

## **СТАТИСТИЧНА ЗАЛЕЖНІСТЬ МІЖ КУТАМИ ЗАТРИМКИ ЗАЙМАННЯ І ВИПЕРЕДЖЕННЯ ВПОРСКУВАННЯ ПАЛИВА У ТРАНСПОРТНИХ ДИЗЕЛІВ**

Стефановський О.Б., к.т.н.

*Таврійський державний агротехнологічний університет*

Тел. (619) 42-04-42

***Анотація*** – у статті представлено статистичну залежність між кутами затримки займання та випередження впорскування палива у транспортних дизелів і охарактеризовано її числові параметри для окремих груп цих двигунів.

***Ключові слова*** - кут затримки займання, кут випередження впорскування палива, паливна апаратура, дизель.

*Постановка проблеми.* Затримка займання неоднорідної робочої суміші є першим етапом згоряння циклової подачі палива в дизелі, який суттєво впливає на ефективність згоряння. Зокрема, чим більше палива буде розпилено протягом затримки займання, тим «жорсткіше» буде згоряння. На тривалість затримки займання впливає багато факторів, які характеризують як заряд у циліндрах (його тиск  $p$ , температура  $T$ , швидкість руху), так і використане паливо (параметри його розпилювання в заряді, схильність до самозаймання).

Кут випередження впорскування палива (КВВП)  $\theta$ , який є важливим регулювальним параметром паливної апаратури (ПА) дизеля, впливає на кутову тривалість  $\varphi$  затримки займання, головним чином, через параметри стисненого заряду, куди впорскується паливо.

Хоча дослідні залежності між зазначеними кутами вже встановлювалися для конкретних моделей дизелів, в інженерній практиці бракує більш загальних залежностей між цими кутами, придатних для кількісних оцінок на стадії проектування.

*Аналіз останніх досліджень.* Емпірична формула А.І. Толстова [1; 2] дозволяє розрахувати часову тривалість затримки займання  $t_i$  в залежності від параметрів заряду ( $p$ ,  $T$ ), палива та частоти обертання  $n$  колінчастого вала дизеля; кут  $\varphi_i$  є пропорційним часу  $t_i$ . Недоліками використання цієї формули є певна невизначеність кутового положення кривошипа  $\varphi$ , для якого треба задати ті параметри заряду (наприклад, прийняття значень  $p$ ,  $T$  для кута  $\varphi = 360^\circ - \theta$  приводить до перебільшення розрахункового часу  $t_i$ ), та відсутність КВВП  $\theta$  серед її параметрів.

Тому вчені, що працюють в галузі двигунобудування [3; 4] запропонували використовувати формулу А.І. Толстова в рамках процедури чисельного інтегрування, підставляючи до неї поточні значення параметрів заряду, які змінюються при стисканні. Хоча цей підхід і дозволяє точніше визначити тривалість затримки займання в конкретних випадках моделювання робочого процесу дизеля, його реалізація можлива лише на сучасній обчислювальній техніці.

У книгах [1 - 9] приведено, в цілому, багато дослідних даних стосовно робочого процесу різних транспортних дизелів, які дозволяють вивчити загальний вплив КВВП на кут затримки займання. Часто авторами наведено дослідні реєстрації подачі палива форсункою і тиску заряду в циліндрі дизеля, які дозволяють найбільш достовірно визначити фактичні кутові положення кривошипа, що відповідають початку подачі палива та «швидкого» згоряння. Крім книги В.О. Ваншейдта [6], всі розглянуті тут дослідні дані отримані на дизелях з безпосереднім впорскуванням палива, а В.О. Ваншейдт навів залежність часу  $t_i$  від КВВП для передкамерного дизеля з робочим об'ємом 1 л при трьох значеннях частоти обертання.

*Формулювання цілі статті.* Отримати просту статистичну залежність між кутами затримки займання та випередження впорскування палива у транспортних дизелів.

*Основна частина.* Найбільш прийнятною формою вказаної залежності при практично важливих значеннях КВВП є ступенева функція

$$\hat{\varphi}_i = a\theta^b, \quad (1)$$

де  $a$  і  $b$  – числові параметри, які можна отримати при обробці масиву дослідних даних методом найменших квадратів. (Ця залежність не буде вірною при занадто пізньому впорскуванні палива, бо кут  $\varphi_i$  не може безперервно зменшуватися, але таке впорскування не застосовують при звичайному робочому процесу дизелів через суттєве погіршення його показників.)

