

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ДВИГАТЕЛИ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

УДК 621.43.052

ДОСЛІДЖЕННЯ ПУСКОВИХ ЯКОСТЕЙ МІКРОЛІТРАЖНОГО ДВИГУНА
ДЛЯ СПОРТИВНОГО АВТОМОБІЛЯ

О.М. Врублевський, проф., д.т.н., А.П. Кузьменко, ас., к.т.н.,
С.О. Подліщук, асп., В.О. Михайлов, ст.,
Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Анотація. Подано результати дослідження пускових якостей мікролітражного двигуна, обладнаного системою електричного пуску, що призначено для автомобіля ХАДІ-34. Визначено шляхи зменшення часу пуску двигуна, що ґрунтуються на даних розрахунку та аналізі експерименту. Визначено вплив регульовальних параметрів на час пуску.

Ключові слова: мікролітражний двигун, електричний стартер, час пуску, випробувальний стенд, регульовальні параметри.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПУСКОВЫХ КАЧЕСТВ МИКРОЛИТРАЖНОГО
ДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ СПОРТИВНОГО АВТОМОБИЛЯ

А.Н. Врублевский, проф., д.т.н, А.П. Кузьменко, ас., к.т.н., С.О. Подлещук, асп.,
В.А. Михайлов, ст., Харьковский национальный автомобильно-дорожный
университет

Аннотация. Представлены результаты исследования пусковых качеств микролитражного двигателя, оборудованного системой электрического пуска, которая предназначена для автомобиля ХАДИ-34. Определены пути сокращения времени пуска двигателя, которые базируются на данных расчетов и анализе эксперимента. Определено влияние регулировочных параметров на время пуска.

Ключевые слова: микролитражный двигатель, электрический стартер, время пуска, испытательный стенд, регулировочные параметры.

MICRO ENGINE START PERFORMANCE RESEARCH FOR RACING CAR

O. Vrublevskiy, Prof., D. Sc. (Eng.), A. Kuzmenko, T. Asst., Ph. D. (Eng.),
S. Podlishchuk, P. G., V. Mykhailov, student,
Kharkov National Automobile and Highway University

Abstract. A methodology of modernization of the single-cylinder engine start by replacing the standard system by an electric starter is presented. Based on the calculated and experimental studies there have been provided the start-up characteristics of a single-cylinder engine. The measures to reduce the start-up time of the engine during the race in the Shell –EcoMarathon are offered.

Key words: subcompact engine, electric start, starting time, test stand, adjusting parameters.

Вступ

Останнім часом кафедра ДВЗ ХНАДУ бере участь у створенні силової установки спортивного автомобіля ХАДІ-34 – учасника зма-

гань Shell «Eco-marathon». На попередніх етапах цього напрямку досліджень проведено роботи з модернізації базового двигуна HONDA серії GX. Збільшено ступінь стиснення, хід поршня, впроваджено системи

електронного запалювання та подачі палива за допомогою інжектора. Реалізовано нові параметри двигуна: ступінь стиснення – $\varepsilon = 11$ (базовий 8); хід поршня – 35 мм (базовий становив 29 мм); встановлення електронної системи запалювання [1]. Це, безумовно, дозволяє покращити результати команди ХНАДУ під час перегонів. Але залишається проблема ефективного пуску. Без цього неможливо ані зменшити час роботи двигуна, ані реалізувати оптимальний, керований засобами телеметрії з командного пункту, алгоритм проходження залікового кола. Це підтвердив досвід провідних команд. Саме вирішенню задач, що дозволять впровадити ефективний пуск, присвячено дану роботу.

Аналіз публікацій

Усі команди-учасники перегонів використовують технології, що прискорюють пуск двигуна. За приклад взято угорську команду з коледжу міста Кечкемет на автомобілі Megameter з призовим результатом в 2696 км/л [2].

Перший двигун, який застосовували на автомобілі, був Honda GX-25. Але показники, яких він досягав, не могли бути кращими за результат у 600–800 км/л. Подалі був збудований новий двигун ММ 1, що дозволив досягти набагато кращих показників. Однією з передумов покращення результатів було впровадження електричної системи пуску двигуна. Для цього використовується стартер, що встановлюється на двигуни, літражем 50–100 см³. Накопичений вказаною командою досвід адаптації серійних компонентів системи пуску успішно використовувався у подальшій генерації двигунів «ММ».

