

ОЦЕНКА МОМЕНТА ИНЕРЦИИ ПОДВИЖНЫХ ЧАСТЕЙ АВТОМОБИЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ

Рабинович Э.Х., Зыбцев Ю.В., Калекин В. В., ХНАДУ

Аннотация. Предложен способ оценки момента инерции подвижных частей автомобильного двигателя без демонтажа его с автомобиля, включающий в себя вывешивание ведущих колес на домкратах, разгоны вывешенных колес с записью процесса, демонтаж колес и разгоны без них. По данным двух серий разгона вычислен момент инерции двигателя Honda Civic 1,8 л – 0,178 кг·м².

Ключевые слова: момент инерции, двигатель, автомобиль, разгон, домкрат, видеозапись, Honda Civic 1,8.

Введение

Момент инерции (МИ) или эквивалентная масса (ЭМ) подвижных частей двигателя – необходимая составляющая всех расчетов динамики автомобиля. Однако значения этих показателей не приводятся в технических характеристиках автомобиля и двигателя. Их приходится находить в разрозненных публикациях или определять экспериментально.

Анализ публикаций

В книге [1] и монографии [2] приведены значения МИ двигателей базовых советских автомобилей. Эти данные с мелкими дополнениями повторяются во многих методических источниках. Хотя некоторые из них сообщают малоизвестные сведения. Так, в работе [3] приведены данные по МИ двигателей с гидротрансформаторами. Конкретные значения можно найти в исследовательских работах. Например, в статье [4] приведено значение МИ двигателя Cummins ISF 2,8 л (на автомобиле Gazel Next) – 0,3144 кг·м². Так же обстоит дело с зарубежными источниками. В исследовании [5] приведены результаты измерения на роликовом стенде оригинальным методом МИ двигателей ряда легковых автомобилей, преимущественно чешского производства; в статье [6] описана методика и результаты расчетов МИ двигателей ряда европейских легковых автомобилей. Удивляют некоторые зарубежные данные. Так, в книге [7] для двигателя объемом 5 л указан МИ 0,8 in-lb-sec², т.е. 0,234 кг·м². Наши источники указывают для такого объема 0,4–0,6 кг·м². Можно бы предположить, что двигатель турбирован, но в статье [8] для атмосферного V8 двигателя 5 л кроссовера Range Rover Sport L320 указан

близкий МИ – 0,224 кг·м² (с гидротрансформатором).

Найденные экспериментальные методы, например [4] и [8], – это разные варианты метода выбега, многие из них реализуются на быстроходном инерционном стенде, имеющем собственный привод. Если на стенде нет привода, разгон выполняют двигателем автомобиля. Но в этом случае метод не пригоден для автомобилей с АКПП, на которых запрещается размыкать трансмиссию на ходу переводом селектора в нейтральное положение.

Достоинство метода выбега – независимость от вариации крутящего момента и частоты вращения коленчатого вала (КВ), недостаток – зависимость сопротивления при выбегае от вязкости масла, т.е. температуры.

Итак, в сети не найден ни МИ двигателя Honda Civic, ни свободный от недостатков способ его измерения.

Цель и задачи исследования

Целью исследования является – ускорить научно-технический прогресс на автотранспорте и в автопромышленности за счет сокращения затрат времени и труда на получение исходных данных для расчетов.

Задача исследования – обосновать метод оценки МИ автомобильного двигателя с использованием только разгонов, выполняемых от двигателя проверяемого автомобиля.

Теоретическое обоснование метода

Поскольку в математической модели разгона присутствуют два неизвестных – момент инерции подвижных частей двигателя, приведенный к коленчатому валу, и неизвестный крутящий момент двигателя, необходимы два режима. Предлагается выпол-

нять два разгона с разными массами, но в одном и том же интервале скоростей и на той же передаче. Принято допущение, что при этом запас тяги будет одинаков в обоих режимах даже на автомобиле с АКПП: $P_{p1} = P_{p2}$. Запас тяги $P_p(v)$ – это разность между суммой полных окружных сил на всех ведущих колесах P_k и суммой статических сопротивлений, т.е. сопротивления воздуха P_w и суммарного дорожного сопротивления P_{ψ} . Именно эта разность используется для разгона автомобиля.

