

УДК 629.113

**М.С. Оліскевич**

Національний університет "Львівська політехніка"

**ДОСЛІДЖЕННЯ ЦИКЛІЧНИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ АВТОМОБІЛЯ НА ПРЯМОЛІНІЙНІЙ ГОРИЗОНТАЛЬНІЙ НЕПЕРЕСІЧЕНІЙ ДІЛЯНЦІ ДОРОГИ**

*Розглядається циклічний прямолінійний рух автомобілів. Побудовано модель оптимального керування транспортним засобом в таких умовах. Використано принцип максимуму Понтрягіна, для якого обґрунтовано доцільність і записано функціонал на основі рівняння руху автомобіля, як матеріальної точки із зосередженою масою. Сформульована задача із одним вільним правим кінцем фазової траєкторії, яка не має стійких розв'язків. Для її розв'язання використано числовий метод, тобто складено кінцево-різницеve рівняння. Оптимальну функцію керування із перемиканням рушійної сили знайдено із застосуванням методу математичного програмування. Оптимальний закон керування демонструє, що найкраще значення функціоналу – критерію енергоощадності – досягається при імпульсному керуванні рухомим об'єктом. Справедливість такої теоретичної моделі перевірено експериментально, при порівнянні різних за максимальною і середньою швидкістю, але однакових за довжиною ділянки руху циклів. Під час експериментальних досліджень вимірювались доступні параметри руху, а також ж часова і шляхова витрата палива, значення якої опосередковано підтверджують теоретичні висновки.*

*Ключові слова:* цикл руху, енергоощадність, швидкість, оптимальне керування, коливний рух.

**М.С. Оліскевич**

Національний університет «Львівська політехніка»

**ДОСЛІДЖЕННЯ ЦИКЛІЧНИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ АВТОМОБІЛЯ НА ПРЯМОЛІНІЙНІЙ ГОРИЗОНТАЛЬНІЙ НЕПЕРЕСІЧЕНІЙ ДІЛЯНЦІ ДОРОГИ**

*Стаття присвячена загальній проблемі використання автомобілів при виконанні перевезень за критерієм мінімальних часових затримок. При цьому ставиться умова мінімальних витрат енергетичних ресурсів. У такому формулюванні задача є оптимізаційною. Розглядається частина невирішеної раніше проблеми: дослідження можливості зниження витрати палива за циклічного нерівномірного прямолінійного руху автомобіля. Побудовано модель оптимального керування транспортним засобом в таких умовах. Застосовано функціонал, що представляє роботу усіх активних сил за заданий відрізок часу. Використано принцип максимуму Понтрягіна, функцію Гамільтона якого записано на основі рівняння руху автомобіля, як матеріальної точки із зосередженою масою. Модель у такому вигляді має концептуальне значення. Сформульована задача із одним вільним правим кінцем фазової траєкторії. В математичній теорії оптимального керування ця задача не має стійких розв'язків. Для її розв'язання використано числовий метод, тобто складено кінцево-різницеve рівняння. Оптимальну функцію керування із перемиканням рушійної сили знайдено при застосуванні методів математичного програмування. Оптимальний закон руху демонструє, що найкраще значення функціоналу – критерію енергоощадності – досягається при імпульсному керуванні рухомим об'єктом. Справедливість такої теоретичної моделі перевірено експериментально. Для цього виконувались дорожні випробування легковим автомобілем Деу Сенс на горизонтальній прямолінійній замській дорозі. Було сплановано і виконано декілька експериментальних заїздів однакової довжини, які відрізнялись структурою режимів руху. Здійснювалось вимірювання таких параметрів як шляхова і долина витрата палива, пробіг, час руху, миттєва швидкість, частота обертання колінвала двигуна, ступінь завантаження двигуна (відкриття дросельної заслінки). Для вимірювання основних параметрів використовувався пристрій і відповідне програмне забезпечення Сканматік-1, а також GPS навігатор й інші прилади. Після оцифрування результатів зроблено порівняння різних за максимальною і середньою швидкістю, але однакових за довжиною ділянки руху циклів. У тому числі проводився цикл з рівномірним рухом автомобіля на такому ж відрізку дороги. Виміряні значення шляхової витрати палива, як з'ясовано з експериментів, опосередковано підтверджують теоретичні висновки стосовно оптимальності режиму руху розгін - вільне кочення.*

*Ключові слова:* цикл руху, енергоощадність, швидкість, оптимальне керування, коливний рух.