У 2013 році вони побудували новий автомобіль – Megameter IV, який може бути одним з найбільш енергоефективних гоночних автомобілів у світі. В автомобілі встановлено одноциліндровий чотиритактний бензиновий двигун із впорскуванням палива та електричним стартером.

Параметри двигуна:

Об'єм двигуна	45 см ³
S/D	58/31,5
Ступінь стискання	14/22
Система керування двигуном	VEMS,
Частота обертання КВ	1500–3600 хв ⁻¹
Потужність двигуна	600 Вт
Стартер	Suzuki SX50

Враховуючи регламент змагань, а також умови експлуатації двигуна спортивного автомобіля, ґрунтуючись на аналізі результатів перегонів команди ХНАДУ і конкурентів, можна сформулювати такі вимоги до процесу пуску та системи, яка його забезпечує.

1. Час пуску не має займати більше 2–3 с.
2. Пуск двигуна повинен бути автоматизований, інтегрований в алгоритм оптимального проходження траси.
3. Система, що забезпечує пуск, повинна бути мінімальної ваги та максимальної енергоємності.
4. Пуск двигуна має здійснюватися з першої спроби.

Для забезпечення пуску двигунів внутрішнього згоряння використовуються наступні способи: ручний; електричним стартером; стисненим повітрям; допоміжним пусковим двигуном; за допомогою гідромоторів [3].

З усіх перелічених для мікролітражного одноциліндрового двигуна ефективними є два перших. Ручний пуск може задовольнити за першим та четвертим критеріями, але автоматизація у цьому разі неможлива, а стосовно ваги можна зробити таке зауваження. Команда ХНАДУ, використовуючи у 2011 році двигун із ручним стартером, змушена була взяти пілота з неабиякими фізичними даними (вага – близько 70 кг), який при проходженні траси втрачав майже 2 кг. У той же час вага пускової системи з електричним стартером не перевищує 1 кг. А автоматизація процесу пуску (дистанційне керування автомобілем) робить можливою участь пілота мінімальної дозволеної регламентом ваги – 50 кг.

З урахуванням перелічених вище умов безальтернативним є застосування електричного стартера.

Мета і постановка завдання

Для впровадження електростартерного пуску, що є метою цього дослідження, необхідно вирішити такі задачі:

1. Запропонувати варіанти встановлення та узгодження елементів системи пуску, за умов мінімальної зміни конструкції базового двигуна.
2. Визначити параметри процесу пуску.
3. Визначити залежність показників пуску від регульованих параметрів двигуна.

Методика та результати дослідження пускових якостей мікролітражного одноциліндрового двигуна

Для визначення характеристик пуску досліджуваного двигуна був збудований випробувальний стенд (рис. 1), на якому проводились безпосередні дослідження з визначення часу пуску за різних регульованих параметрів.

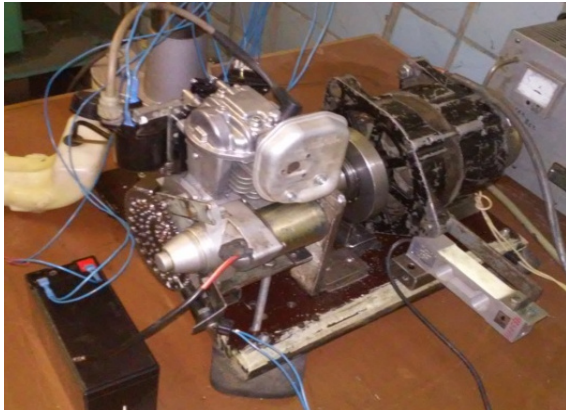


Рис. 1. Загальний вигляд стенда

Для визначення умов пуску двигуна обов'язковою є реєстрація частоти та нерівномірності обертання колінчастого вала (КВ). Для цього використовувалися індуктивний датчик (рис. 2) та датчик Холла (рис. 3) системи запалювання.