Эксперимент может быть реализован разными способами. Самый доступный из них – лабораторный, с вывешенными на домкратах ведущими колесами, а затем – так же на домкратах, но со снятыми колесами. Выполняется в закрытом помещении, что исключает зависимость от погоды и времени суток.

Такой эксперимент описывает система из двух уравнений с двумя неизвестными

$$\begin{cases} P_{p1} = (m_d + m_t + 2m_k) \cdot a_{ск} \\ P_{p2} = (m_d + m_t) \cdot a_{бк} \end{cases}, \quad (1)$$

где m_d , m_t , m_k – приведенные к контакту ведущего колеса с дорогой массы подвижных частей двигателя, трансмиссии и колеса соответственно, кг; $a_{ск}$, $a_{бк}$ – ускорения с колесами и без колес соответственно, $\text{кг} \cdot \text{м}^{-2}$.

В нашем случае корректнее было бы описывать процесс в терминах вращательного движения, но термины поступательного движения привычнее и понятнее, а главное – никак не меняют результата расчетов.

В условиях предлагаемого эксперимента разгону системы «двигатель – трансмиссия – колеса» препятствуют сопротивления в двигателе и трансмиссии плюс сопротивление воздуха вращению колес и открытых частей трансмиссии. При работе в установившемся тепловом режиме различие внешних сопротивлений в двух режимах пренебрежимо мало и принятое допущение о равенстве запасов тяги можно считать корректным.

Вычтем первое уравнение из второго и преобразуем. Получаем решение

$$0 = m_d \cdot (a_{бк} - a_{ск}) + m_t \cdot (a_{бк} - a_{ск}) - 2m_k \cdot a_{ск}$$

$$m_d = \frac{2m_k \cdot a_{ск}}{a_{бк} - a_{ск}} - m_t = \frac{2m_k}{a_{бк} / a_{ск} - 1} - m_t. \quad (2)$$

Отсюда приведенный к колесу момент инерции двигателя

$$I_{д.пр} = m_d \cdot r_k^2, \quad (3)$$

где r_k – радиус качения колеса, м.

Как показано в [9], радиус качения ведущих колес переднеприводного автомобиля несколько повышается с ростом создаваемой ими тяговой силы. Но изменение укладывается в доли миллиметра, так что можно считать $r_k = \text{const}$.

Собственный момент инерции двигателя, приведенный к оси коленчатого вала (КВ),

$$I_d = I_{д.пр} / (u_0 \cdot u_i \cdot u_{gt})^2, \quad (4)$$

где u_0 , u_i , u_{gt} – передаточные числа соответственно главной пары, включенной передачи и гидротрансформатора.

Экспериментальная проверка метода

Эксперимент проведен на седане Honda Civic d4 (2006) с автоматической гидромеханической трансмиссией (АКПП). Водитель, включив двигатель, разгонял трансмиссию с вывешенными колесами резким нажатием на педаль акселератора. Параметры процесса разгона регистрировались видеозаписью показаний спидометра и тахометра. Спидометр был откалиброван по сигналам GPS [11], получено калибровочное уравнение $v_{GPS} = 0,9528 v_{спид} - 0,83$. Видеозаписи обрабатывались в программе Virtual Dub [12] в покадровом режиме.

Выполнены 24 пробы. Затем были сняты колеса и выполнены 20 проб без них. Разброс ускорений довольно велик. Видеозаписи отдельных проб отличаются одна от другой и содержат от одного до четырех участков разгона на разных передачах. Общее количество взятых в расчет участков разгона с колесами – 46, без колес – 55. По каждому участку найдены средняя скорость в км/ч и среднее ускорение в $\text{м}/\text{с}^2$ при допущении, что в пределах участка движение равноускоренное. На рисунках представлены диаграммы зависимости ускорения разгона от средней на участке скорости по всем разгонам с колесами (рис. 1, сверху) и без колес (рис. 1, внизу).

Для расчетов по формуле (2) нужны значения ускорений, снятые в обоих режимах в одинаковом диапазоне скоростей. На диаграмме «с колесами» видны два участка со стабильным (после удаления явных выбро-

сов) ускорением – 65...82 и 86...97 км/ч. На диаграмме «без колес» первый участок отпадает (мало точек, видна на глаз нестабильность), зато второй хорошо подходит. Среднее ускорение при разгоне с колесами $a_{ск}=2,6469 \text{ м/с}^2$, без колес – $a_{бк}=3,8792 \text{ м/с}^2$.