**M. Oliskevych**

National University "Lvivska Politechnika"

**RESEARCH CYCLICAL MODES OF THE VEHICLE ON A STRAIGHT HORIZONTAL CROSS SECTION OF THE ROAD**

*The article is devoted to the general problem of car use at carrying out transportation under the criterion of minimum time delay. This condition of minimal energy resources is enabled. The problem is an optimization in this formulation. The part of unsolved problems was considered in this case, such as a study of the possibility of reducing the fuel consumption by cyclic uneven straight driving of a car. The model of optimal driving of such conditions is constructed. The functional representing the work of all active forces for a given period of time is applied. Pontryagin maximum principle was used, which reordered Hamilton function is based on the equations of motion of the vehicle as a material point of concentrated mass. The model in this form acquire conceptual meaning. The task with free right end of one phase trajectory is formulated. This task has not sustainable solutions. in mathematical optimal control theory. The numerical method was used to get a proper solution of these equation which is composed with finite-difference equations. The optimal control function of switching the driving force was found with an application of mathematical programming. Optimal control state shows that the*

*best functionality value as criteria of energy saving was achieved under pulsed driving of a driving subject. The validity of this theoretical model has been tested experimentally. Road test have been carrying out for this aim using Daewoo Sens car at horizontal straight suburban road. It was planned and executed several experimental rounds of equal length which differed with structure modes of motion. There were measured such parameters as fuel consumption per road and per hour, mileage, driving time, instantaneous speed, the rotation frequency of crankshaft of engine, engine loading degree (throttle opening). To measure the main parameters there were used a devices and software as SKANMATIK-1 as well as GPS navigation and other tools. The comparing driving cycles of different maximum and average speeds but the same length were provided after results digitizing. A series of steady driving vehicle cycles were conducted on the same stretch of road too. Measured values of car fuel consumption indirectly confirm theoretical conclusions below regarding optimality driving mode acceleration-free rolling as revealed from experiments.*

*Keywords: driving cycle, energy profitability, speed, optimal control, oscillating movement.*

**Постановка проблеми та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями.** Організацію руху автомобільних транспортних засобів здійснюють за різними критеріями: мінімальна тривалість, максимальний комфорт водіїв, безпека [1]. Через це розподіл швидкостей руху на дорогах, зокрема магістрального сполучення, набуває закономірної різноманітності [2]. Найчастіше користуються критерієм максимальної швидкодії транспортних операцій. Однак, більшість транспортних засобів виконують завдання виробників і споживачів транспортних послуг і мають свої усталені режими роботи. Транспортний процес, будучи циклічним за змістом, не завжди "вписується" в ці режими, що приводить до затримок основного виробництва і споживання товарів та послуг. У зв'язку з цим усе частіше сучасні транспортно-технологічні системи будують за критерієм точного і вчасного виконання операцій, що передбачає також відсутність затримок у розкладі руху [13]. В більшості випадків автомобілям задають моменти початку і завершення руху з допустимими відхиленнями [3]. При цьому накладається обмеження стосовно мінімальних витрат палива. Це, фактично, означає, що водії транспортних засобів повинні оперативно слідкувати за дотриманням розкладу руху, забезпечуючи при цьому найбільш енергетично ощадні режими. Враховуючи, що це – додаткове навантаження на них, необхідний рівень безпечних умов керування, такі завдання виявляються нездійсненними без застосування автоматичних систем керування автомобілями. Для їх успішного застосування необхідно мати відповідні моделі.

Рух автомобілів вздовж горизонтальної прямолінійної ділянки маршруту за заданим графіком (заданою середньою технічною швидкістю руху) далеко не завжди супроводжується мінімальними витратами енергії, бо це, переважно, обумовлено роботою двигуна внутрішнього згорання на часткових нераціональних режимах – з одного боку, а також через вплив транспортного потоку – з іншого [4]. Якщо ощадні режими роботи двигуна не можна забезпечити на усьому маршруті, то їх, принаймні, можна використати частково, плануючи багаторазове циклічне навантаження зі структурою: розгін – номінальний режим – вільне кочення. Проблемою успішності такого використання є недосконалість моделей забезпечення керування транспортним засобом; відсутність достовірної інформації про наявність ефекту заощадження в таких циклах; відсутність технічних засобів для збору необхідної початкової інформації для реалізації циклічного керування.

У зв'язку з цим **метою роботи** є розкрити можливості реалізації циклічного енергоощадного режиму керування транспортним засобом при дотриманні графіка руху.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Питанням вибору ощадних режимів руху автомобіля при відомих транспортних і дорожніх умовах були присвячені дослідження вчених ХАДІ ще в 80-90-х роках минулого століття. Ними було теоретично і експериментально обґрунтовано, що застосування коливних режимів „розгін-вільне кочення” (імпульсного руху) є недоцільним з багатьох позицій, у першу чергу – паливної економності [5]. Таких висновків вчені дійшли на основі експлуатації транспортних засобів із низькими характеристиками динамічності, а також без можливості прогнозування дорожнього опору та інтенсивності потоку. Крім того, автори керувались головним критерієм організації руху – максимальною середньою технічною швидкістю, замість переміщення „само вчасно”. Висувались додаткові аргументи всупереч нерівномірності навантаження транспортного засобу на прямолінійних ділянках: при цьому виникають додаткові динамічні навантаження, які приводять до підвищення інтенсивності зношення деталей силових агрегатів. Однак підтвердженнь таким запереченням немає.