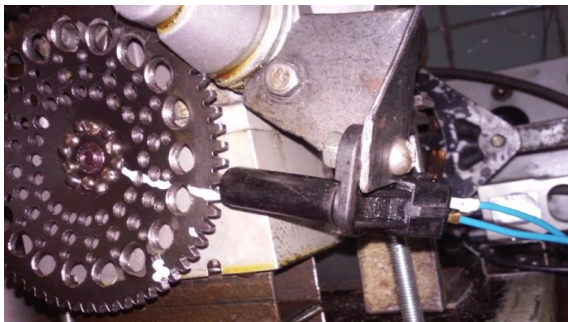


Рис. 2. Встановлення індуктивного датчика положення КВ

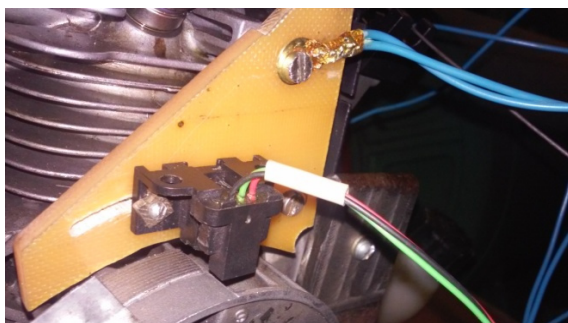


Рис. 3. Встановлення датчика Холла системи запалювання

Отримані дані за допомогою вимірювального комплексу, що включав АЦП L-CARD E 14-140, відповідне програмне забезпечення реєстрації сигналу, що надалі формуються вказаними датчиками в середовищі Power Graph, аналізувались та перетворювались. Зразок результату визначення частоти обертів КВ за даним алгоритмом подано на рис. 4.

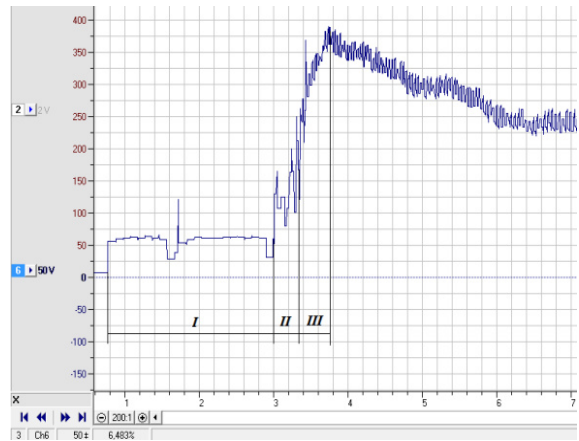


Рис. 4. Зміна частоти обертів КВ двигуна 1Ч3,5/3,5 під час пуску

Додатковою вимогою до системи пуску є забезпечення мінімальної пускової частоти обертання КВ двигуна $n > 300 \text{ хв}^{-1}$ при розрядженій до 25 % акумуляторній батареї. Динамічний процес розгону двигуна можна розділити на три стадії (рис. 4), 1-а стадія триває до 2 с. За цей час відбувається вихід на пускову частоту обертання колінчастого вала. Тривалість другої стадії при пускових обертах може становити 0,4–0,5 с. Далі, під час третьої стадії, відбувається запуск ДВЗ.

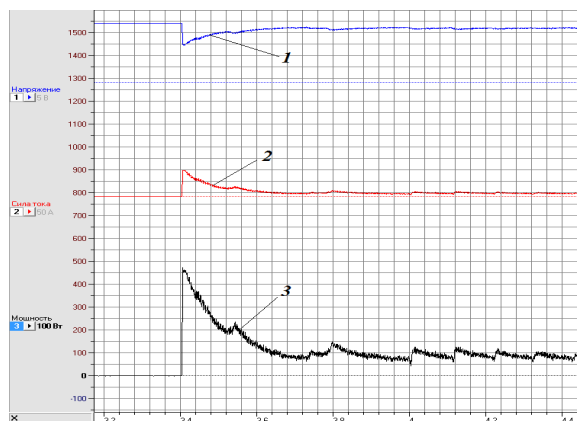


Рис. 5. Осцилограми визначення електричних параметрів стартера під час пуску двигуна 1Ч 3,5/3,5: 1 – зміна напруги на клеммах акумулятора; 2 – зміна струму в обмотці стартера; 3 – зміна електричної потужності стартера

Зміну параметрів стартера під час пуску подано на рис. 5. Визначено, що для забезпечення першого оберту двигуна необхідна потужність стартера 460 Вт. Надалі електрична потужність стартера під час пуску перебуватиме на рівні 100–120 Вт.

