

УДК 622.62

© В.В. Кравець, К.А. Зіборов, К.М. Бас, В.В. Кривда, С.О. Федоряченко

## МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ СКЛАДОВИХ СИЛОВОЇ УСТАНОВКИ ГІБРИДНОГО ТРАНСПОРТНОГО ЗАСОБУ

© V. Kravets, K. Ziborov, K. Bass, V. Krivda, O. Fedoriachenko

## MATHEMATICAL MODELS OF THE COMPONENT POWER SUPPLY OF HYBRID VEHICLE

**Мета** Розроблення математичного опису двигуна внутрішнього згоряння для задач проектування силової установки гібридного транспортного засобу. Описання двигуна внутрішнього згоряння в динаміці як аперіодичну ланку з нелінійним коефіцієнтом підсилення, який визначається особливостями фізичних процесів робочого тіла в поршні, та енергетичні характеристики двигуна внутрішнього згоряння. Дослідження щодо надійності гібридного автомобіля як складної технічної системи на скінченій кількості структурних елементів. Розроблення алгоритму кількісної та якісної оцінки надійності, використовуючи введені ланкові діаграми станів і відповідні матриці станів, матриці значимості структурних елементів.

**Методика дослідження** полягає у огляді та систематизації досвіду математичного опису двигунів відомих електричних транспортних засобів, опису підсистеми динаміки колінчастого валу, розрахунку зовнішньої швидкісної характеристики, та теоретичного обґрунтування нової методики математичного опису двигуна внутрішнього згоряння гібридів.

**Результати дослідження.** Надано класифікацію електричних транспортних засобів, та гібридів, Отриманий математичний опис двигуна внутрішнього згоряння для задач проектування силової установки гібридного транспортного засобу, Отримано математичний опис годографу руху автомобіля за довільною траєкторією. Дослідження щодо надійності гібридного автомобіля як складної технічної системи на скінченій кількості структурних елементів запропоновано проводити на основі розроблених матричних методів, які дозволяють ефективно застосовувати сучасні комп'ютерні технології.

Розроблено алгоритми кількісної та якісної оцінки надійності, використовуючи введені ланкові діаграми станів і відповідні матриці станів, матриці значимості структурних елементів, матриці чутливості надійності системи до варіацій надійності структурних елементів.

**Наукова новизна** запропоновані математична опис двигуна внутрішнього згоряння для задач проектування силової установки гібридного транспортного засобу.

**Практичне значення.** Розроблена методика дозволяє з достатньою точністю обґрунтувати доцільність переходу на новий системний підхід математичного опису двигуна внутрішнього згоряння для задач проектування силової установки гібридного транспортного засобу.

**Ключові слова:** електричний транспорт, гібрид, математичний опис динаміки двигуна.

**Вступ.** До складу силової установки гібридного транспортного засобу (ГТЗ) входять: двигун внутрішнього згоряння, електричний двигун/генератор, накопичувач електроенергії, силовий електричний перетворювач. Електричні двигуни традиційної конструкції та силові перетворювальні пристрої добре описані і не потребують наукових досліджень. Увагу слід приділити математичному опису двигунів внутрішнього згоряння, зокрема, особливостям його роботи в складі комбінованої силової установки. Також, для синтезу оптимальної

конфігурації приводу ГТЗ слід надати математичний опис гальванічного накопичувача енергії.

### **Математичний опис динаміки двигуна внутрішнього згоряння Конструктивні особливості двигуна внутрішнього згоряння**

**Вступ.** Двигуни внутрішнього згоряння (ДВЗ) належать до найбільш поширеного типу теплових двигунів, тобто таких двигунів, в яких теплота, що виділяється при згорянні палива, перетворюється в механічну енергію. У двигунах внутрішнього згоряння процеси згоряння палива, виділення теплоти і перетворення її в механічну роботу відбуваються безпосередньо всередині двигуна. До таких двигунів, зокрема, відносяться поршневі двигуни [1]. В теперішній час двигун внутрішнього згоряння є основним видом автомобільного двигуна.

#### Позитивні якості:

- може бути з'єднаний практично з будь-яким механізмом ;
- відносно невелика вартість і вага;
- компактність;

#### Недоліки:

- високий рівень шуму;
- висока частота колінчастого вала при пуску і неможливість прямого з'єднання з ведучими колесами;
- токсичність вихлопів ;
- зворотно-поступальний рух поршня , пов'язаний з роботою кривошипно-шатунного механізму , що ускладнює пристрій і обмежує можливість підвищення частоти обертання , особливо при збільшенні розмірів двигуна;
- при роботі ДВЗ тільки 20 % палива витрачається на корисну роботу , тобто на рух автомобіля , а інші 80% , згораючи , зігрівають навколишнє середовище.

На рисунку 1 показана схема ДВЗ. Педаль механічно з'єднана з дросельної заслінкою. У цьому випадку водій контролює положення дросельної заслінки і, таким чином, кількість повітря, що надходить у двигун. У загальному випадку момент двигуна внутрішнього згоряння безпосередньо залежить від цього параметра.

Передові технології ДВЗ в даний час були розроблені для підвищення економічності двигуна і зменшення викидів , але цього не достатньо. Більшість цих технічних рішень можуть бути розділені на дві категорії. Перша категорія - системи , що відводять момент від приводу ведучих коліс за частину циклу роботи теплового приводу. Такий тип систем двигуна внутрішнього згоряння включає в себе додаткове обладнання двигуна (датчик кисню і т.д.), а також гібридні технології ДВЗ.