Оптимальні за енергоощадністю цикли досліджувались у роботі [6]. Вони побудовані на основі декількох сприятливих умов застосування так званого імпульсного керування автомобілем, головні з яких є: відсутність потреби великих крутних моментів, стопові режими роботи двигуна, недопустимість гальмування двигуном та інші. Перша умова приводила, практично до

суперечності. З одного боку дослідник акцентує на перевагах екстремальних процесів розгону і гальмування в транспортному циклі. З іншого боку – такі цикли унеможливають імпульсний рух при невеликих за довжиною циклових переміщеннях, або ж при змінному профілі дороги, або змінних дорожніх умовах. Нажаль, такі теоретичні дослідження поки що не знайшли експериментального підтвердження, особливо на автомобільній техніці сучасного рівня.

Натомість, у працях недавнього періоду встановлено, що легкові автомобілі характеризуються деякими граничними характеристиками, які обмежують ефективне перетворення ними енергії при нерівномірному русі [7]. Досліджено також, що в нерівномірному русі об'єктів не враховується ресурс збереження енергії шляхом використання її запасів, створених не з допомогою штучних засобів (маховиків, акумуляторів), а природно – розгоном до вищої швидкості [8]. Для рівномірного руху об'єкта також витрачається енергія на стабілізацію його швидкості, яка у відносній системі координат знижується через опір рухові [9]. Таким чином, якщо рівнодійна сил зовнішнього опору руху є сталою за напрямом і модулем, то нагромаджена на стадії розгону кінетична енергія витрачається під час наступної стадії вільного кочення для подолання цього опору. Далі цикл руху повторюється. Таким чином, у будь-якому неідеалізованому випадку виникає коливний рух, який можна поставити в один ряд за аналогією з енергією, що передається змінним струмом, який, як відомо, при певних обставинах є економнішим, ніж постійний. Деякі дослідники навіть практично втілили такі мехатронні системи, які з використанням вказаних переваг нерівномірного руху стають енергетично досконалішими [10].

Для розроблення моделі оптимального керування транспортним засобом при відомих, або частково відомих обмеженнях на його фазову траєкторію (залежність швидкості від переміщення) використовують методи дискретної оптимізації, зокрема найбільш придатним для даної мети є принцип оптимальності Понтрягіна [11]. Однак, в умовах, коли кінці фазової траєкторії є незакріпленими, або частково закріпленими, то розв'язок диференціальних рівнянь, що походять з даного принципу, може бути нестійким. Тому така модель може бути тільки концептуальною, а її уточнення потрібно виконувати емпіричним шляхом через експерименти.

**Формулювання задачі.** Для розроблення концепції циклічного руху сформульована така теоретична задача. На горизонтальній прямолінійній дорозі маршруту (наприклад, автомагістралі) автомобіль можна з достатньою точністю розглядати як матеріальну точку, рівняння руху якого:

$$m\ddot{x} = P_k(t) - P_o - P_w(\dot{x}), \quad (1)$$

де  $m$  – маса автомобіля, приведена до центру мас, кг;  $x$  – поточна координата автомобіля, м;  $P_k(t)$  – керована рушійна сила на провідних колесах, Н;  $P_o$  – сила опору руху, пов'язана з деформацією рушіїв і дорожнього полотна (стала величина), Н;  $P_w(\dot{x})$  – сила опору потоку повітря, Н.

Якщо дорожні умови з достатньою точністю визначені бортовою телеметричною системою автомобіля на деяку відстань  $S$  наперед, то рівняння (1) можна записати, використавши умовні величини, так:

$$\ddot{x} = u(t) - f_o - f_w \dot{x}^2, \quad (2)$$

де  $u(t)$  – відносна величина, або ж рушійна сила, віднесена до одиниці повної маси автопоїзда;  $f_o$ ,  $f_w$  – сталі величини, що відображають питомий на одиницю маси автомобіля відносний опір руху, який поділяють на, відповідно, залежний від профілю дороги, залежний від швидкості руху автопоїзда, залежний від потоку повітря.

Потрібно знайти оптимальну за критерієм мінімальних енергетичних витрат функцію  $P_k(t)$  керування рухом автопоїзда. На відміну від відомих моделей, тут приймалося, що під час транспортного циклу енергія не розсіюється на вимушене зниження швидкості, тобто не витрачається на гальмування. Це зниження відбувається за рахунок втрат на опір руху. Тому вираз для критерію запишемо так:

$$E = \int_{t_o}^T P_k(t) \dot{x} dt \rightarrow \min, \quad (3)$$

де  $t_o$ ,  $T$  – час початку і завершення циклу.