ЭМ колес $m_k=10,49 \text{ кг}$ и трансмиссии $m_t=5,4 \text{ кг}$ были измерены ранее [10].

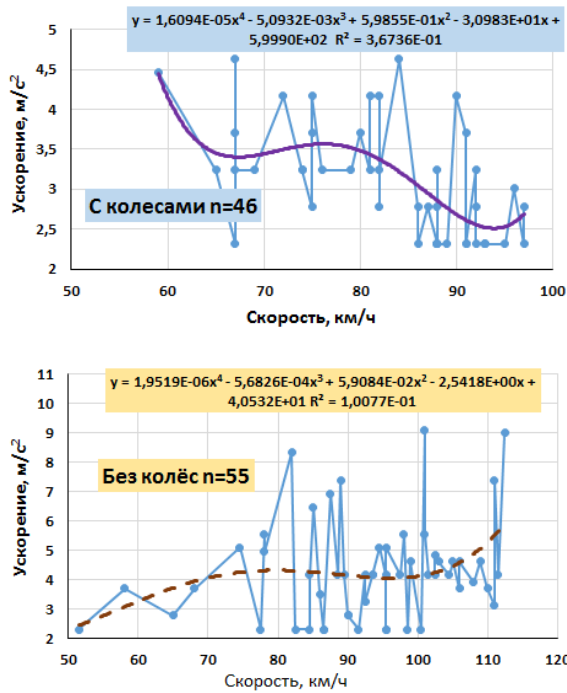


Рис. 1. Зависимость ускорения разгона с колесами (вверху) и без колес от скорости

Эквивалентная масса двигателя вычислена по формуле (2)

$$m_d = \frac{2 \cdot 10,75}{3,8792 / 2,6469 - 1} - 5,4 = 40,78 \text{ кг}.$$

Радиус качения колеса с шиной 205/55 R16 равен 0,302 м [13]. МИ двигателя, приведенный к оси колеса, а затем к оси КВ

$$I_{д.пр} = m_d \cdot r_k^2;$$

$$I_{д.пр} = 40,78 \cdot 0,302^2 = 3,7194 \text{ кг} \cdot \text{м}^2;$$

$$I_d = I_{д.пр} / (u_0 \cdot u_i \cdot u_{gt})^2;$$

$$I_d = 3,7194 / (4,437 \cdot 1,022 \cdot 1,01)^2 = 0,1773 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Истинные значения момента инерции двигателя Honda Civic или других современных ДВС 1,8 л в доступных источниках не

обнаружены. Упомянутый выше способ для двигателя AGU 1,8 автомобиля Škoda Octavia дал значение того же порядка – 0,218 кг·м². В работе [5] для двух разных дизелей 1,7 л получены значения МИ 0,142 и 0,181 кг·м². Наш результат укладывается в этот ряд.

Обсуждение

Отметим недостатки методики. Описанный эксперимент был поставлен для другой цели – определения момента инерции трансмиссии методом выбега, поэтому исполнители не уделяли особого внимания разгону – это был просто этап подготовки выбега. Этим объясняется большой разброс характеристик разгона, не всегда полная запись процесса. Указанные недостатки можно устранить, установив ограничитель подачи топлива (проще всего – упор под педалью газа). Такая мера не только ограничит подачу топлива, но и стабилизирует ее. В результате разгон замедлится, длительность каждого участка увеличится, точность измерения интервалов времени возрастет.

Желательно использовать более точные методы измерения окружной скорости колес и частоты вращения КВ.

Следует тщательно проанализировать устойчивость результата к изменениям числа проб и (или) участков, обосновать рекомендуемые значения. Описанный здесь эксперимент недостаточно устойчив: так, удаление двух вероятных выбросов из выборки объемом 19 единиц изменило результат с 0,178 до 0,193, т.е. на 8 %. Но этот недостаток легко преодолевается увеличением числа проб.

Несмотря на указанные слабые места метода, остаются его достоинства: выполнение без демонтажа двигателя с автомобиля, простота реализации, небольшие затраты времени и труда, возможность совмещения с другими задачами, нетребовательность к инструментарию (в простейшем варианте достаточно иметь домкрат и мобильный телефон с видеокамерой). Метод работает там, где отказывают все другие.