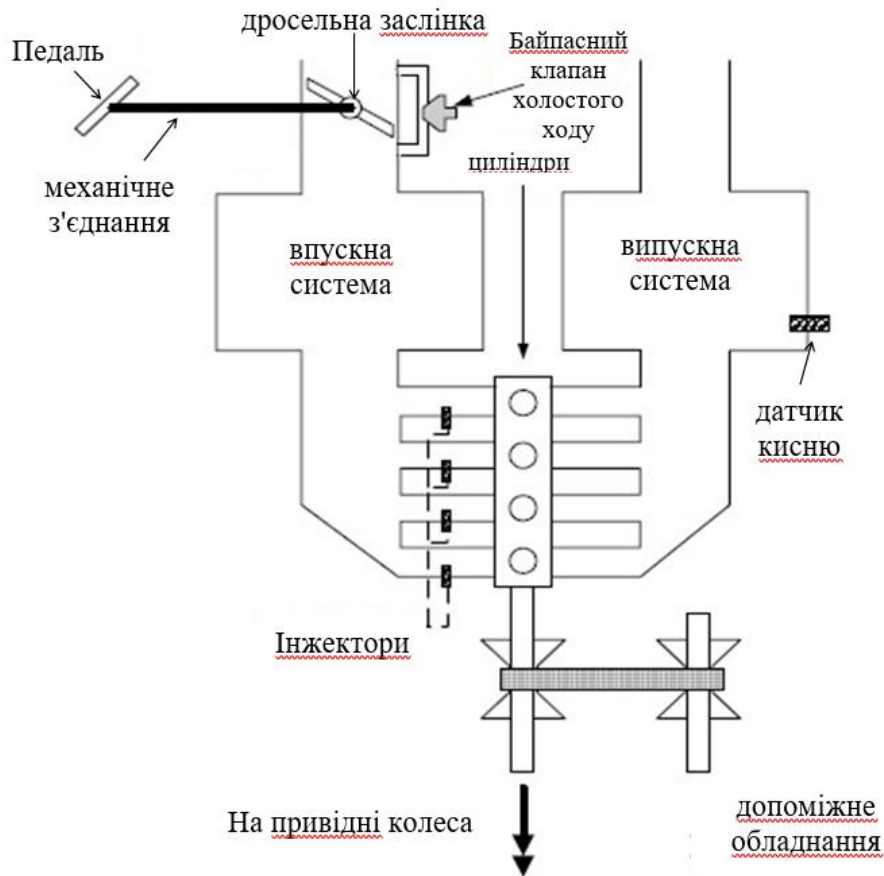


Рис. 1. Схема двигуна внутрішнього згоряння

Другий тип – системи, які змінюють одержуваний момент ДВЗ, для одного і того ж повітряного потоку, що тече через дросельну заслінку, протягом частини циклу роботи ДВЗ. Цей тип систем ДВЗ включає змінний час підготовки робочого тіла двигуна і технологію збіднення паливної суміші для займання. Коли використовується механічна дросельна заслінка, будь-які функції ДВЗ, які відводять момент від теплового приводу або змінюють момент протягом частини циклу роботи ДВЗ негативно впливають на характеристики транспортного засобу [1, 2].

Побудова моделі ДВЗ проводиться відповідно до рівнянь, що описують процеси в двигуні. Математична модель теплового двигуна включає підсистему динаміки робочого тіла, а також підсистему динаміки колінчастого валу.

#### Опис динаміки робочого тіла

Кількість повітряних мас, що надходить у впускну систему  $m_a$  є функцією тиску в цій системі  $p_m$  і кута положення дросельної заслінки  $\theta$  [3]:

$$m_a' = f(\theta) \cdot g(p_m). \quad (1)$$

Кожна зі складових цього рівняння може бути представлена в наступному вигляді:

$$f(\theta) = k_{th0} + k_{th1} \cdot \theta + k_{th2} \cdot \theta^2 + k_{th3} \cdot \theta^3, \quad (2)$$

$$g(p_m) = \begin{cases} 1, & p_m \leq 0.5 \cdot p_{atm} \\ \frac{2}{p_{atm}} \cdot \sqrt{p_{atm} \cdot p_m - p_m^2}, & p_m > 0.5 \cdot p_{atm} \end{cases} \quad (3)$$

де:  $k_{th0 \dots 3}$  – постійні рівняння;  $\theta$  – кут положення дросельної заслінки;  $p_{atm}$  – атмосферний тиск;  $p_m$  – тиск у впускній системі.

Динаміка робочого тіла у впускній системі може бути описана диференціальним рівнянням першого порядку:

$$p_m' = \frac{R \cdot T_m}{V_m} \cdot (m_{ai}' - m_{ao}') \quad (4)$$

де:  $R$  – газова постійна;  $V_m$  – об'єм впускної системи;  $T_m$  – температура у впускній системі.

Повітряний потік, що надходить в циліндри з впускної системи,  $m_{ao}'$  є функцією тиску у впускній системі  $p_m$  і швидкості  $n$  двигуна внутрішнього згорання:

$$m_{ao}' = k_{mo0} + k_{mo1} \cdot n \cdot p_m + k_{mo2} \cdot n \cdot p_m^2 + k_{mo3} \cdot n^2 \cdot p_m \quad (5)$$

де:  $k_{mo0 \dots 3}$  – постійні рівняння;  $n$  – швидкість двигуна.

Структурна схема, що відповідає рівнянням (1) – (4), представлена на рис. 2.

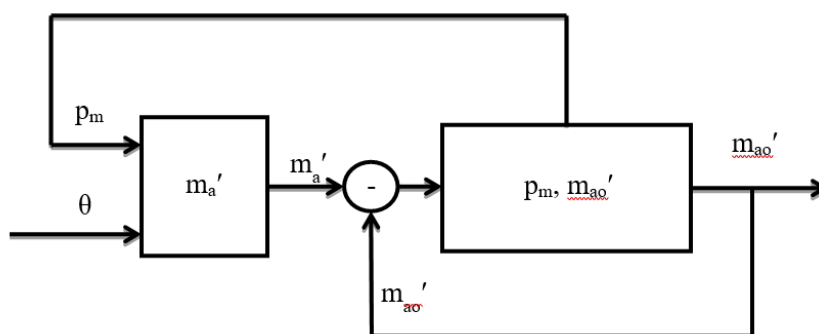


Рис. 2. Структурная схема впускной системы ДВЗ

### Опис підсистеми динаміки колінчастого валу

Рівняння швидкості колінчастого валу виглядає наступним чином:

$$J \cdot n' = T_{eng} - T_l \quad (5)$$

де:  $T_{eng}$  – момент, що розвивається ДВЗ;  $T_l$  – момент опору;  $J$  – момент інерції ДВЗ.

Момент двигуна внутрішнього згорання може бути описаний наступною емпіричною функцією [3]:

$$T_{eng} = k_{e0} + k_{e1} \cdot m_a + k_{e2} \cdot (AFR) + k_{e3} \cdot (AFR)^2 + k_{e4} \cdot \sigma + k_{e5} \cdot \sigma^2 + k_{e6} \cdot \sigma^3 + k_{e7} \cdot n^2 + k_{e8} \cdot n \cdot \sigma + k_{e9} \cdot \sigma \cdot m_a + k_{e10} \cdot \sigma^2 \cdot m_a \quad (6)$$

де:  $k_{e0 \dots 10}$  – постійні рівняння;  $m_a$  – кількість робочого тіла в циліндрі;  $AFR$  – співвідношення повітря / паливо;  $\sigma$  – випередження запалювання.

Змінна  $m_a$  – це повітряні маси, що надходять в циліндри протягом впуску, який відбувається в перші  $\pi$  радіан чотирьох тактів обертання колінчастого валу. Таким чином, в моделі,  $m_a$  може бути отримана інтегруванням повітряних мас, що рухаються від впускної системи, і скиданням інтегратора в кінці кож-

ного такту. Час скидання інтегратора є змінною величиною, яка залежить від швидкості обертання колінчастого валу. Відомо, що в реальному двигуні існує часова затримка між впусканням робочого тіла і отриманням моменту, тому в модель може бути включено запізнювання, що дорівнює відношенню  $\pi$  до швидкості обертання колінчастого валу [4].

Проте, інтегратор з перемінним часом скидання може бути наближено апроксимований наступним виразом:

$$m_a = \frac{m_{ao} \cdot \pi}{n} \quad (7)$$

де:  $m_a$  – повітряні маси надходять в циліндр, г;  $m_{ao}$  – повітряні маси, поточні з впускної системи, г/с;

Структурна схема, побудована на основі рівнянь роботи ДВЗ, показана на рисунку нижче. З структурної схеми видно, що модель двигуна внутрішнього згоряння складна і нелінійна.

