

УДК 621.43.001.2

ПОЛЕГШЕННЯ ПУСКУ ДВИГУНА ЗА РАХУНОК РЕЛАКСАЦІЇ ЕНЕРГІЇ КОЛИВАЛЬНОГО ЗБУДЖЕННЯ В ПОВІТРЯНОМУ ЗАРЯДІ

К.В. Коритченко, к.т.н., НТУ «ХПІ», В.М. Замана, генерал-лейтенант, Командування сухопутних військ Озброєних сил України, м. Харків

Анотація. Розглянуто вплив швидкості протікання процесу релаксації коливальної енергії на динаміку зміни термодинамічного стану повітряного заряду під час стиснення. Розраховано кількість енергії, що необхідно витратити на коливальне збудження повітряного заряду для холодного пуску двигуна типу 5ТДФ за температури навколишнього середовища $t = 0$ °С.

Ключові слова: пуск двигуна, стиснення, повітряний заряд, релаксація, коливальне збудження.

ОБЛЕГЧЕНИЕ ПУСКА ДВИГАТЕЛЯ ЗА СЧЕТ РЕЛАКСАЦИИ ЭНЕРГИИ КОЛЕБАТЕЛЬНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ В ВОЗДУШНОМ ЗАРЯДЕ

К.В. Корытченко, к.т.н., НТУ «ХПИ», В.М. Замана, генерал-лейтенант, Командование сухопутных войск Вооруженных сил Украины, г. Харьков

Аннотация. Рассмотрено влияние скорости протекания процесса релаксации колебательной энергии на динамику изменения термодинамического состояния воздушного заряда во время сжатия. Рассчитано количество энергии, которую необходимо затратить на колебательное возбуждение заряда для холодного пуска двигателя типа 5ТДФ при температуре окружающей среды $t = 0$ °С.

Ключевые слова: пуск двигателя, сжатие, воздушный заряд, релаксация, колебательное возбуждение.

FACILITATION OF ENGINE START DUE TO RELAXATION OF VIBRATION EXCITATION ENERGY IN AIR CHARGE

**K. Korytchenko, Candidate of Technical Science, NTU «KhPI»,
V. Zamana, Lieutenant-general, Head of Land Forces of Armed Forces of Ukraine,
Kharkiv**

Annotation. The influence of speed of relaxation process time of oscillation energy on the dynamics of change of the thermodynamics state of air charge during the compression is considered. The quantity of energy which is necessary to input on vibrational excitation of the charge to obtain the cold start of 5TDF-type engine at the temperature of environment at $t = 0$ °С is calculated.

Key words: engine start, compression, air charge, relaxation, vibrational excitation.

Вступ

Час підготовки двигунів бойових машин до прийняття повного навантаження є одним з важливих показників бойової готовності бронетехніки. Скорочення часу пуску досягається використанням «холодного» пуску, який виключає стадії передпускової підго-

товки і прогрівання двигуна. Але в цьому випадку істотно погіршуються умови запалювання палива в циліндрах двигуна, внаслідок чого знижується надійність пуску. Використання газорозрядних систем збудження повітря у впускному колекторі двигуна дозволяє накопичити енергію у коливально-збудженому стані молекул повітряного заря-

ду з подальшим збільшенням температури заряду в процесі стиснення. За рахунок цього забезпечуються умови для надійного запалювання палива.

Аналіз публікацій

Задачу полегшення пуску холодного двигуна вирішують шляхом підігрівання повітряного заряду [1]. При цьому відбувається падіння густини заряду з виникненням явища «зависання». Підведення додаткової енергії до повітряного заряду без «миттєвого» падіння його густини досягається за рахунок коливального збудження молекул повітря. Раніше процес коливальної релаксації вивчався для підвищення ефективності роботи газових лазерів, визначення параметрів надзвуків потоків, дослідження та впливу на механізми кінетичних реакцій та інше [2, 3]. Тому потребує вивчення питання впливу швидкості протікання процесу релаксації коливальної енергії на динаміку зміни термодинамічного стану повітряного заряду під час стиснення.

