.

#### **Rozdział 6 (Proces doboru kolejności zapłonów dla wielocylindrowych silników przemysłowych)**

W rozdziale tym Autor prezentuje w formie schematu proces doboru kolejności zapłonów, zaproponowany przez Autora i co jest bardzo istotne używany w firmie FEV przy opracowywaniu konstrukcji szybkoobrotowych, wielocylindrowych silników przemysłowych.

W procesie tym istotą jego częścią jest możliwość symulacji drgań skrętnych wału korbowego z uwzględnieniem alternatywnych kolejności zapłonów, co pozwala na wstępną selekcję, obniżenie czasu i kosztów dalszych rozważań dotyczących, np. obciążenia łożysk głównych, drgań struktury całego silnika, itp.

Pozytywną cechą zaproponowanej procedury jest jej złożoność (uwzględnienie wielu czynników wpływających na poziom drgań skrętnych wału) a także możliwość osiągnięcia kompromisu konstrukcyjnego już w trakcie projektowania silnika.

Analiza zawartych w tym rozdziale rozważań prowadzi do zapytania: czy możliwe jest już na podstawie realizacji kolejnych etapów procedury, szacowanie naprężeń w wałach korbowych, obciążeń termicznych tłumika drgań skrętnych, trwałości poszczególnych istotnych węzłów konstrukcyjnych silnika, itp.

## **Rozdział 7 (Efekt zmiany kolejności zapłonów na drgania skrętne wału korbowego. Obserwacje z przeprowadzonych analiz)**

Efekty określone w tym rozdziale zostały zaprezentowane przez Autora na przykładzie zebranych wyników analiz przeprowadzonych w firmie FEV podczas pracy przy rozwoju silników średnio i szybkoobrotowych z zapłonem samoczynnym. Dotyczą one rodziny silników V12, V16 i V20 różnych wielkości o różnym kącie rozwidlenia ( $45^\circ$ ,  $52^\circ$ ,  $60^\circ$  i  $90^\circ$ ).

W rozdziale tym Autor przedstawi wyniki swoich rozważań (bogato udokumentowanych stosownymi wykresami) i udowodnił, że dla tego rodzaju silników teza o wpływie zmiany kolejności zapłonów jedynie na połówkowe harmoniki drgań skrętnych (poprzez wizualizację naprężeń skrętnych w wale korbowym) jest prawdziwa.

Oceniam, iż zawarte w omawianym rozdziale wyniki obliczeń stanowią główne osiągnięcie naukowe pracy. Autor swoje rozważania i obliczenia przedstawił dla rodziny 10 typów silników. Dla każdego z rozważanych 10 typów silników analizował wpływ wielu przyjętych kolejności zapłonów na drgania skrętne (a w konsekwencji na naprężenia skrętne w wale korbowym). Swoje wyniki przedstawił dla wybranych charakterystycznych kolejności zapłonów.

Na pozytywną ocenę zaprezentowanych w niniejszym rozdziale analiz, zasługuje;

- duża ilość rozważanych rozwiązań konstrukcyjnych silników;
- staranność i czytelność prezentowanych wyników analiz w formie wykresów zależności naprężeń skrętnych w funkcji prędkości obrotowej silnika dla różnych konfiguracji kolejności zapłonów;
- odniesienie uzyskanych wyników do wyników obliczeń innych autorów znanych z rozważań literaturowych.

W podsumowaniu opinii o niniejszym rozdziale rodzi się pytanie dotyczące kryterium wyboru typów silników (V12, V16 i V20) do rozważań analitycznych. Dlaczego np. Autor nie wybrał do obliczeń innych rodzin silników jak V10, V14, V18?

## **Rozdział 8 (Dowód fizyczny zaobserwowanej zależności)**

Zawarte w tym rozdziale rozważania dowodzą prawdziwości tezy także dla dowolnego typu silnika.

Wyniki analiz zawarte w tym rozdziale jednoznacznie rozciągają prawdziwość tezy dla każdego wielocylindrowego, czterosuwowego tłokowego silnika spalinowego.