На міжміських сполученнях відстань з відомими дорожніми умовами  $S$  є значно меншою, ніж довжина маршруту автомобіля  $S_m$ , тому кінцевий час  $T$  циклу є невідомим, а інтеграл у виразі (3) має рухому праву межу. Маршрут можна поділити на ділянки так, щоб загальна програма руху на магістралі  $u(x)$ ,  $x=0\dots S_m$ , що складається з часткових оптимальних програм  $u(x_j)$ ,  $j=x_{j,0}\dots S_j$ , була також оптимальною. У цій задачі потрібно забезпечити такий розклад руху автомобіля, щоб при  $x_0(t)=0$ ,  $x_0(T)=S$ , де  $x=x_0\dots S_m$  – шлях;  $T$  – граничний час виконання маршруту довжиною  $S_m$ , прибути в кінцевий пункт з мінімальною витратою енергії. Нові змінні:  $x_1(t)=x(t)$ ,  $x_2(t)=\dot{x}(t)$ . Функція мети:

$$E = \int_{t_0}^T u(t)x_2 dt \rightarrow \min, \quad (4)$$

а система спряжених рівнянь:

$$\begin{cases} \dot{x}_2(t) = u(t) - f_o - f_w x_2^2, \\ x_2(t) = \dot{x}_1(t) \end{cases}, \quad (5)$$

Потрібно знайти фазову траєкторію  $x_2 = F(x_1(t))$ , а також програму керування  $u(t)$  з обмеженнями:

$x_1(t_0) = 0$ ;  $x_2(t_0) = V_0$  – лівий кінець фазової траєкторії є закріплений;

$x_1(T) \geq S$  – впливає з умов дотримання розкладу руху, тобто, якщо на будь-якій ділянці довжиною  $S$  граничний час її проходження не витримується, то розклад є недотриманий в цілому;

$x_2(t) \leq V_{\max}$  – обмеження максимальної швидкості з умов безпеки руху;

$u(t) \leq u_{\max}$  – обмеження за потужністю транспортного засобу.

**Методика розв'язування.** Розв'язок такої локальної задачі можна знайти методами варіаційного числення, зокрема, використовуючи принцип максимуму Понтрягіна при умові, що рівняння системи (5) – диференційовані по змінних  $x_1, x_2$ , а також, щоб відповідна функція Гамільтона досягала максимуму на інтервалі  $[t_0; T]$ . Раніше таку задачу було розв'язано для ділянки маршруту, де опір руху є сталим, а кінці фазової траєкторії – закріплені [12]. Принцип максимуму є достатнім при побудові фазової траєкторії, якщо обидва її кінці є закріплені. В цих дослідженнях правий кінець фазової траєкторії – рухомий. Крім того, система рівнянь (5) є нелінійною і може не мати стійких розв'язків. В зв'язку з цим було застосовано редукцію початкової задачі (4), (5) до кінцево-вимірної задачі математичного програмування:

$$\sum_{i=0}^{N-1} u^i (t_{i+1} - t_i) x_2^i \rightarrow \min, \quad (6)$$

де  $i$  – номер ділянки, на які була поділена відстань  $S$ ; із системою спряжених рівнянь:

$$\begin{cases} \frac{x_2^{i+1} - x_2^i}{t_{i+1} - t_i} = u^i - f_o^i - f_w (x_2^i)^2 \\ \frac{x_2^{i+1} - x_2^i}{t_{i+1} - t_i} = x_2^{i+1} \end{cases}, \quad (7)$$

та обмеженнями:

$$x_2^0 = V_0; x_1^0 = 0; x_2^i \leq V_{\max}, i = 0, 1, \dots, N; u^i \leq u_{\max}; x_1^N \geq S, \quad (8)$$

звідки отримуємо:

$$x_2^{i+1} = \left( u^i - f_o^i - f_w (x_2^i)^2 \right) (t_{i+1} - t_i) + x_2^i, \quad (9)$$

$$\text{та } x_1^{i+1} = x_2^{i+1} (t_{i+1} - t_i) + x_1^i, \quad (10)$$

Змінними нової задачі математичного програмування є  $x_1^i, i = 1, \dots, N$  та  $u^i, i = 0, \dots, N-1$ .

Застосувавши комп'ютерні засоби розв'язання задачі математичного нелінійного програмування (пакет Solver в електронних таблицях Excel), знайдено оптимальний закон керування для таких початкових умов: початкова / мінімальна швидкість циклу  $V_0 = 14$  м/с; коефіцієнт відносного опору кочення  $f_o = 0,0015$ ; коефіцієнт відносного опору повітря  $f_w = 0,0008$ ; максимальна дозволена швидкість  $V_{\max} = 25$  м/с. Оптимальна фазова траєкторія показана на рис. 1.