Безперечно, покращення динамічних характеристик електричної системи пуску можливе за рахунок використання акумуляторної батареї більшої ємності та/або більш потужного стартера. Але це викликає збільшення маси та вартості системи пуску. За умов мінімізації маси спортивного автомобіля це неприпустимо.

Результати обробки осцилограм для різних умов пуску подано на рис. 6. Для коректних результатів досліджень під час пуску температурний режим двигуна і навколишнього середовища підтримувався постійним. Слід відзначити, що під час перегонів до проходження залікового кола двигун виводять на оптимальні температури його поверхонь.

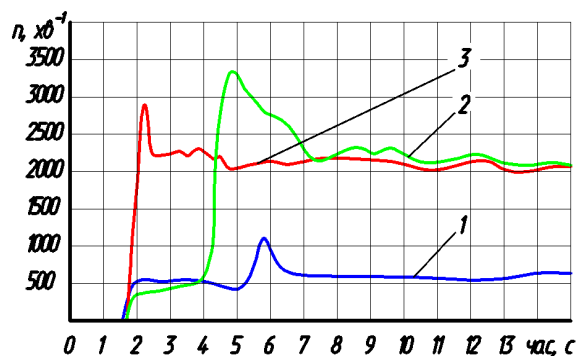


Рис. 6. Осцилограма зміни частоти обертання двигуна на холостому ходу: 1 – запуск із декомпресором при куті випередження запалювання 7 град. п.к.в.; 2 – запуск із декомпресором при куті випередження запалювання 16 град. п.к.в.; 3 – запуск без декомпресора при куті випередження запалювання 16 град. п.к.в.

Осцилограми суміщені за моментом ввімкнення системи живлення стартера. Затримка часу у 1,5 с на початку пуску пов'язана із процесами у самому стартері, а також із достатньо повільним за часом першим обертотом колінчастого вала, який за експериментальними даними становить до 0,5 с. Саме у цей час реалізується, як показано на рис. 5, максимальна електрична потужність.

При створенні алгоритму пуску можна час затримки взяти за константу і таким чином відпрацювати пуск із випередженням на встановлену величину.

Визначення шляхів зменшення часу пуску двигуна

При обертанні колінчастого вала пусковий пристрій долає опір сил тертя у кінематичних парах. При цьому забезпечується наповнення циліндра, видалення робочого заряду або продуктів згоряння, компенсація різниці між роботами сил стиснення й розширення. Витратами енергії системи пуску на наповнення циліндра та видалення робочого заряду або продуктів згоряння при пуску, внаслідок їх малого значення, можна знехтувати. Тому середній момент опору кривошипно-шатунного механізму можна подати у вигляді двох складових [5]

$$M_{c,cep} = M_{г,cep} + M_{т,cep}, \quad (1)$$

де $M_{г,cep}$ – середній момент опору газових сил; $M_{т,cep}$ – середній момент опору сил тертя.

За даними, приведеними у [4], вплив ступеня стиснення ϵ та нерівномірності обертання на момент спротиву газових сил можна врахувати емпіричною формулою

$$M_{г,cep} = 390V_h(\epsilon + 6\sqrt{\delta}), \quad (2)$$

де ϵ – ступінь стиснення, δ – коефіцієнт нерівномірності обертання.

Проведене осцилографування процесу пуску базового двигуна Honda GX25 та модернізованого дозволило визначити коефіцієнт δ (табл. 1) та момент $M_{г,cep}$.