Мета і постановка задачі

Метою роботи є визначення кількості енергії, що необхідно витратити на коливальне збудження повітряного заряду для холодного пуску на прикладі двигуна типу 5ТДФ. Для досягнення цієї мети потребує розробки методика розрахунку зміни термодинамічного стану повітряного заряду під час стиснення в умовах релаксації енергії коливального збудження молекул повітря.

Процес стиснення повітряного заряду в умовах підведення тепла

Розглянемо динаміку стиснення коливально-збудженого ідеального газу без урахування теплообміну із зовнішнім середовищем у разі, коли час коливальної релаксації є значно меншим за час стиснення. У граничному випадку за цієї умови спочатку відбудеться підвищення тиску за законом ізохори, а подальше зростання тиску відбудеться за законом адіабати. Порівняємо термодинамічний стан, що досягається за вищезазначеної умови релаксації, з випадком, коли спочатку відбувається стиснення заряду за законом адіабати, а в подальшому відбувається «миттєве» збільшення температури за законом ізохори. Цей випадок може мати місце у зв'язку з експоненціальною залежністю часу коливальної

релаксації від температури заряду. Тобто за початковими умовами релаксація відбувається повільно, що дозволяє знехтувати додатковим підведенням теплоти за рахунок релаксації, а коли температура заряду за рахунок стиснення досягає певної температурної межі, за умови перевищення якої швидкість релаксації стрімко зростає. За результатами порівняння цих випадків видно (рис. 1), що динаміка релаксації енергії коливального збудження може суттєво впливати на термодинамічний стан повітряного заряду у верхній мертвій точці. Так, у наведеному прикладі початкові умови, ступінь стиснення та кількість енергії, що виділилась за рахунок релаксації енергії коливальних збуджень, мають однакові значення. Використовуючи закони адіабати та ізохори, отримуємо вираз для розрахунку різниці у температурах, що досягаються у точках 3 та 5, у вигляді

$$T_3 - T_5 = \left[\left(\frac{V_1}{V_{3(5)}} \right)^{\gamma-1} - 1 \right] \Delta T, \quad (1)$$

де V_1 – об'єм заряду у точці 1; $V_{3(5)}$ позначає $V_3 = V_5$ та дорівнює об'єму у точках 3 та 5; γ – показник адіабати; ΔT – приріст температури за рахунок процесу релаксації, що відбувається за законом ізохори.

З виразу (1) випливає, що різниця у кінцевому термодинамічному стані повітряного заряду зростає зі збільшенням енергії, що релаксує, та ступеня стиснення. Ця різниця у температурі досягається за рахунок збільшення роботи, яку виконує стартовий пристрій двигуна під час стиснення.

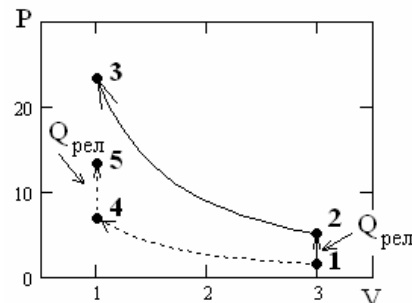


Рис. 1. Процес стиснення повітряного заряду в умовах миттєвого підведення тепла

Вочевидь, для покращення умов запалення суміші за малих витрат енергії було б доцільно реалізувати процес стиснення за кривими 1–2–3 (ізохора-адіабата). Реальний процес

стиснення повітряного заряду в умовах релаксації енергії збудження коливального стану молекул заряду займає проміжне положення між вищезазначеними кривими. Зі зростанням обертів двигуна буде відбуватися зміна співвідношення між часом релаксації та часом стиснення з відповідною зміною кінцевого термодинамічного стану заряду.

Процес стиснення повітряного заряду у ДВЗ в умовах енергетичного обміну із зовнішнім середовищем можливо описати рівнянням політропічного стиснення зі змінним показником політропи. У числових розрахунках можливо припустити, що на малій відстані переміщення поршня показник політропи має сталі значення. Це дозволяє застосувати на розрахунковому інтервалі рівняння політропічного стиснення для ідеального газу. Для визначення показника політропи необхідно знати теплоємність газу у даному процесі. За відомим значенням коливальної енергії δQ , що підводиться до системи протягом розрахункового кроку за постійної теплоємності, з використанням виразу для розрахунку теплоємності та рівняння політропи, за яким $T_2 = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{n-1} T_1$, отримуємо вираз, з якого можливо знайти C , у вигляді

$$\delta Q - C \left[\left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\frac{C_V - C_p}{C - C_V}} - 1 \right] T_1 = 0, \quad (2)$$

де V_1 та T_1 – об'єм та температура у розрахунковій точці, відповідно; V_2 – об'єм системи на наступному розрахунковому кроці.