Можливість застосування функції (1) з'ясовується після побудови цього масиву в логарифмічних координатах. Оскільки весь масив дослідних даних є неоднорідним, бо вони отримувалися на різних двигунах та різних (хоча й схожих) швидкісних режимах і дизельних паливах, доцільно підбирати значення параметрів  $a$  і  $b$  окремо для частин (підмасивів) даних, виділених у їх масиві. Ці частини були виділені таким чином:

- а) дані щодо передкамерного дизеля [6];
- б) дані щодо дизелів, що були обладнані насос-форсунками – щодо двотактного автомобільного дизеля [5] і частина результатів випробувань експериментального дизеля з книги [7];

в) дані щодо інших дизелів [1 – 9] з розділеною ПА.

У свою чергу, в останньому підмасиві:

г) була окремо проаналізована частка дослідних даних [1; 2], отримана на дизелях з великими розмірами циліндрів (діаметр 25, 27 і 32 см), які не застосовуються в галузі сільського господарства;

д) дослідні дані з книг [3, 8, 9] використовувалися як контрольні, для оцінки прийнятності статистичної залежності (1), виявлених при обробці решти даних, зазначених вище у «в».

Оскільки всі ці дані отримані при випробуваннях транспортних двигунів, які розроблялися у середині і другій половині ХХ сторіччя, то отримані залежності типу (1) уточнюватимуться при використанні більш нових експериментальних даних, наприклад, з роботи А.С. Кулешова [4].

Загальне розташування дослідних точок і виявлених статистичних залежностей (показаних прямими лініями 1 - 4) показано на рис. 1. Значення числових параметрів цих залежностей наведено в таблиці 1, а пояснення до цих точок подано в таблиці 2.

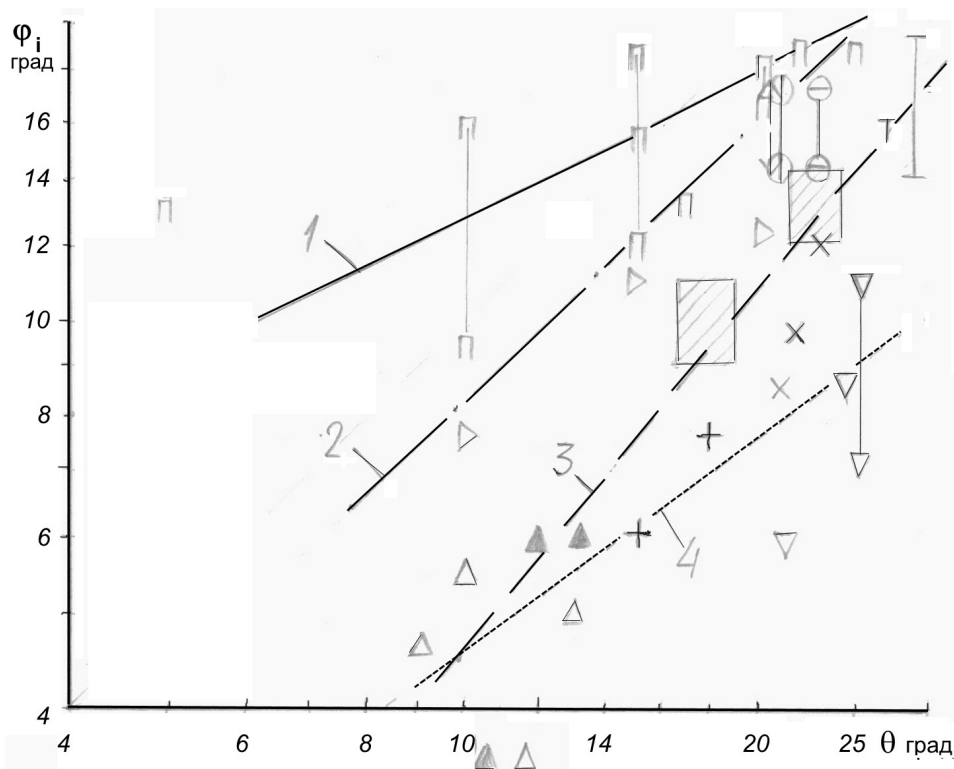


Рис. 1. Дослідні точки та статистичні залежності:

1 – для передкамерного дизеля за даними В.О. Ваншейдта [6];

2 – для двох дизелів, обладнаних насос-форсунками [5; 7];

3 – для інших дизелів з безпосереднім впорскуванням і розділеною ПА

(в тому числі 4 – для дизелів з великими розмірами циліндрів [1; 2])

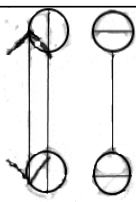
Як видно на рис. 1, за винятком частини точок «П» (передкамерний дизель), всі точки розташовані згідно до нерівності  $\varphi_i < \theta$ , яка, ймовірно, найкраще характеризує звичайний робочий процес дизелів з безпосереднім впорскуванням.