### Моделювання роботи ДВЗ і побудова зовнішньої швидкісної характеристики двигуна

Для моделювання роботи ДВЗ необхідно розрахувати зовнішню швидкісну характеристику двигуна. Зовнішня характеристика двигуна являє собою залежність ефективної потужності, моменту і інших показників роботи двигуна від частоти обертання колінчастого валу при повністю відкритій дросельній заслінки у бензинового двигуна. Структурна схема двигуна внутрішнього згоряння представлена на рисунку 3.

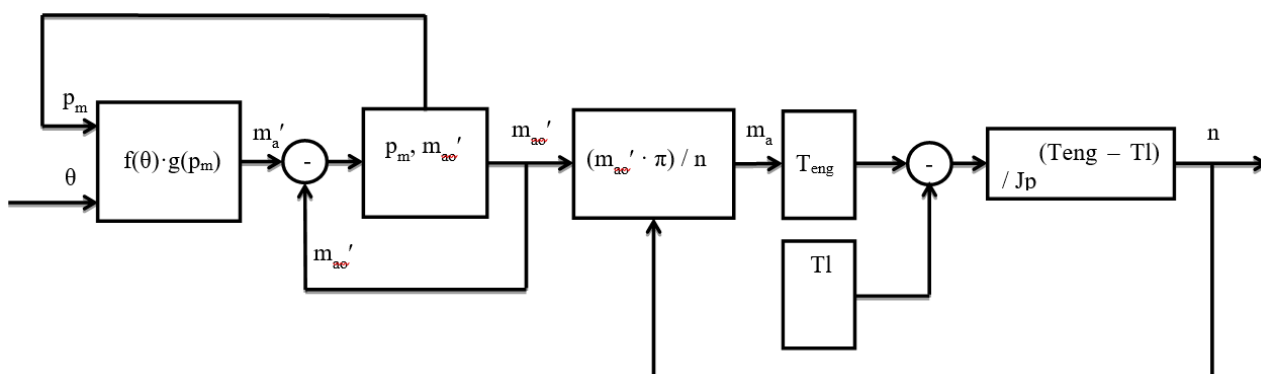


Рис. 3. Структурна схема двигуна внутрішнього згоряння

Для побудови зовнішньої характеристики двигуна може бути використаний будь-який відомий емпіричний вираз [4].

Приймаючи декілька довільних значень частоти обертання, можна розрахувати значення ефективної потужності двигуна при цих різних значеннях частоти обертання, тобто отримати кілька точок характеристики. Рекомендується при розрахунку і побудові зовнішньої швидкісної характеристики (а також і при виконанні в подальшому тягового розрахунку) вибирати значення частоти обертання колінчастого валу двигуна не менш ніж у восьми точках. Серед цих точок обов'язково повинні бути присутніми:

- мінімальна стійка частота обертання, яку можна прийняти рівною 800...1000 об/хв для бензинових двигунів;
- номінальна частота обертання, відповідна максимальній потужності двигуна;
- частота обертання, відповідна максимальній швидкості автомобіля;
- частота обертання, відповідна максимальному моменту двигуна.

Значення коефіцієнтів  $a$ ,  $b$ ,  $c$ , що входять у формулу Лейдермана, змінюються в залежності від типу і параметрів конкретного двигуна. Ці значення дають досить гарний збіг форми розрахункової зовнішньої швидкісної характеристики з експериментальною для багатьох існуючих двигунів.

У загальному випадку значення коефіцієнтів  $a$ ,  $b$  і  $c$  залежить від співвідношення частоти обертання при максимальній потужності (номінальний) і частоти обертання при максимальному моменті [5].

Ефективну потужність можна розрахувати за наступною формулою

$$N_e = N_{emax} \cdot \left[ a \cdot \frac{n}{n_N} + b \cdot \left( \frac{n}{n_N} \right)^2 - c \cdot \left( \frac{n}{n_N} \right)^3 \right], \quad (8)$$

де:  $n$  – частота обертання колінчастого валу, об / хв;  $n_n$  – номінальна частота обертання, об / хв;  $a$ ,  $b$ ,  $c$  – коефіцієнти рівняння;  $N_{emax}$  – потужність, відповідна номінальній частоті обертання, кВт.

Момент визначимо за формулою

$$M_k = 9550 \cdot \frac{N_e}{n}.$$

Розрахована зовнішня швидкісна характеристика двигуна показана на рисунку 4.

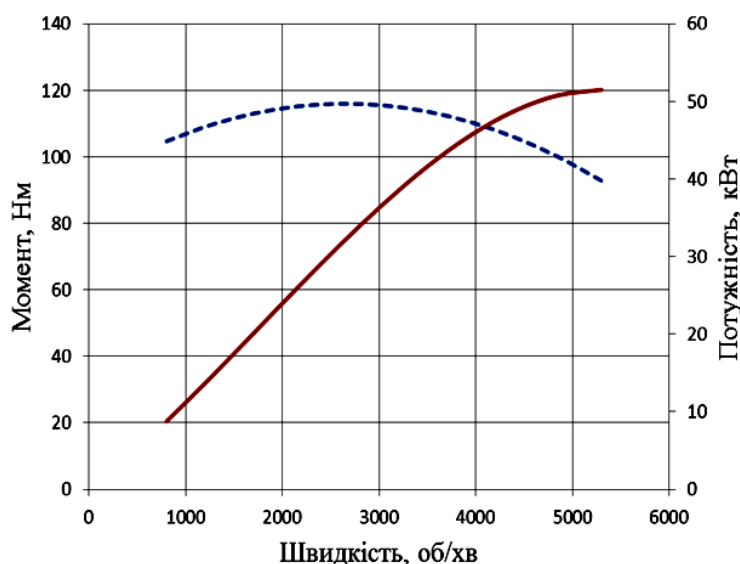


Рис. 4. Розрахункова зовнішня швидкісна характеристика двигуна

Після розрахунку зовнішньої швидкісної характеристики ДВЗ необхідно розрахувати коефіцієнти рівнянь для математичної моделі двигуна. Результати моделювання показані на рисунку 5.