Розрахунок динаміки виділення енергії за рахунок релаксації в процесі стиснення повітряного заряду

Розглянемо випадок, коли суттєво збуджено лише перші коливальні рівні двоатомних молекул. За цим випадком рівняння для релаксації коливальної енергії має вигляд [4]

$$\frac{dE}{dt} = \frac{E_p(T_g) - E}{\tau_{VT}}, \quad (3)$$

де τ_{VT} – час коливальної релаксації; $E_p(T_g)$ – енергія коливань молекул в умовах термодинамічної рівноваги за температури повітряного заряду T_g ; E – енергія, що зосереджена у

коливальному збудженні молекул на поточний момент часу.

В роботі [5] час коливальної релаксації двоатомних молекул пропонується розраховувати за формулою

$$\tau(p, T) = \frac{A}{p} \exp\left(\frac{B}{T^{1/3}}\right), \quad (4)$$

де коефіцієнти, за даними Блекмана, дорівнюють $A = 7,2 \cdot 10^{-9}$; $B = 124,07$.

Енергія коливань двоатомних молекул (гармонічних осциляторів) в умовах термодинамічної рівноваги розраховується за рівнянням [4]

$$E_p(T_g) = \frac{N \cdot \hbar \omega}{\exp\left(\frac{\hbar \omega}{kT_g}\right) - 1}, \quad (5)$$

де $\hbar \omega$ – енергія коливального кванта; N – число молекул в одиниці об'єму.

Результати моделювання стиснення повітряного заряду у двигуні типу 5ТДФ в умовах релаксації коливального збудження молекул під час пуску

Зробимо кількісну оцінку зазначеного процесу стиснення на прикладі двигуна типу 5ТДФ. Визначимо зміну об'єму, що займає повітряний заряд в циліндрі двигуна, залежно від кута повороту колінчастого вала. Враховуючи зустрічний рух поршнів та суміщення впускного та впускного колінчастих валів по куту обертання на кут α_{01} , отримаємо вираз для розрахунку об'єму заряду

$$V(\alpha) = V_{\min} + r \cdot S \left[2 + \cos(\pi + \alpha_{01} - |\alpha|) + \cos(\pi - |\alpha|) \right], \quad (6)$$

де r – радіус кривошипа колінчастого вала двигуна; S – площа поршня; V_{\min} – об'єм камери у верхній мертвій точці (в.м.т.); α – поточне значення кута повороту колінчастого вала по відношенню до в.м.т.

У двигуні типу 5ТДФ радіус кривошипа дорівнює $r = 6 \cdot 10^{-2}$ м, площа поршня дорівнює $S = 1,13 \cdot 10^{-6}$ м². Для визначення V_{\min} застосуємо дійсне значення ступеня стиснення $\varepsilon = 16,5$ та значення об'єму, що займає повітряний

заряд, після закриття впускних та випускних вікон. Закриття впускних та випускних вікон відбувається після нижньої мертвої точки за 69° . Враховуючи те, що випускний вал випереджає впускний вал на 10° , кут закриття дорівнює $\alpha_0 = (\pi - 69\pi/180 - 10\pi/180)$. На початку стиснення об'єм, що займає повітряний заряд, дорівнює $V_0 \approx 1,6 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$. Відповідно $V_{\min} = V_0/\varepsilon \approx 9,7 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3$. На пускових обертах тиском наддуття можна знехтувати. Тобто тиск перед початком стиснення дорівнює близько $P_0 \approx 10^5 \text{ Па}$. Початкову температуру заряду прийемо рівною $T_0 = 273 \text{ К}$. Для повітря питомі теплоємності за постійним тиском та об'ємом за нормальних умов дорівнюють $C_p = 1009 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$, $C_V = 720 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$.