Выводы

Предложенный метод дает результаты, не выходящие за рамки значений, получаемых более точными методами, и может быть рекомендован для оценки момента инерции автомобильного двигателя при отсутствии надежных данных.

Литература

1. Бортницкий П.И. Тягово-скоростные качества автомобилей: справочник / П.И. Бортницкий, В.И. Задорожный. – К.: Вища школа, 1978. – 176 с.
2. Цитович И.С. Динамика автомобиля / И.С. Цитович, В.Б. Альгин. – Мн.: Наука и техника, 1981. – 191 с.
3. Суворов И.А. Об исследовании режимов нагружения трансмиссии легкого коммерческого автомобиля в определенных условиях эксплуатации / И.А. Суворов, Н.А. Кузьмин // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 6. – Режим доступа: URL: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=11440>
4. Pexa M. Pomiar momentu bezwładności silnika pojazdu. Moment of inertia measurement of vehicle engine / Martin PEXA Josef POŠTA Zdeněk ALEŠ Bohuslav PETERKA // Exploatacja i Niezawodnosc. – 2010. – №3. – P. 44–47. – Режим доступа: http://www_ein_org_plpodstronywydania47pdf07.pdf.
5. Ubysh A. Problems of rotational mass in passenger vehicles / A. Ubysh // Transport Problems. – 2010. – Vol. 5, Issue 1. – P. 33–40. – Режим доступа: http://transportproblems.polsl.pl/pl/archiwum/2010/zeszyt1/2010t5z1_04.pdf.
6. Gillespie T. Fundamentals of vehicle Dynamics / Society of Automotive Engineers (SAE). Warrendale, PA. – 1992. – 495 p.
7. Shakouri P. Fuel Efficiency by Coasting in the Vehicle / P. Shakouri, A. Ordys, P. Darnell, P. Kavanagh / International Journal of Vehicular Technology Volume 2013 (2013), Article ID 391650, 14 p. Access: <http://dx.doi.org/10.1155/2013/391650>.
8. Зуев В.А. Бестормозной метод определения момента инерции двигателя на роликовом стенде / В.А. Зуев // Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та устаткування для їх обслуговування: матеріали 8-ї міжнар. наук.-практ. конф., 28–29 вересня 2017 р. – Херсон: Херсонська державна морська академія. – С. 417–423.
9. Волков В.П. Оценка радиуса качения ведущих колес по параметрам разгона и выбега автомобиля / В.П. Волков, Э.Х. Рабинович, И.М. Баранник, В.В. Митасов // Український метрологічний журнал. – 2013. – №4. – С. 38–42.
10. Рабинович Э.Х. Измерение момента инерции автомобильной автоматической трансмиссии методом выбега / Э.Х. Рабинович, В.П. Волков, Ю.В. Зыбцев и др. // Український метрологічний журнал. – 2013. – №2. – С. 28–33.
11. Зыбцев Ю.В. Измерение скорости автомобиля при самодиагностике на дороге / Ю.В. Зыбцев // Український метрологічний журнал. – 2014. – №1. – С. 35–41.
12. Welcome to virtualdub.org! – virtualdub.org. – Режим доступа: www.virtualdub.org.
13. Tire_data_calculator. Access: http://bndtechsource.ucoz.com/index/tire_data_calculator/0-20.