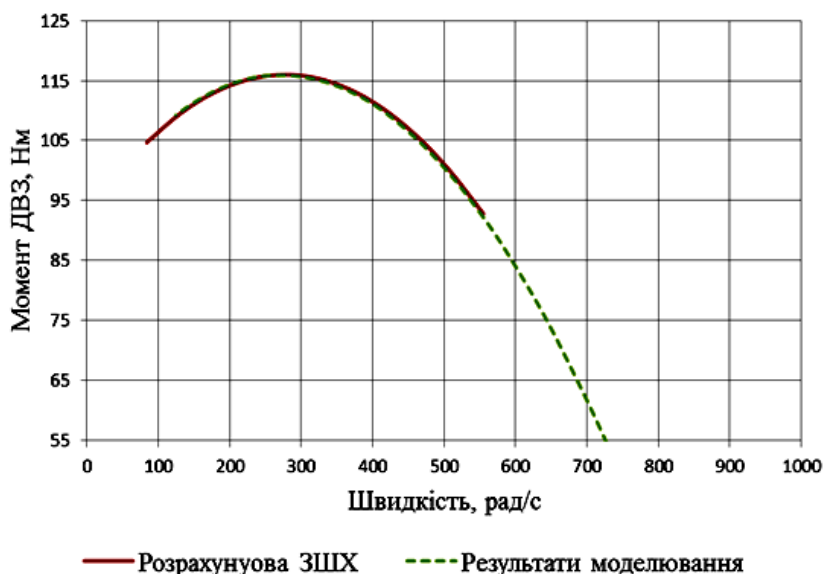


Рис. 5. Зовнішня швидкісна характеристика ДВЗ (результати моделювання)

Видно, що розрахункова характеристика і зовнішня швидкісна характеристика моделі двигуна практично ідентичні. Висновок – дану математичну модель можна використовувати для синтезу системи регулювання.

#### Енергетична модель двигуна внутрішнього згорання.

Одним з основних показників роботи ДВЗ є паливна економічність двигуна. Паливною економічністю називають сукупність властивостей, що визначають витрати палива при виконанні автомобілем транспортної роботи в різних умовах експлуатації.

Паливна економічність автомобіля в значній мірі визначається такими показниками двигуна, як годинникова витрата палива  $G_m$  кг / год – маса палива, що витрачається за одну годину і питома витрата палива  $g_e$  (г/ кВт×год) – маса палива, що витрачається за одну годину на одиницю потужності двигуна.

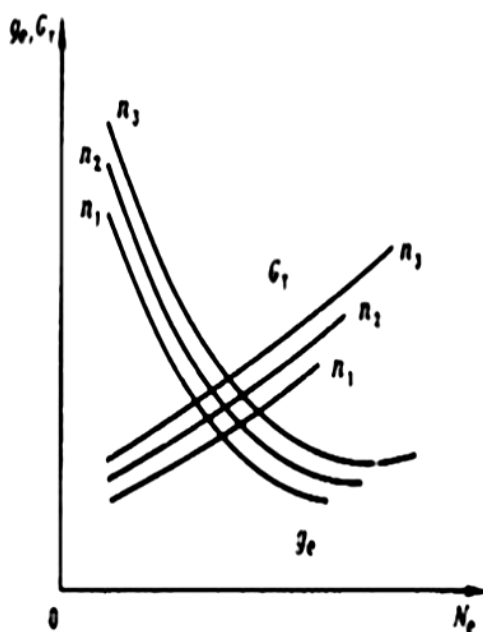


Рис. 6. Навантажувальна характеристика двигуна

Основним вимірником паливної економічності автомобіля в нашій країні і більшості європейських країн є витрата палива в літрах на 100 км пройденого шляху (шляховий витрата)  $Q_s$  л.

Вихідним графіком для визначення витрат палив  $g_e$  і  $G_m$  є навантажувальна характеристика-графіки залежностей  $G_m = f(P_e)$  і  $g_e = f(P_e)$  при  $n = \text{const}$ . Ці залежності будують для сталого режиму двигуна при тій же його комплектації, яка була прийнята для швидкісної характеристики (рис. 6) [4, 5].

Питома витрата палива пов'язаний з часовою насупним чином:

$$g_e = \frac{G_T \cdot 1000}{N_e}$$

Для розрахунку витрати  $Q_s$  іноді зручніше використовувати графік залежності  $g_e$  від коефіцієнта використання потужності двигуна. Він може бути отриманий за допомогою навантажувальної і зовнішньої характеристик двигуна (рис. 7).

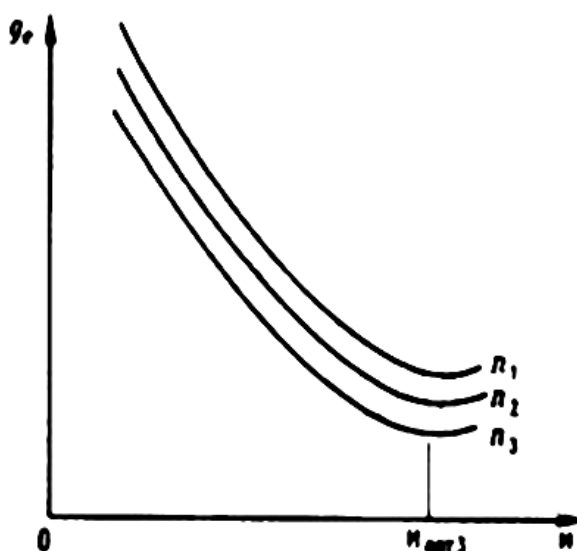


Рис. 7. Залежність питомої витрати палива від коефіцієнта використання потужності двигуна

Для кожного значення частоти  $n$  витрата  $g_e$  має мінімум при значенні  $\eta$  близькому до 100 %. При малих значеннях коефіцієнта  $\eta$  і питома витрата зростає в результаті зменшення ККД двигуна і погіршення умов згоряння палива, а при великих значеннях  $\eta$  (у карбюраторних двигунів) - у зв'язку із збагаченням горючої суміші економайзером.

Для карбюраторних двигунів при малому значенні коефіцієнта використання потужності двигуна витрата  $g_e$  збільшується порівняно з мінімальним в кілька разів, а при  $\eta = 100\%$  збільшується на 10 ... 15%.

За відсутності залежності  $g_e = f(N_e, n)$  користуються різними наближеними методами. Шліппе запропонував для визначення формулу [1]:

$$g_e = g_N \cdot k_n \cdot k_w$$

де:  $g_e$  – питома витрата палива при  $N_{\text{емакс}}$ ;  $k_n$  – коефіцієнт, що враховує залежність  $g_e = f(n)$ ;  $k_w$  – коефіцієнт, що враховує залежність  $g_e = f(\eta)$ .



Для наближеного визначення коефіцієнтів  $k_u$  і  $k_w$  можна скористатися графіками, рисунки 7-8 [6].