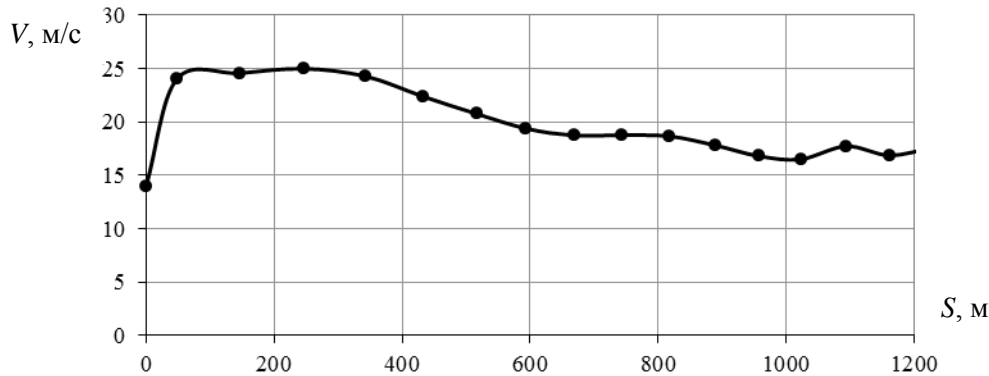


Рис. 1. Оптимальна фазова траєкторія, отримана при розв'язанні моделі

Відповідний цій траєкторії закон оптимального за енергоощадністю показано на рис.2.

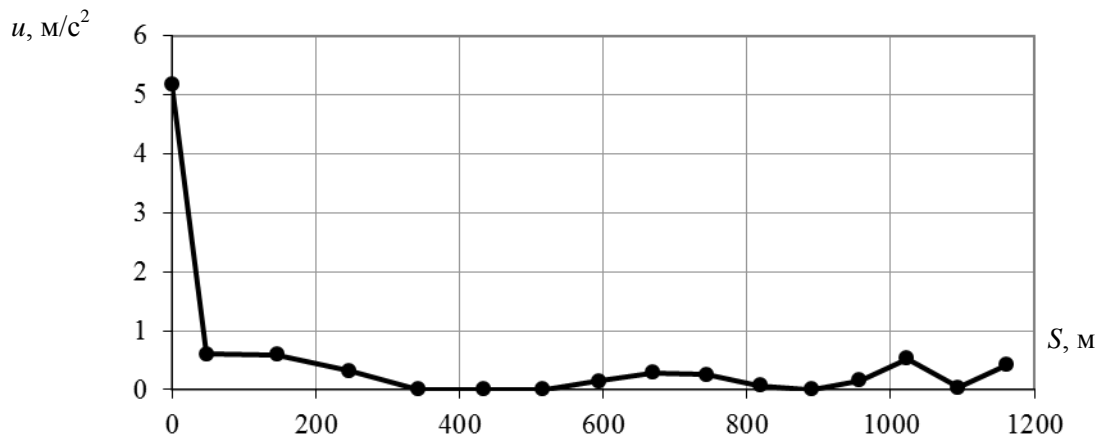


Рис. 2. Оптимальний закон керування

Як видно з рис. 1, 2, на прямолінійній горизонтальній ділянці дороги оптимальне керування – це імпульсний режим, тобто такий, при якому рушійна сила (привід силових агрегатів) автомобіля вмикається лише для досягнення номінального режиму, у даному випадку такого, при якому досягається максимальна дозволена швидкість. Після досягнення цього режиму привід вимикається і швидкість автомобіля знижується до мінімальної – 14 м/с. Зауважимо, що розгін автомобіля здійснюється при теоретично можливому максимальному значенні відносної рушійної сили  $u_{\max} = 5,2$  м/с<sup>2</sup>. Співвідношення тривалості розгону до тривалості циклу – 0,08. В реальних умовах таке можна реалізувати лише при певних динамічних характеристиках автомобіля. Ділянка вільного кочення до мінімальної швидкості – 1232 м. Тривалість такого оптимального циклу становить 62 с, тобто середня швидкість об'єкта – 19,87 м/с.

Для того, щоб перевірити таке твердження на основі концептуальної моделі (4), (5), було проведено експерименти. Експериментальні дослідження проводились на замиській дорозі М11 у Львівській області в напрямку Львів-Городок, з сухим рівним покриттям, в хорошому технічному стані. За параметрами вона – 2-го класу. Ділянка її, на якій проводились дослідження, проходить по горизонтальній місцевості, не має перетинів з іншими дорогами, піших переходів, зон з обмеженою видимістю, мостів, звужень. Дослідження проводились в час найменшої інтенсивності руху (неділя, 8<sup>00</sup>-9<sup>00</sup>), яка не досягала 5 автомобілів/год. Видимість шляху була доброю. Дослідження проводились на автомобілі ДЕУ Сенс, об'єм двигуна 1,4 л, 2007 р. в. із загальним пробігом 70 тис. км. Автомобіль був у справному стані. В салоні автомобіля перебували двоє осіб: водій і пасажир на передньому сидінні. Вимірювання тривалості циклів виконувалось з допомогою електронного секундоміра і контролювалось з допомогою відеореєстратора DOD GSE 550, яким також визначалась миттєва швидкість та пройдений шлях. Параметри роботи двигуна реєструвались в режимі реального часу з допомогою пристрою Сканматік-1, підключеного через діагностичний роз'єм і адаптер DB25 до ПК, і відповідного програмного забезпечення. Записувалась зміна з часом: шляхової витрати палива, миттєвої швидкості автомобіля, частоти обертання к. в. Застосовувались такі режими руху: 1) розгін від початкової швидкості 50 км/год. до, відповідно, 70, 80 та 90 км/год. з мінімальним прискоренням (мінімальна допустима частота обертання к. в. при даній швидкості) на прямій передачі трансмісії; далі – вільне кочення з вимкненою передачею до досягнення початкової швидкості; 2) такі ж цикли розгін – вільне кочення, однак – з максимальним прискоренням (дросельна заслінка – максимально відкрита); 3) рівномірний рух з середньою швидкістю 75,7 км/год. (21,1 м/с), двигун працює в частковому режимі (дросельна заслінка відкрита неповністю). Кожен дослід повторено тричі в прямому і зворотному напрямку дороги. Приклад осцилограми, записаної приладом Сканматік, подано на рис. 3.