References

1. Bortnitsky, P.I., Zadorozhny, V.I. (1978). *Tjagovo-skorostnye kachestva avtomobilej* [Traction-speed qualities of cars]. Kyiv, Vishcha schkola [in Russian].
2. Tsitovich, I.S., Algin, V.B. (1981). *Dinamika avtomobilja* [The car dynamics]. Minsk: Nauka i technica [in Russian].
3. Suvorov, I.A., Kuzmin, N.A. (2013). Ob issledovanii rezhimov nagruzenija transmissii legkogo kommercheskogo avtomobilja v opredelennyh uslovijah jekspluatacii [On the study of loading modes of the light commercial vehicle transmission under certain operating conditions]. *Sovremennyje problemy nauki i obrazovanija - Modern problems of science and education*, science-education.ru, Retrieved from: <http://www.science-education.ru/en/article/view?Id=11440>.
4. Pexa, M. (2010). Pomiar momentu bezwładności silnika pojazdu. Moment of inertia measurement of vehicle engine / Martin PEXA Josef POŠTA Zdeněk ALEŠ Bohuslav PETERKA. Exploatacja i Niezawodnosc, 3, 44-47. Retrieved from: http://www_ein_org_plpodstronywydania47pdf07.pdf.
5. Ubysh, A. (2010). Problems of rotational mass in passenger vehicles / Aleksander UBYSZ. Transport Problems, 5, 1. 33-40. Retrieved from: http://transportproblems.polsl.pl/pl/archiwum/2010/zeszyt1/2010t5z1_04.pdf.
6. Gillespie, T. (1992). Fundamentals of vehicle Dynamics. Society of Automotive Engineers (SAE). Warrendale, PA.
7. Shakouri, P., Ordys, A., Darnell, P., Kavanagh, P. (2013). Fuel Efficiency by

- Coasting in the Vehicle. International Journal of Vehicular Technology, Article ID 391650, 14, Retrieved from: <http://dx.doi.org/10.1155/2013/391650>.
8. Zuiiev, V.A. (2017). Bestormoznoj metod opredelenija momenta inercii dvigatelja na rolikovom stende [The non-braking method for determining the engine moment of inertia on a roller bench]. Suchasni enerhetychni ustanovky na transporti, tehnolohiyi ta ustatkuvannya dlya yix obsluhovuvannya. Materialy 8-yi mizhnar. nauk.-prakt. konf., 28-29 veresnya 2017 r. Kherson: Xersonska derzhavna morskakademiya. Materials of the 8th Intern. science-practice conf. Modern energy installations on transport, technologies and equipment for their maintenance]. September 28-29, 2017. Kherson: Kherson State Maritime Academy, 417-423 [in Russian].
 9. Volkov, V.P., Rabinovich, E.H., Barannik, I.M., Mitasov, V.V. (2013). Ocenka radiusa kachenija vedushhih koles po parametram razgona i vybega avtomobilja [Estimation of the rolling radius of the driving wheels according to the parameters of acceleration and coasting of the car]. *Ukrainian metrological journal - Ukrainiskij metrologichnyj zhurnal*, 4, 38-42 [in Russian].
 10. Rabinovich, E.Kh., Volkov, V.P., Zytsev, Yu.V. [et al.] (2013). Measurement of the inertia moment of automotive automatic transmission by the coasting method. *Ukrainian metrological journal - Ukrainiskij metrologichnyj zhurnal*, 2, 28-33 [in Russian].
 11. Zytsev, Yu.V. (2014). Izmerenie skorosti avtomobilya pri samodiagnostike na doroge [Measuring the speed of the car when on-road self-diagnosis]. *Ukrainian metrological journal - Ukrainiskij metrologichnyj zhurnal*, 1, 35-41 [in Russian].
 12. Welcome to virtualdub.org! - virtualdub.org // – Access: www.virtualdub.org.
 13. Tire_data_calculator // Retrieved from: http://bndtechsource.ucoz.com/index/tire_data_calculator/0-20.

Рабинович Эрнест Хаимович, к.т.н., с.н.с.
доцент, +(380)975797220 erjara39@ukr.net
Зыбцев Юрий Васильевич, ст. преп.,
+(380) 971432144
Калекин Владислав Вячеславович, студент,
+(380) 999404522
vladkalekin@gmail.com,

кафедра технической эксплуатации и сервиса автомобилей имени Н.Я. Говорущенко
Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, 61002,
г. Харьков, Украина, ул. Я. Мудрого, 25