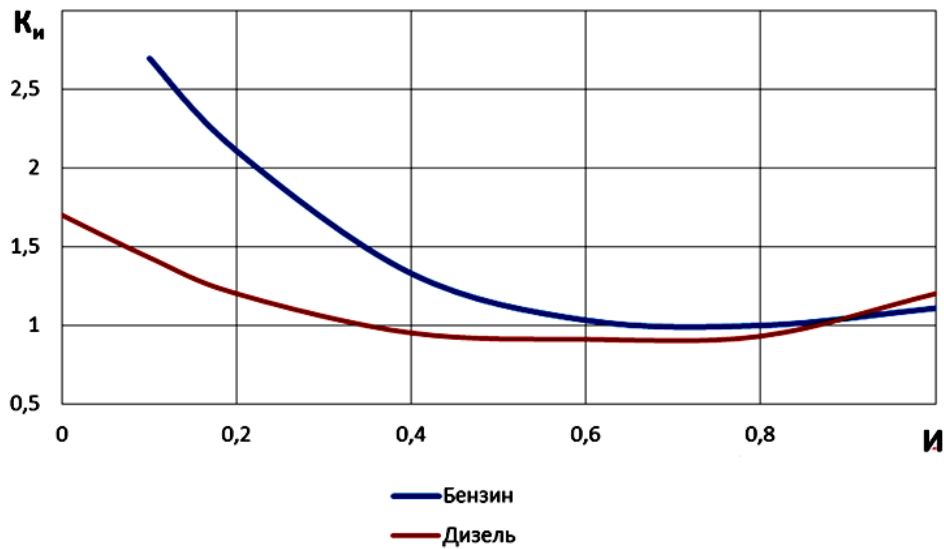


Рис. 7. Допоміжний графік для розрахунку питомої витрати палива при різних навантаженнях

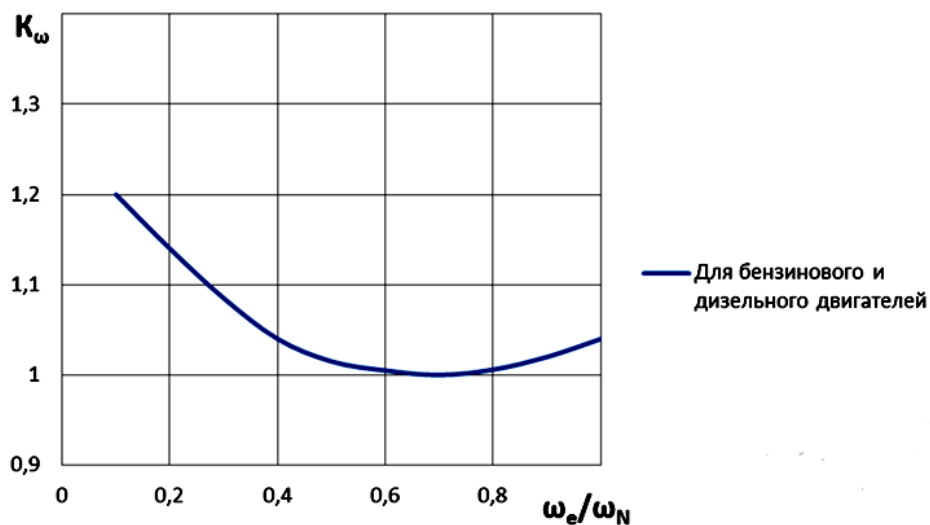


Рис. 8. Допоміжний графік для розрахунку питомої витрати палива при різних частотах обертання

Альтернативою є використання нижче наведених формул (для бензинових двигунів) [4]:

$$k_w = 0,8 \cdot \left(\frac{n}{n_N}\right)^2 - \frac{n}{n_N} + 1,2,$$

$$k_u = 2,85 \cdot u^2 - 4,35 \cdot u + 2,52.$$

Навантаження на приводну систему залежить від сили опору руху транспортного засобу. Ця сила залежить від швидкості руху автомобіля, швидкості вітру і нахилу дороги, як показано на рисунку 9.

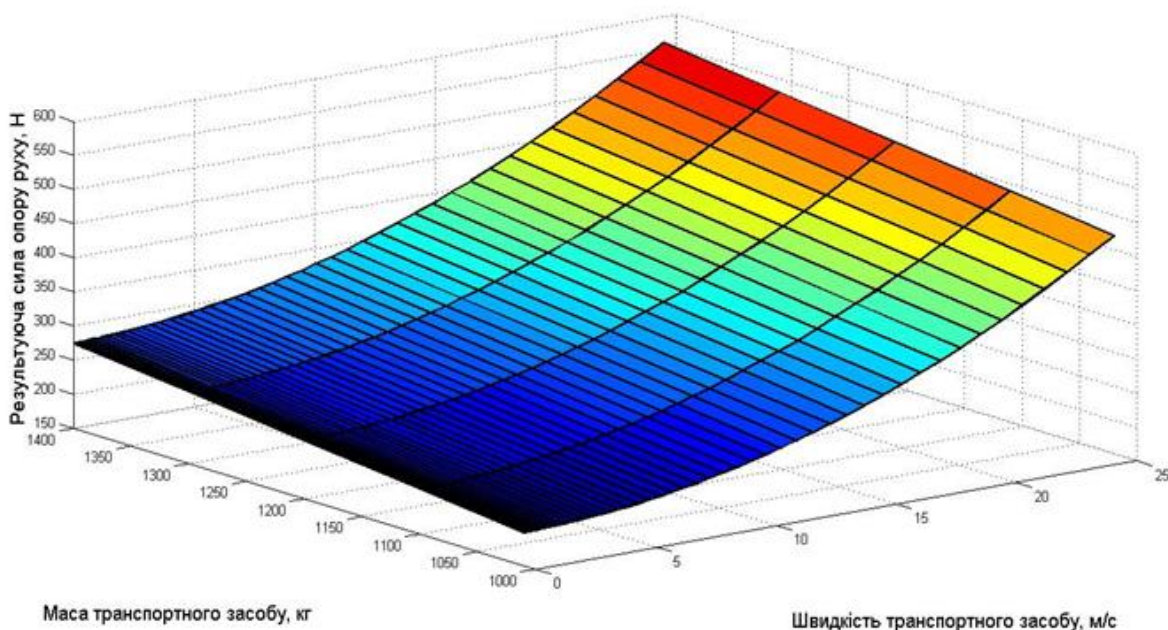


Рис. 9. Залежність сили опору руху від маси і швидкості транспортного засобу

На підставі рівнянь наведених вище можна побудувати енергетичну модель двигуна внутрішнього згорання.

Результати моделювання роботи енергетичної моделі ДВЗ показані на рисунках 10-12.