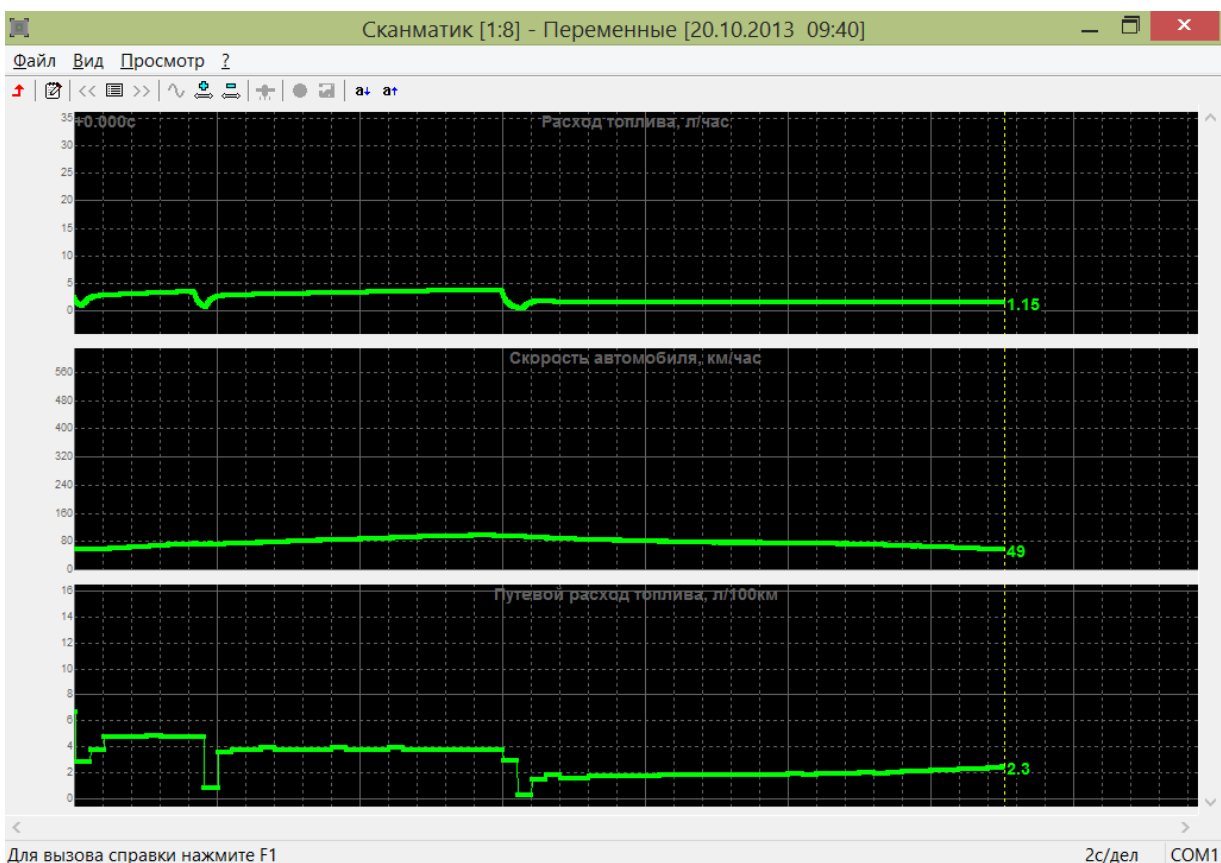


Рис. 3. Приклад осцилограм Сканматік для циклу розгін 50 - 90 км/год. – вільне кочення

Експерименти проводились при різній максимально досяжній швидкості, однак довжина переміщення автомобіля була сталою –  $1200 \pm 60$  м.