Таблиця 1 - Значення параметрів статистичних залежностей 1 – 4

Залежність	Параметри функції (1)		Коефіцієнт кореляції	ВСКВ*
	<i>a</i>	<i>b</i>		
1	4,0	0,5	0,65	0,16
2	0,93	0,94	0,85	0,16
3	0,25	1,25	0,64	0,33
4	0,80	0,73	0,82	0,22

\* Відносне середньоквадратичне відхилення розрахункового значення  $\varphi_i$  від дослідного.

Таблиця 2 – Пояснення до позначень точок на рис. 1

Дизель, джерело	Позначення	Дизель, джерело	Позначення
Передкамерний [6]	п	4-тактні без наддуву [7]:	I
Двотактний 4ДН 10,8/12,7 [5]	>	8Ч 13/14 при різних значеннях діаметра камери згоряння (КЗ) і окружної швидкості заряду;	
4-тактні з наддувом [1, 2, 7]: ЧН 12/14;	x		
ЧН 13/11,5;	+	Ч 11,5/10,5 з двома значеннями діаметра КЗ і трьома видами ПА	
ЧН 25/27;	▲		
ЧН 26/34;	Δ		
ЧН 32/32;	▽		
з двома величинами перерізу розпилювача [7]	•••••	-	-

На рис.1 видно, що авторами розглянутих робіт майже не досліджувалася робота дизелів з КВВП менше  $8^\circ$  до ВМТ, можливо, через погіршення економічності циклу при пізньому впорскуванні палива. Досліджена зона КВВП – це інтервал  $\theta \approx 8 \dots 30$  град.

Хоча дослідні точки утворили на рис.1 обширне поле, видна наявність статистичного взаємозв'язку (кореляції) між КВВП та кутом затримки займання  $\varphi_i$  – не дуже чіткого, але придатного для кількісних оцінок  $\varphi_i$  з відносною похибкою в межах  $\pm 20 \dots 30\%$  (табл. 1). Важливо, що така оцінка дозволяє використовувати задане

значення КВВП та запобігти незручному розрахунку часу затримки займання ( $\varphi_i$ ) з допомогою формули А.І. Толстова.

За характером впливу КВВП на кут затримки займання, оброблені частини дослідних даних помітно розрізняються (табл. 1). Для передкамерного дизеля [6] вплив КВВП на  $\varphi_i$  виявився найслабшим (показник ступеня в (1)  $b \approx 0,5$ ), хоча це треба буде уточнити за аналогічними даними для інших перед- та вихрекамерних дизелів. Два дизеля, обладнаних насос-форсунками [2; 7], продемонстрували майже лінійну статистичну залежність (1), з показником ступеня  $b \approx 0,94$ . Більш круту, але менш чітку кореляцію між кутами  $\theta$  і  $\varphi_i$  показала обробка даних для дизелів з безпосереднім впорскуванням і розділеною ПА ( $b \approx 1,25$ ). Насамкінець, окрема обробка даних для цих дизелів з великими значеннями діаметра циліндра дала значно менш круту та більш чітку кореляцію ( $b \approx 0,73$ ). Наведені в табл. 1 числові значення можуть дещо змінюватися при змінах складу дослідних даних, доданні інших двигунів до аналізу.

Для перевірки доцільності використання отриманої залежності (1) з числовими параметрами  $a = 0,25$ ;  $b = 1,25$  при початкових етапах дослідження робочого процесу дизелів з безпосереднім впорскуванням і розділеною ПА, використано дослідні дані, опубліковані в книгах [3, 8, 9]. Ці дані відносилися: до тракторного дизеля 4Ч 10,5/12 з повітряним охолодженням, що працював по перехідних процесах скидання та накиду навантаження (але ці процеси розглядалися, як квазістаціонарні) [3]; до експериментальних дизелів без наддуву [8] і з наддувом [9], що працювали при частотах обертання, близьких до 2000 1/хв. Зіставлення цих даних (точки) із статистичною залежністю 3 (за рис. 1) показано на рис.2.

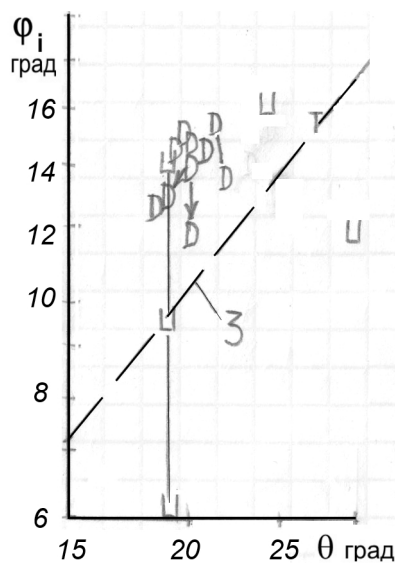


Рис. 2. Зіставлення контрольного масиву дослідних даних із статистичною залежністю поз. 3 (рис. 1)