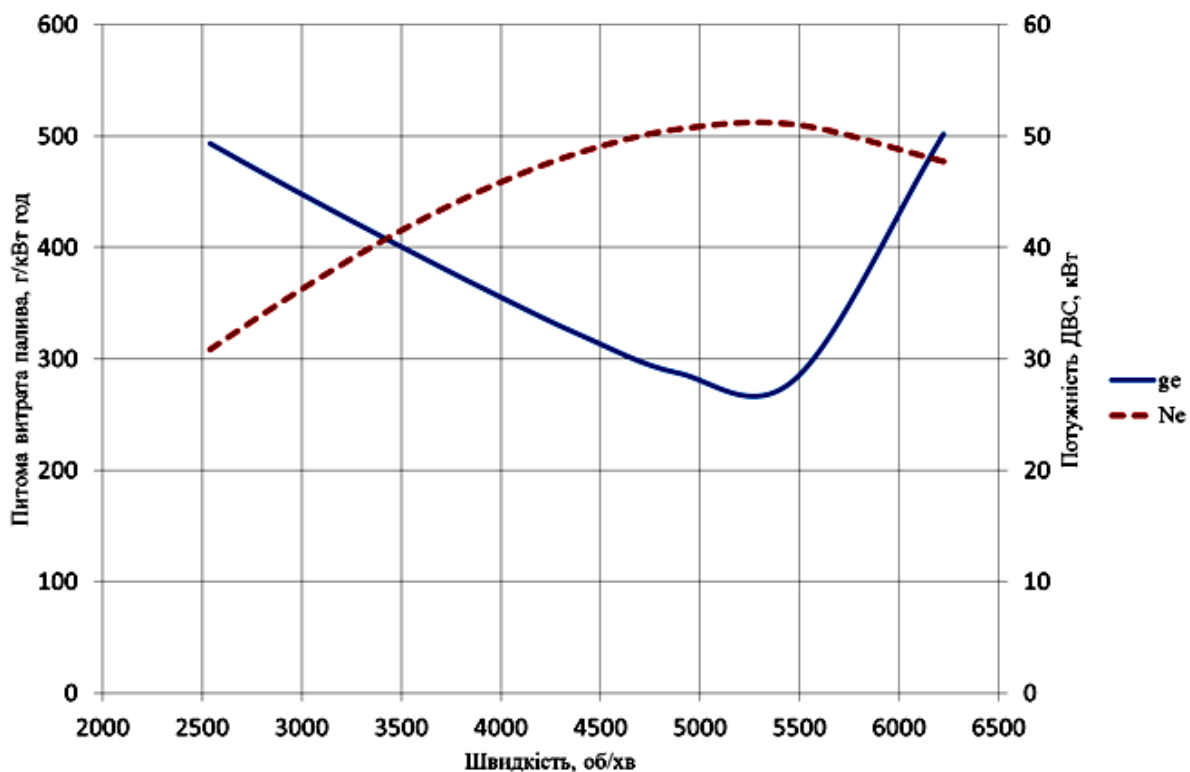


Рис. 10. Питома витрата палива ДВЗ. результати моделювання

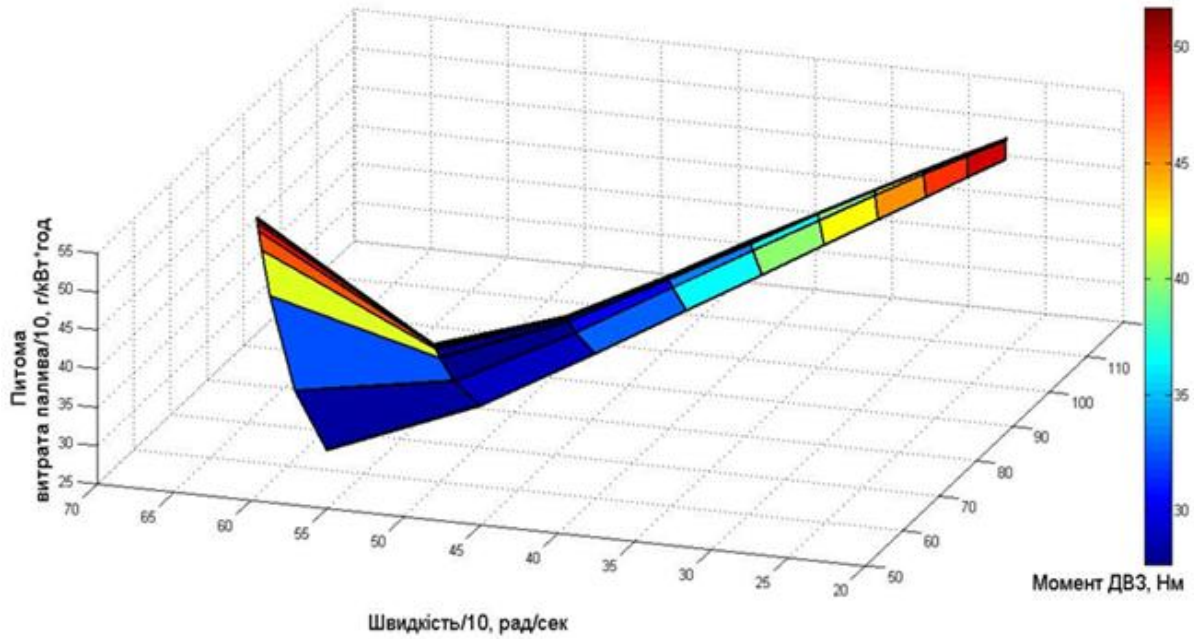


Рис. 11. Зміна питомої витрати палива і моменту ДВЗ зі зміною положення дросельної заслінки

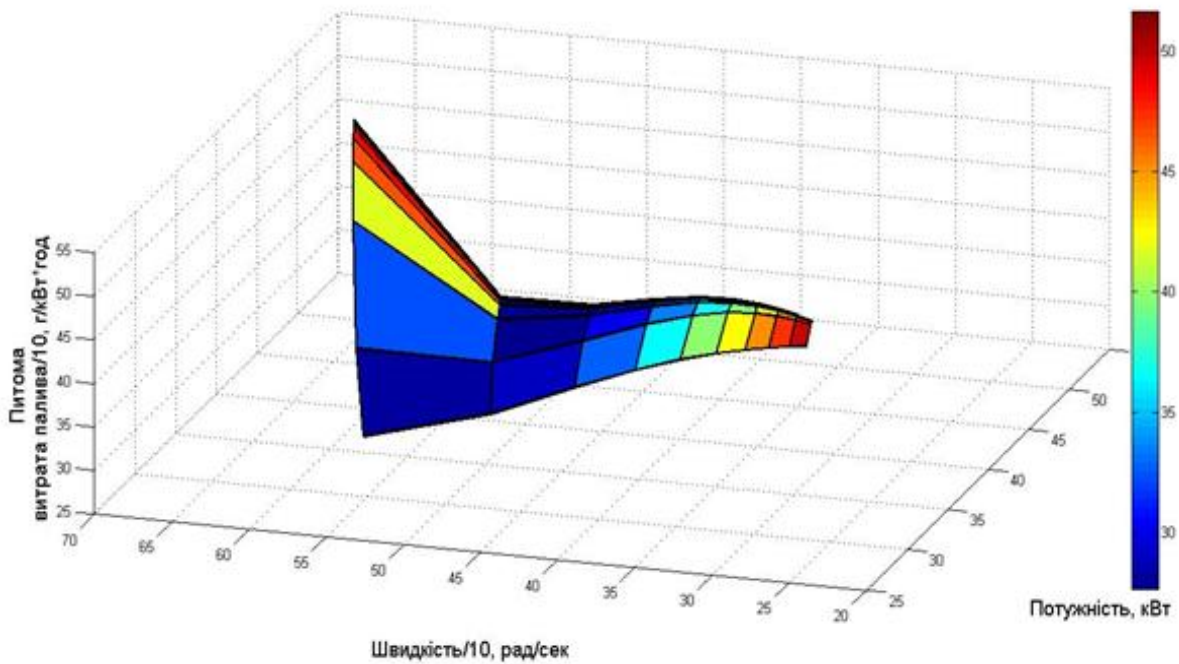


Рис. 12. Зміна питомої витрати палива і потужності ДВЗ зі зміною положення дросельної заслінки

Карта ефективності двигуна внутрішнього згоряння представлена на рисунках 13, 14. Питома ефективна витрата палива обмежується механічною характеристикою ДВЗ при повністю відкритій дросельній заслінці.