Дані записаних файлів осцилограм було оцифровано. Після цього проведено обробку табличних даних з допомогою електронних таблиць Excel, та виконано порівняння отриманих циклів з однорідними за середньою технічною швидкістю на заданій ділянці дороги. В результаті

було доведено, що найкраще практичні результати узгоджуються з моделюванням при умові максимально інтенсивного розгону до найбільшої можливої з максимальних швидкостей (70 км/год. – в даному випадку). Приклад експериментальних даних, при яких досягнуто максимального сподіваного ефекту з економії палива з розгоном 50-90 км/год., подано на рис. 4.

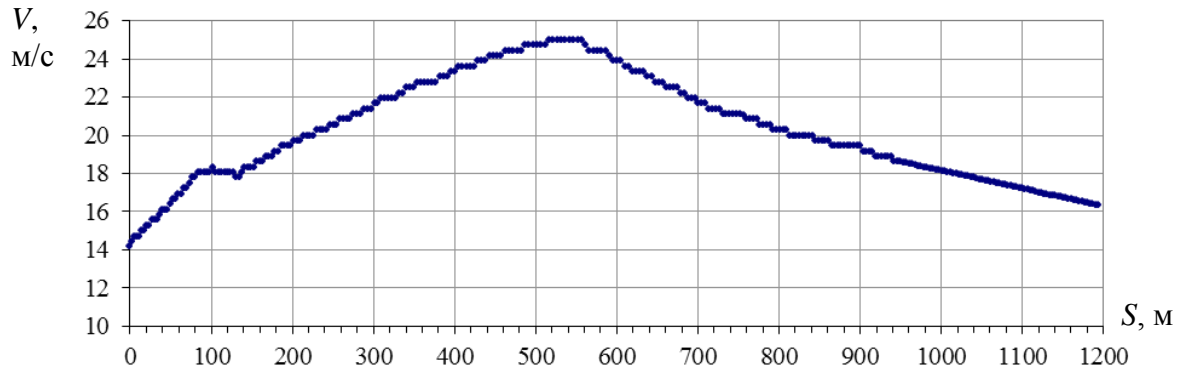


Рис. 4. Експериментальна залежність швидкості автомобіля при коливному

Шляхова витрата палива, виміряна приладом Сканмагік-1 при цьому ж експерименті подана на рис.5.

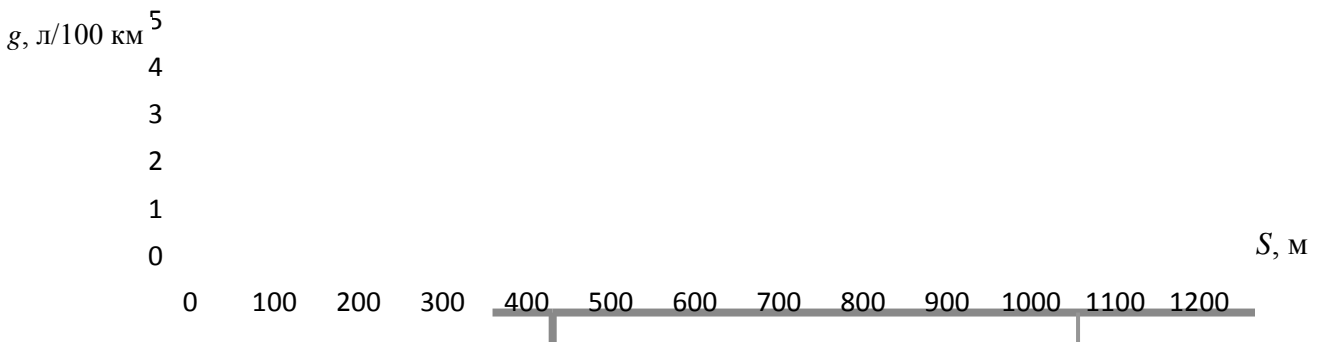


Рис. 5. Шляхова витрата палива при коливному циклічному русі

Шляхом інтегрування кривої на рис. 5, та інших залежностей встановлено такі результати експериментів (табл. 1).

Таблиця 1

**Зведені експериментальні дані про цикли руху автомобіля**

№ експерименту	Максимальна швидкість циклу, км/год.	Мінімальна швидкість циклу, км/год.	Пробіг за цикл, м	Тривалість циклу, с	Середня швидкість циклу, км/год.	Співвідношення тривалість розгону / тривалість циклу	Сумарна витрата палива, л
1	90	50	1193,3	59,8	71,7	0,31	0,0316
2	80	50	1210,0	65	60,6	0,37	0,0300
3	70	50	1109	56	71,0	0,42	0,0293
4	76	75,5	1183	56,2	75,75	0,0	0,0440

Як видно з таблиці, експерименти № 1, 2, 3 показують, що циклічний коливний рух автомобіля є ошаднішим, за витратою палива, ніж режим сталого руху, проте він поступається середньою швидкістю руху. Найбільша економія спостерігається в тих коливних режимах, де максимальна швидкість не значно перевищує швидкість вільного кочення. Однак, порівнюючи показник співвідношення тривалість розгону / тривалість циклу, можна побачити, що для найощаднішого режиму №3 він є найбільшим. Це означає, що велика інтенсивність розгону є негативним фактором у енергоощадності автомобіля, якщо брати до уваги відомий з практики факт [4].