Таблиця 1 Результати розрахунку моменту спротиву газових сил

$S, м$	$D, м$	S/D	ϵ	δ	$M_{г,cep}, Нм$
0,026	0,035	0,74	8	0,3	0,110
0,035	0,035	1	8	0,3	0,148
0,035	0,035	1	11	0,3	0,188

З даних таблиці слід зробити висновок про доцільність вживання заходів для зменшення моменту $M_{г,cep}$ при запропонованій у [4] модернізації двигуна. Одним із таких заходів є використання механізму продовженого відк-

риття випускного клапана при запуску двигуна. На базовому двигуні Honda серії GX встановлено відцентровий декомпресор, який при обертах КВ менше 500 хв^{-1} (встановлено експериментально) утримує випускний клапан відкритим на такті стиснення. Однак досягнуте зменшення моменту при використанні декомпресора приведе до збільшення часу пуску (рис. 6). Так, співставлення осцилограм 2 і 3 (рис. 6) показало, що двигун без декомпресора запускається на 2,3 с швидше – саме за рахунок скорочення першої фази пуску. При модернізації двигуна Honda серії GX використано систему запалювання з датчиком, що використовує ефект Холла. Зовнішній вигляд двигуна із системою запалювання та стартером наведено на рис. 3. Використання електронного запалювання дозволило скоротити час пуску двигуна в умовах змагань (температура оливи $78 \text{ }^\circ\text{C}$) на 23,5 %.

Дієвим механізмом покращення пускових властивостей силової установки є узгоджене обрання регульовальних параметрів. Зрозуміло, що ці параметри не влаштують користувача під час роботи двигуна на заданому режимі. Зняття вказаних обмежень можливе при використанні мікропроцесорної системи керування двигуном.

Визначення залежностей показників пуску від регульовальних параметрів двигуна

Важливим завданням є вибір регульовальних параметрів, що забезпечать скорочення першої та другої фаз пуску. По-перше, для бензинового двигуна – це кут випередження запалювання. Під час виконання цієї роботи було проведено відповідне дослідження, результати якого подано на рис. 7.

Вони показують, що для скорочення часу пуску кут випередження повинен становити 14–22 град п.к.в. За зменшення кута до 7 град п.к.в. час пуску збільшився у 3 рази.

Також визначено, що без зміни кута, встановленого для пуску, змінюється частота обертання КВ на режимі холостого ходу. Для раннього кута (більше 16 град. п.к.в.) частота обертання КВ становить на холостому режимі 2200 хв^{-1} , а за менших значень кута вказана частота знижується до 1800 хв^{-1} .

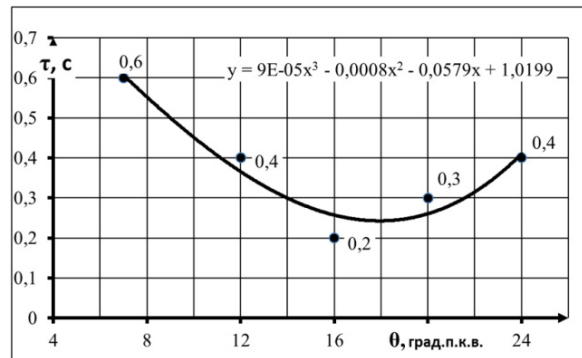


Рис. 7. Графік залежності тривалості 1-ї та 2-ї стадій пуску від кута випередження запалювання

Другим регульовальним параметром, визначенню якого присвячено частину цього дослідження, – є кут φ положення дросельної заслінки. За допомогою спеціального пристрою перед пуском встановлювався кут φ.

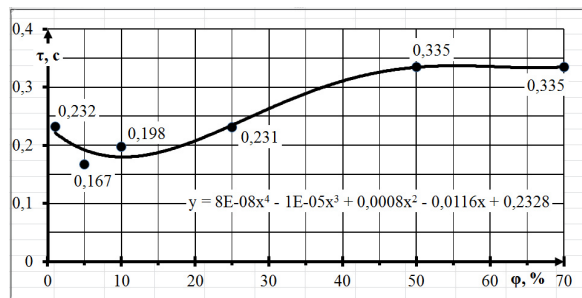


Рис. 8. Залежність часу пуску τ від положення дросельної заслінки (φ)

Результати, подані на рис. 8, показують, що при пуску кут φ необхідно обирати з діапазону 5–15 % від повного відкриття.

Висновки

Грунтуючись на результатах попередніх досліджень, аналізі літературних джерел, сформульовано вимоги до процесу пуску одноциліндрового мікролітражного двигуна спортивного автомобіля – учасника змагань Shell – Eco marathon.