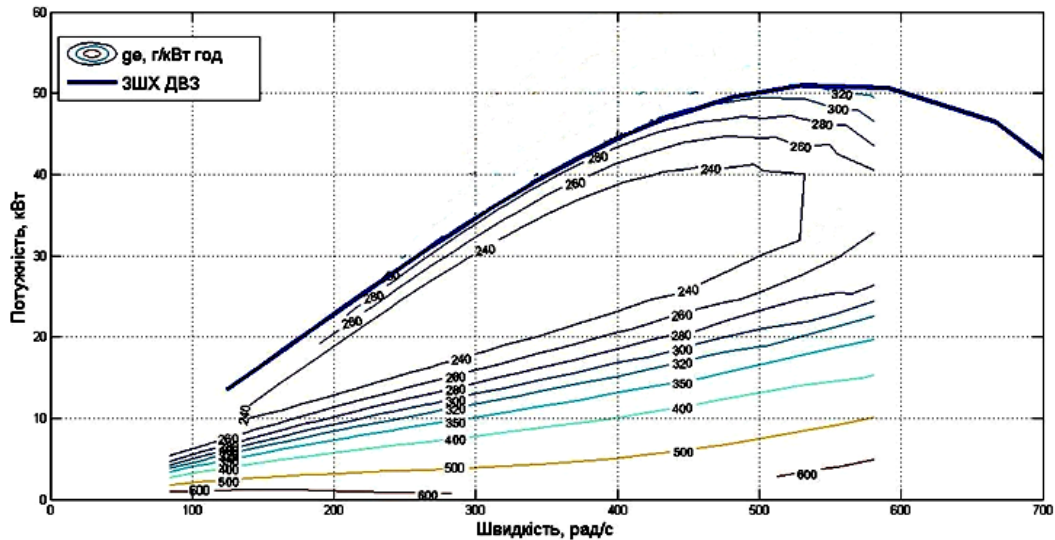


Рис. 13. Карта ефективності ДВЗ

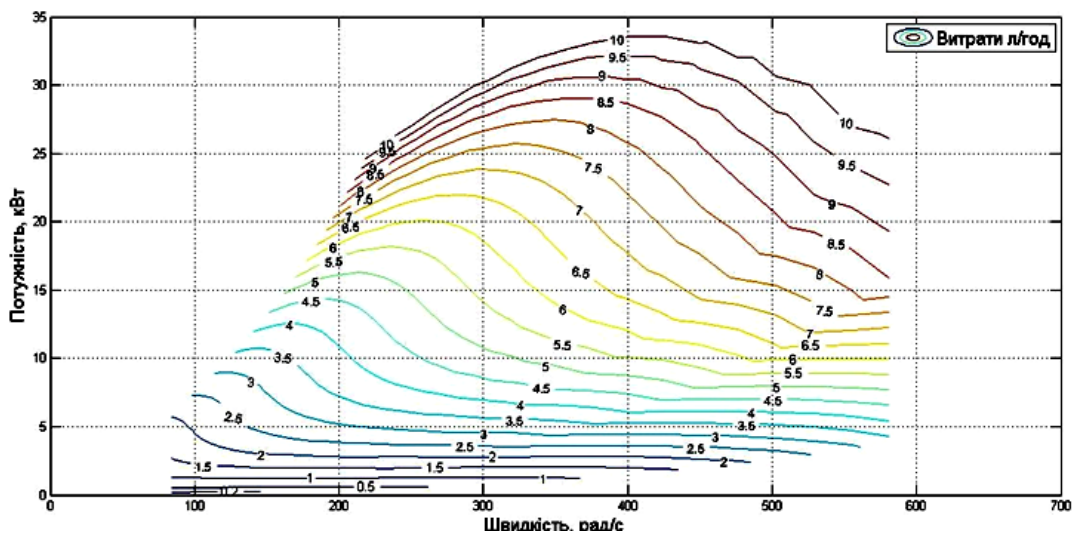


Рис. 14. Витрати палива ДВЗ

Наведену динамічну і енергетичну моделі двигуна внутрішнього згорання можна спільно використовувати для синтезу системи регулювання електроприводу гібридного транспортного засобу.

### Математична модель накопичувача енергії

В якості накопичувачів енергії в силовий гібридній установці можуть використовуватися кислотні, літєві та лужні нікель-кадмієві акумулятори. Нижче представлені переваги і недоліки накопичувачів енергії.

Літій-іонні акумулятори.

Переваги:

- висока енергетична щільність;
- низький саморозряд;
- відсутність ефекту пам'яті;
- простота обслуговування;
- низька питома вага.

Недоліки:

- акумулятори Li- іон схильні до вибухового руйнування при перезаряді та або перегріві. Для боротьби з цим явищем всі побутові акумулятори забезпечуються вбудованою електронною схемою, яка запобігає перезаряд і перегрів внаслідок занадто інтенсивного заряду;
- при необережному поводженні можуть мати короткий життєвий цикл у порівнянні з іншими типами акумуляторів.

Глибокий розряд повністю виводить з ладу літій-іонний акумулятор;

оптимальні умови зберігання Li-іон акумуляторів досягаються при 40 %-му заряді від ємності акумулятора при температурі близько 5 градусів Цельсія. При цьому низька температура є більш важливим фактором для малих втрат ємності при довготривалому зберіганні. Середній термін зберігання (служби) літійового АКБ складає в середньому 36 місяців, хоча може коливатися в інтервалі від 24 до 60 місяців;

суворі умови зарядки літій-іонних акумуляторів ускладнюють їх використання в альтернативній енергетиці. Це пов'язано з тим, що вітрогенератори і сонячні панелі не в змозі забезпечити постійний струм на всьому протязі циклу заряду;

літійові акумулятори старіють, навіть якщо не використовуються.

Нікель-кадмієві акумулятори.

Переваги:

- можуть працювати практично при будь-яких погодних умовах;
- можуть заряджатися навіть при низьких температурах;
- без проблем витримують більше тисячі циклів заряду / розряду і легко відновлюються при зниженні ємності і після тривалого зберігання;
- короткий час заряду.

Недоліки:

- відносно невелика, в порівнянні з акумуляторами інших типів, енергетична щільність (відношення ємності до маси) і, відповідно більшу вагу і габарити при однаковій ємності;
- Ni-Cd акумулятори містять кадмій "недружній" до навколишнього середовища, і тому вимагають спеціальної утилізації;
- високий саморозряд. За першу добу після заряду вони втрачають до 10%, а за місяць - до 20% запасеної енергії;
- Ni-Cd акумулятори схильні до ефекту пам'яті.

Кислотні акумулятори.

Переваги:

- широка поширеність технології і невелика вартість;
- добра переносимість потужностних завантажень;
- відносна дружність до довкілля - вторинна переробка кислотних акумуляторів добре відпрацьована.