ESTIMATION OF INERTIA MOMENT OF CAR ENGINE MOVING PARTS

**Rabinovich E., Zytsev Yu.,
Kalekin V., KhNAHU**

Abstract. Problem. To calculate the car dynamics, especially in urban conditions with frequent transitions to lower gears, the values of the inertia moment (MI) or the equivalent mass (EM) of the engine moving parts, brought to the crankshaft, are required. However, they are not given in the specifications, and the known methods of measurement are both too complex and laborious, or not suitable for some vehicle types. **Goal.** To create a method for estimation the engine MI, suitable for all types of vehicles and not requiring special equipment or excessive time, labor or expenses. The method proposed: to measure MI of driving wheels and transmission with known methods. To lift the car with jacks aid until the driving wheels come off the floor. To speed-up them by the engine repeatedly, recording the acceleration parameters, for example, by video filming the speedometer and tachometer readings. To remove the driving wheels and repeat the speeding-up in the same gear and, if possible, with the same fuel supply rate. Using the videorecords, to calculate the average acceleration in these modes and MI of the engine using the formulas given. **Methodology and results of the method verification.** According to GPS signals the speedometer of the car Honda Civic 2006 was calibrated. EM of driving wheels (2×10.49 kg) and transmission (5.4 kg) was measured by the known methods. 24 accelerations with wheels, followed by 20 ones without wheels were carried out. The interval of more or less stable acceleration (86...97 km/h) was common for both modes, where the average acceleration with the wheels was 2.6469 m/s^2 , without wheels -3.8792 m/s^2 . Then $EM=39.664$ kg and $MI=0.1782 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ were calculated, which is in the range of known values for engines of similar volume. However, result variation is too large. The ways of method improving: to reduce and stabilize the acceleration rates, for example, putting an abut under the gas pedal; increase the number of samples. **Scientific novelty:** the method of estimating the car engine moment of inertia has been proposed and tested. **Practical value:** the method is suitable for all types of cars, does not require the use of high-speed roller stands or special equipment other than a jack and a phone with a video camera.

Key words: moment of inertia, engine, car, acceleration, jack, video recording, Honda Civic 1.8.

ОЦІНКА МОМЕНТУ ІНЕРЦІЇ РУХОМИХ ЧАСТИН АВТОМОБІЛЬНОГО ДВИГУНА

Рабінович Е.Х., Зибецв Ю.В., Калекін В.В.,
ХНАДУ

Анотація. Для розрахунку динаміки автомобіля, особливо в міських умовах із частими переходами на нижні передачі, потрібні значення моменту інерції (МІ) або еквівалентної маси (ЕМ) рухомих частин двигуна, приведені до колінчастого вала. Проте їх не наводять у технічних характеристиках, а відомі методи вимірювання є занадто складними та трудомісткими, або не пасують до деяких типів автомобілів. **Мета:** створити метод оцінки МІ двигуна, придатний для всіх типів транспортних засобів такий, що не потребує спеціального обладнання або надмірного часу, праці чи витрат. Запропонований спосіб: виміряти МІ ведучих коліс і трансмісії відомими методами. Підняти машину за допомогою домкратів так, щоб ведучі колеса не торкалися підлоги. Раз за разом розганяти їх двигуном, записуючи параметри прискорення, наприклад, знімаючи на відео показання спідометра і тахометра. Зняти ведучі колеса та повторювати розгони на тій же передачі й, за можливістю, з такою ж подачею палива. За відеозаписами об-

числити середнє прискорення в цих режимах та МІ двигуна, використовуючи наведені формули. Методика та результати перевірки методу. За сигналами GPS відкалібровано спідометр автомобіля Honda Civic 2006. Виміряно за відомими методами ЕМ ведучих коліс ($2 \times 10,49$ кг) та трансмісії (5,4 кг), виконано 24 розгони з колесами, а потім 20 без коліс. Загальним для обох режимів був інтервал більш-менш стабільного прискорення (на швидкостях 86...97 км/год), у якому середнє прискорення з колесами було $2,6469$ м/с², без коліс – $3,8792$ м/с². Потім розраховано $EM = 39,664$ кг та $MI = 0,1782$ кг·м², що лежить у діапазоні відомих значень для двигунів аналогічного об'єму. Проте варіація результату є занадто великою. Шляхи вдосконалення методу: зменшити і стабілізувати значення прискорення, наприклад, вставити притулок під педаль газу; збільшити кількість зразків. Наукова новизна: запропоновано та випробувано метод оцінки моменту інерції автомобіля. Практичне значення: метод підходить для всіх типів машин, не вимагає використання швидкісних роликів стендів або спеціального устаткування, крім домкрата, а також телефону з відеокамерою.

Ключові слова: момент інерції, двигун, автомобіль, прискорення, домкрат, відеозапис, Honda Civic 1.8.