Вирішено задачу адаптації базового двигуна Honda серії GX до вимог пуску електричним стартером. Для цього запропоновано конструкцію колінчастого вала, з додатковою третьою опорою, визначено місце установки стартера та шестерні вала. Конструктивно вирішено питання встановлення компонентів електричної системи запалювання.

Запропоновано методики визначення часу пуску двигуна, характеристик стартера, що включає реєстрацію сигналів датчиків положення колінчастого вала й кута випередження запалювання та подальшу їх обробку. Визначено три стадії пуску двигуна та умови, що впливають на тривалість кожної стадії.

Визначено шляхи зменшення часу пуску. Показано, що застосування декомпресора дозволяє зменшити пусковий момент, але призводить до збільшення часу пуску.

Визначено залежності часу пуску від обрання регульованих параметрів двигуна. Так, кут випередження запалювання для ефективного пуску повинен встановлюватись у діапазоні 14–22 град. п.к.в. Зменшення кута до 7 град. п.к.в. призводить до збільшення часу пуску в 3 рази та падіння частоти обертів КВ з 2200 до 1800 хв⁻¹ наприкінці процесу пуску. Допустимим діапазоном для кута ϕ положення дросельної заслінки при використанні карбюратора є 5–15 % від повного відкриття.

Література

1. Abramchuk F. Ways to improve effectiveness of ICE as power unit of car HADI-34 / Abramchuk F, Vrublevskiy O., Podlishchuk S., Andrusishin A. // Автомобильный транспорт: сб. науч. тр. – 2013. – Вып. 33. – С. 39–43.
2. Бібліотека і доступність інформації у сучасному світі: електронні ресурси в науці, культурі та освіті: // [Zoltán Dankó / Their Knowledge is the Fuel of The Future](http://www.greatenergychallengeblog.com/2012/05/08/hungarys-megameter-their-knowledge-is-the-fuel-of-the-future/) (Журнал National Geographic) / режим доступу до журн.: <http://www.greatenergychallengeblog.com/2012/05/08/hungarys-megameter-their-knowledge-is-the-fuel-of-the-future/>.
3. Двигатели внутреннего сгорания. В 3 кн. Кн. 2. Динамика и конструирование: учебник для вузов / В.Н. Луканин, И.В. Алексеев, М.Г. Шатров и др.; под

ред.: В.Н. Луканин и М.Г. Шатрова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 2005. – 400 с.

4. Квайт С.М. Пусковые качества и системы пуска автотракторных двигателей / С.М. Квайт, Я.А. Менделевич, Ю.П. Чижов. – М.: Машиностроение, 1990. – 256 с.

References

1. Abramchuk F., Vrublevskiy O., Podlishchuk S., Andrusishin A. Ways to improve effectiveness of ICE as power unit of car HADI-34. *Avtomobilniy transport: sb. nauch. tr.*, 2013, Vol. 33. pp. 39–43.
2. Zoltán Dankó *Biblioteka i dostupnist' informatsiyi u suchasnomu sviti: elektronni resursy v nauksi, kul'turi ta osviti. Their Knowledge is the Fuel of The Future* (Zhurnal National Geographic). Available at: <http://www.greatenergychallengeblog.com/2012/05/08/hungarys-megameter-their-knowledge-is-the-fuel-of-the-future/>.
3. Lukanyan V.N., Alekseev Y.V., Shatrov M.H. *Dvyhately vnutrenneho shorannya. V 3 kn. Kn. 2. Dynamika y konstruyrovanye: uchebnyk dlya vuzov* [Internal combustion engines. The 3 books. Bk. 2. Dynamics and design: Textbook for Universities] Pod red. V.N. Lukanyana y M.H. Shatrova. 2-e izd., pererab. i dop. Moscow, Vissh. shk. Publ., 2005. 400 p.
4. Kvyat S.M. *Puskovye kachestva y systemy puska avtotraktornykh dvyhateley* [Launchers quality and system start-up automotive engines]. Moscow, MEI Rubl., 1990. 256 p.

Рецензент: А.М. Пойда, професор, д.т.н., ХНАДУ.

Стаття надійшла до редакції 22 травня 2015 р.