**Висновки.** В результаті побудови теоретичної моделі оптимальної за енергоощадністю програми руху автомобіля по горизонтальній прямолінійній дорозі, при умові дотримання графіка руху, а також після верифікації моделі за низкою проведених експериментів встановлено, що цикл руху "розгін - вільне кочення" є більш ощадним, ніж рівномірний рух. Оптимальна програма руху вздовж горизонтальної, прямолінійної магістралі може складатися з множини таких циклів, від чого програма руху буде нерівномірною – коливною. Для того, щоб вибрати параметри цієї програми, потрібно виконати прогнозування очікуваних дорожніх умов. Згідно з моделлю (2) для цього достатньо обчислити відносні величини  $u(t)$ ,  $f_0$ ,  $f_w$ , які стосуються руху інших автомобілів по тій самій дорозі з незначним випередженням часу. Це спрощує реалізацію системи автоматизованого керування дорожнім рухом, оскільки позбавляє необхідності вимірювати фізичні величини, такі як абсолютні коефіцієнти дорожнього опору, вітрового опору, крутний момент на ведучих колесах, які на даний час не мають належного метрологічного забезпечення. Для реалізації режимів потрібно вимірювання прискорень та крутних моментів на провідних колесах.

Подальші експерименти мають стосуватись інших дорожніх і транспортних умов, а також видозмін транспортних циклів. Також проведені і описані у цій статті дослідження дають змогу розвивати теорію оптимізації транспортних систем за критерієм мінімуму часових затримок доставки вантажів, або пасажирів.

### Література

1. Давідіч Ю. О. Розробка графіка руху транспортних засобів при організації вантажних перевезень: навч. посіб. / Ю. О. Давідіч; Харк. нац. акад. міськ. госп-ва. – Х.: ХНАМГ, 2010. – 345 с.
2. Процишин О. С. Дослідження миттєвих швидкостей руху у транспортному потоці / О. С. Процишин // Наукові нотатки. - 2014. - Вип. 45. - С. 448-452. - Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nn\\_2014\\_45\\_72](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nn_2014_45_72).
3. Беленький А. С. Применение моделей и методов теории расписаний в задачах оптимального планирования на грузовом транспорте / А. С. Беленький, Е. В. Левнер // Автоматика и телемеханика. – 1989. – №1. – С. 3-77.
4. Котиков Ю. Г. Транспортная энергетика / Ю. Г. Котиков, В. Н. Ложкин. – М., ИЦ "Академия", 2006. – 272 с.
5. Говорущенко Н. Я. Экономия топлива и снижение токсичности на автомобильном транспорте. / Н. Я. Говорущенко. – М.: Транспорт, 1990. – 135 с.
6. Гащук П. М. Энергетическая эффективность автомобиля / П. Н. Гащук – Львов: Свит, 1992. – 208 с.
7. Абрамов Д. В. Предельные динамические показатели переднеприводных легковых автомобилей с учетом подъемной аэродинамической силы / Д.В. Абрамов // Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті. Науковий журнал. – Луцьк: Луцький НТУ, 2015. – № 1 (3). – С. 10–15.
8. Kenneth J. Modeling Tools for Predicting the Impact of Rolling Resistance on Energy Usage and Fuel Efficiency for Realistic Driving Cycles. In: Kelly International Tire Exhibition and Conference. 2002. Available at: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.8.2811&rep=rep1&type=pdf>
9. Liudvinavičius Lioginas & Lingaitis P. L. Locomotive kinetic energy management. Transport problems. 2011. Volume 6. Issue 3. P. 135-142.
10. Способ Петросова для рекуперации энергии у автомобилей. Патент Российской Федерации RU2119434.
11. Понтрягин Л.С. Принцип максимума в оптимальном управлении. – М.: Едиториал УРСС, 2004. – 64 с.
12. Oliskeytych M. Modelling of complex highway automated control system as tool for reducing fuel consumption and emission in heavy-duty trucks. Energetic and ecological aspects of agricultural production. Chapter 5. – Warsaw Un. of Life Sciences. – Warsaw, – 2010. – p.48-58.
13. Кравченко О.П. Щодо визначення довжини черги вантажних автомобілів при обслуговуванні навантажувальних бункерів безперервних виробництв / О. П. Кравченко, К. К. Панайотов // Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті. - 2014. - № 2. - С. 73-78. - Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/ctmbt\\_2014\\_2\\_13](http://nbuv.gov.ua/UJRN/ctmbt_2014_2_13).

Стаття надійшла до редакції 04.05.2016