Do cech pozytywnych omawianego rozdziału należy zaliczyć:

- udowodnienie postawionej tezy dla dowolnego, wielocylindrowego silnika czterosuwowego;
- wykorzystanie do tego znanej metody graficzno–analitycznej (wypadkowej amplitudy względnej);
- autorskie podejście do zastosowania powyższej metody, polegające na analizie udziału konkretnego cylindra w sumie wektorowej przy rozważeniu dwóch możliwych przypadków: zapłonu w pierwszym lub drugim obrocie wału korbowego.

W podsumowaniu rodzi się pytanie: czy podobne rozważania co do wpływu kolejności zapłonów na drgania można przeprowadzić dla drgań struktury silnika?

## **Rozdział 9 (Podsumowanie)**

W rozdziale tym ujęte jest syntetyczne podsumowanie wyników rozważań i obliczeń osiągniętych w poszczególnych rozdziałach. Rozdział ten opracowany jest bardzo czytelnie i stanowi rzeczywiste podsumowanie pracy.

## **Rozdział 10 (Wnioski)**

W rozdziale tym Autor przedstawił 6 podstawowych wniosków:

- Wnioskiem 1 i podstawowym jest udowodnienie tezy pracy – z czym się pełni zgadzam;
- Wniosek 2 mówi, że dla przypadku harmonik pełnych rzędów ich zmiana wymagałaby zmiany układu wykorbień wału korbowego;
- Wniosek 3 dotyczy wpływu kąta rozwidlenia cylindrów na wygaszanie harmonik pełnych rzędów;
- Wniosek 4 dotyczy wprowadzenia zasady „lustrzanej kolejności zapłonów” dla przeciwnego kierunku obrotów wału korbowego w aspekcie tej samej odpowiedzi drgań skrętnych i gięcia wału korbowego jak dla silnika bazowego z podkreśleniem koniecznej jednak zmiany konstrukcji wału korbowego;
- Wniosek 5 podkreśla jednak konieczność kompromisowego wyboru kolejności zapłonów i uwzględnienie nie tylko generowanego poziomu drgań skrętnych wału, ale także obciążeń mechanicznych, obciążeń łożysk głównych, dynamiki

gazów w układach dolotowych i wylotowych czy też emisji toksycznych składników spalin;

- Wniosek 6 podkreśla niektóre niejasności literaturowe na temat ilości możliwych kolejności zapłonów;

Przedstawione przez Autora wnioski są bardzo dobrze udokumentowane wynikami obliczeń zaprezentowanymi w poszczególnych rozdziałach i stanowią ich cenne naukowe podsumowanie.

Uznaję je za istotne wskazówki, które powinny być wykorzystywane przy projektowaniu współczesnych wielocylindrowych, czterosuwowych tłokowych silników spalinowych.

### **III. Ogólna ocena rozprawy**

Całość pracy oceniam jako bardzo dobrze zaplanowaną pracę analityczno-obliczeniową skutkującą ostatecznym udowodnieniem postawionej przez Autora tezy. Zamieszczona bogata dokumentacja graficzna jest bardzo staranna i czytelna. Opis poszczególnych rozważań jest także czytelny, staranny i logiczny.

Na szczególnie pozytywną ocenę zasługuje fakt praktycznego wykorzystania założeń konstrukcyjnych przy projektowaniu wielocylindrowych tłokowych silników spalinowych.

Uważam także, iż fakt wykonania przez Autora pracy naukowej i ścisłego jej związku z realizowanymi pracami konstruktorskimi w firmie FEV Group należy uznać za modelowy związek pracy naukowej z pracą inżyniersko-konstruktorską w firmach badawczo rozwojowych.

W podsumowaniu stwierdzam, iż przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgr. inż. Konrada Buczka spełnia wymagania stawiane osobom ubiegającym się o nadanie stopnia naukowego doktora przez Ustawę z dn. 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U. z 2016 r. poz. 882) i wnioskuję o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Uważam, iż treść rozprawy mieści się w dyscyplinie naukowej inżynieria mechaniczna.

**Wobec bardzo wysokiego poziomu naukowego rozprawy stawiam wniosek o jej wyróżnienie.**