Залежність розрахункового кроку за часом від кроку за кутом та частоти обертів колінчастого вала набуде вигляду

$$\Delta t = \frac{\Delta\alpha \cdot 60}{2\pi \cdot n}, \quad (7)$$

де $\Delta\alpha$ – крок за кутом, який в розрахунках дорівнює $\Delta\alpha = 0,018 \text{ рад}$; n – частота обертів колінчастого вала, хв^{-1} .

На режимі пуску середній показник політропи у двигуні 5ТДФ дорівнює $n_{\text{пуск}} \approx 1,25$, а показник адиабати повітря дорівнює 1,4. Тому показник розраховували за виразом

$$n_{\text{пуск}} = \frac{C - C_p}{C - C_V} - 0,15. \quad (8)$$

Порівняння динаміки зміни температури повітряного заряду за різними значеннями енергії E_0 , що зосереджена у коливальному збудженні молекул в початковий момент часу, представлено (рис. 2). Різниця у температурі, що досягається у в.м.т., складає більше, ніж 110 К. На момент початку впорскування палива (за $14\div 17$ град до в.м.т.) температура заряду за умови релаксації коливальної енергії перевищує 600 К, а у в.м.т. досягає 663 К. Тобто виникають умови для надійного самозапалення дизельного палива.

У разі, якщо б підведення енергії $\delta Q = 100 \text{ Дж}$ до заряду відбувалося «миттєво» у в.м.т., то за вищезазначеними умовами температура заряду зросла б з 545 К до 613 К. Таким чином, додаткове підведення енергії до заряду відбувається за рахунок збільшення роботи стиснення.

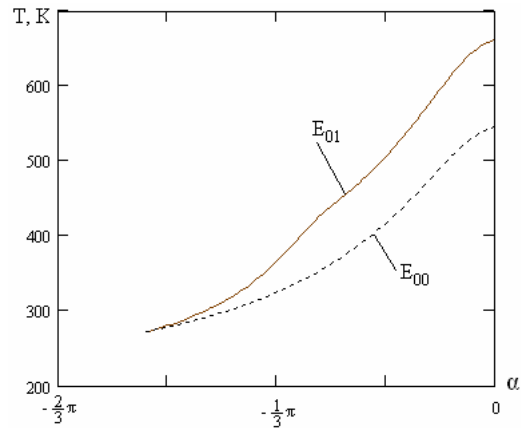


Рис. 2. Зміна температури у повітряному заряді залежно від кута повороту колінчастого вала α за обертами $n = 200 \text{ хв}^{-1}$ та за початковими значеннями енергії коливального збудження $E_{00} = 0$, $E_{01} = 100 \text{ Дж}$

Висновки

Технологія попереднього коливального збудження повітряного заряду може розглядатись як ефективний засіб для вирішення задачі полегшення пуску двигуна. Так, для холодного пуску двигуна типу 5ТДФ необхідно витратити на коливальне збудження повітряного заряду до 100 Дж на циліндр на 1 такт стиснення, що у 1,5 рази менше, ніж потрібно для розігрівання.

Література

1. Рязанцев Н.К. Конструкция форсированных двигателей наземных транспортных машин / Н. К. Рязанцев. – Харьков : ХДПУ, 1996. – 388 с.
2. Неравновесная колебательная кинетика. Пер. с англ. / под ред. М. Капителли. – М. : Мир, 1989. – 392 с.
3. Кондратьев В.Н. Химические процессы в газах / В. Н. Кондратьев, Е. Е. Никитин. – М. : Наука, 1981. – 264 с.
4. Зельдович Я.Б. Физика ударных волн и высокотемпературных газодинамических явлений / Я. Б. Зельдович, Ю. П. Райзер. – М. : Наука, 1966. – 688 с.
5. Mallinger F. Numerical Analysis of Different Vibrational Relaxation Models for Master Equations / F. Mallinger // Report of INRIA No 3263. – sept. 1997.

Рецензент: Ф. І. Абрамчук, професор, д. т. н., ХНАДУ.

Стаття надійшла до редакції 15 листопада 2010 р.