Як видно на рис.2, хоча точне збігання виявлено для двох точок за даними [8; 9], розташованих на лінії  $\mathcal{Z}$  статистичної залежності типу (1), в цілому поле контрольних точок знаходиться навколо цієї лінії. Тому цю залежність з числовими параметрами  $a = 0,25$ ;  $b = 1,25$  можна використовувати для кількісних оцінок на стадії проектування дизелів з безпосереднім впорскуванням, якщо КВВП, заданий для подачі палива форсункою,  $\theta \approx 8...30$  град до ВМТ. На даному етапі розробки двигуна абсолютну похибку кута затримки займання  $\varphi_i$  в межах  $\pm 3$  град вважаємо прийнятною, бо на наступних етапах його можна буде вточнити, застосовуючи формулу А.І. Толстова (з допомогою обчислювальної техніки).

В області КВВП  $\theta \approx 8...13$  град до ВМТ приблизно однакові результати дає ступенева функція (1) з числовими параметрами, які відповідають лініям  $\mathcal{Z}$  і  $\mathcal{A}$ .

Знаючи кути  $\theta$  та  $\varphi_i$ , після обчислення ступеня попереднього розширення заряду і побудови первісної індикаторної діаграми можна оцінити рівень «жорсткості» згоряння та необхідність коректування КВВП. Що стосується різниці між значеннями КВВП, виміреними для секції паливного насоса високого тиску (ПНВТ) і для форсунки, то при застосуванні насос-форсунок цією різницею можна знехтувати, а при застосуванні розділеної ПА ця різниця, за даними Д.А. Портнова [9], становить 2...3 град.

*Висновок.* Отримано статистичні залежності типу (1) кутової тривалості затримки займання від кута випередження впорскування палива для дизелів передкамерного та з безпосереднім впорскуванням, які можна використовувати для кількісних оцінок тривалості затримки займання на стадії проектування.

#### Література:

1. Современные дизели: повышение топливной экономичности и длительной прочности [Текст] / Под ред. А.Ф. Шеховцова. – К.: Техника, 1992. – 272 с.
2. Процессы в перспективных дизелях [Текст] / Под ред. А.Ф. Шеховцова. – Харьков: Основа, 1992. – 352 с.
3. *Костин А.К.* Работа дизелей в условиях эксплуатации [Текст] / *А.К. Костин* [и др.]. - Л.: Машиностроение, 1989. – 284 с.
4. *Кулешов А.С.* Развитие методов расчета и оптимизация рабочих процессов ДВС : Дисс... докт. техн. наук (05.04.02) [Текст]. – М., 2011. – 235 с.
5. Двигатели внутреннего сгорания. Теория поршневых и комбинированных двигателей [Текст] / Под ред. А.С. Орлина, М.Г. Круглова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1983. – 376 с.

6. *Ваншейдт В.А.* Судовые двигатели внутреннего сгорания (теория) [Текст] / *В.А. Ваншейдт.* – Л.: Судпромгиз, 1958. – 456 с.

7. *Хачиян А.С.* Доводка рабочего процесса автомобильных дизелей [Текст] / *А.С. Хачиян [и др.].* - М.: Машиностроение, 1976. – 104 с.

8. *Мелькумов Т.М.* Теория быстроходного двигателя с самовоспламенением [Текст] / *Т.М. Мелькумов.* – М.: Оборонгиз, 1953. – 408 с.

9. *Портнов Д.А.* Быстроходные турбопоршневые двигатели с воспламенением от сжатия. Теория, рабочий процесс и характеристики [Текст] / *Д.А. Портнов.* – М.: Машгиз, 1963. – 640 с.

## **СТАТИСТИЧЕСКАЯ ЗАВИСИМОСТЬ МЕЖДУ УГЛАМИ ЗАДЕРЖКИ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ И ОПЕРЕЖЕНИЯ ВПРЫСКА ТОПЛИВА У ТРАНСПОРТНЫХ ДИЗЕЛЕЙ**

Стефановский А.Б.

***Аннотация*** — в статье представлена статистическая зависимость между углами задержки воспламенения и опережения впрыска топлива у транспортных дизелей и охарактеризованы её числовые параметры для отдельных групп этих двигателей.

***Ключевые слова*** - угол задержки воспламенения, угол опережения впрыска топлива, топливная аппаратура, дизель.

## **A CORRELATION BETWEEN ANGLES OF IGNITION DELAY AND FUEL INJECTION ADVANCE IN AUTOMOTIVE DIESEL ENGINES**

A.B. Stefanovsky

### ***Summary***

**A correlation between angles of ignition delay and fuel injection advance in automotive diesel engines is presented and its numerical, engine group-specific parameters are considered in the paper.**

**Keywords: ignition delay angle, fuel injection advance angle, fuel supply equipment, diesel engine.**