Недоліки:

- низька щільність енергії в акумуляторі, у зв'язку з чим вага батареї вище, ніж у більшості інших батарей;
- проблема толерантності до глибокого розряду - при розряді понад 80 % різко знижується тривалість життя батареї;
- проблема обслуговування для вентильованих батарей - потрібен постійний контроль рівня електроліту раз на тиждень, зарядка в спеціальному добре провітрюваному приміщенні;
- при заряді втрачається до 30 % витраченої електроенергії;
- не можна залишати сильно розряджену батарею на морозі;
- важко прогнозувати вихід з ладу акумулятора;
- при великих токах розряду стоїть проблема неповної одномоментної віддачі заряду батареї.

**Моделювання роботи накопичувача енергії**

Математична модель будується у відповідності до структурної схеми та рівнянь, що описують роботу батареї. Структурна схема накопичувача енергії наведена на рисунку 15 [7].

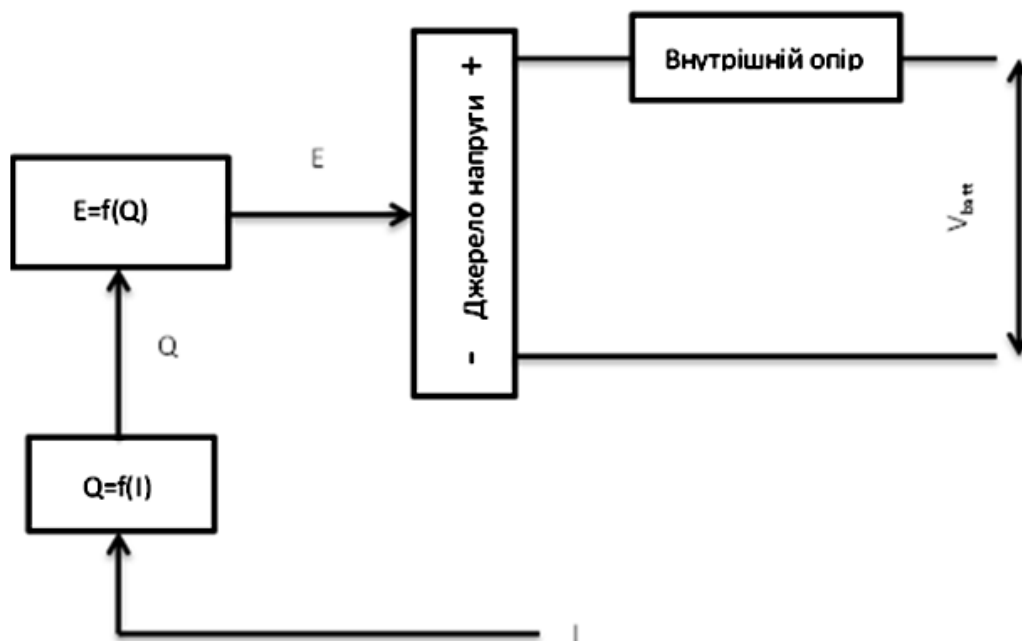


Рис. 15. Структурна схема накопичувача енергії

Всі необхідні коефіцієнти (6) знаходимо в розрядній характеристиці накопичувача енергії.

Структурні схеми накопичувачів енергії різного типу подібні до вище наведеної. Єдина відмінність полягає в розрахунку ЕРС накопичувача. Нижче наведені рівняння розряду та заряду для різних типів накопичувачів енергії.

Літій-іонні

Розряд

$$V_{batt} = E_0 - R \cdot i - K \frac{Q}{Q - it} \cdot (it + i^*) + A \exp(-B \cdot it)$$

Заряд

$$V_{batt} = E_0 - R \cdot i - K \frac{Q}{Q - 0,1 \cdot it} \cdot i^* - K \frac{Q}{Q - it} it + A \exp(-B \cdot it)$$

Кислотні

Розряд

$$V_{batt} = E_0 - R \cdot i - K \frac{Q}{Q - it} \cdot (it + i^*) + E \exp(t)$$

Заряд

$$V_{batt} = E_0 - R \cdot i - K \frac{Q}{Q - 0,1 \cdot it} \cdot i^* - K \frac{Q}{Q - it} it + E \exp(t)$$

Нікель-кадмієві

Розряд

$$V_{batt} = E_0 - R \cdot i - K \frac{Q}{Q - it} \cdot (it + i^*) + E \exp(t)$$

Заряд

$$V_{batt} = E_0 - R \cdot i - K \frac{Q}{|it| - 0,1Q} \cdot i^* - K \frac{Q}{Q - it} it + E \exp(t)$$

Результати моделювання наведені на рисунках 16-20.

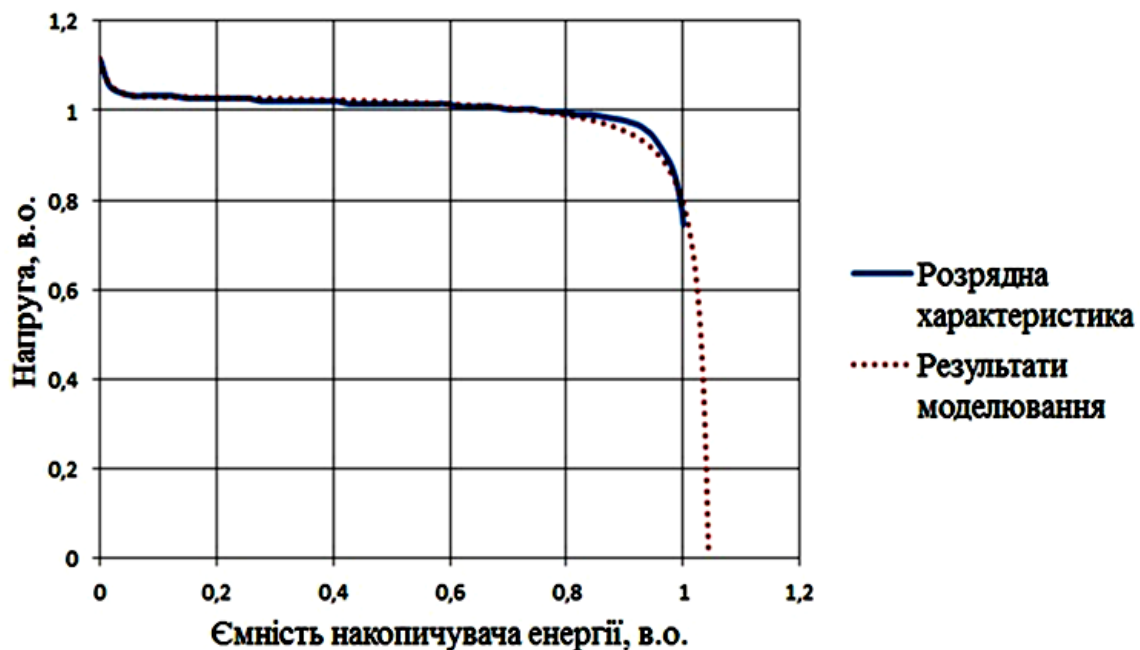


Рис. 16. Результати моделювання

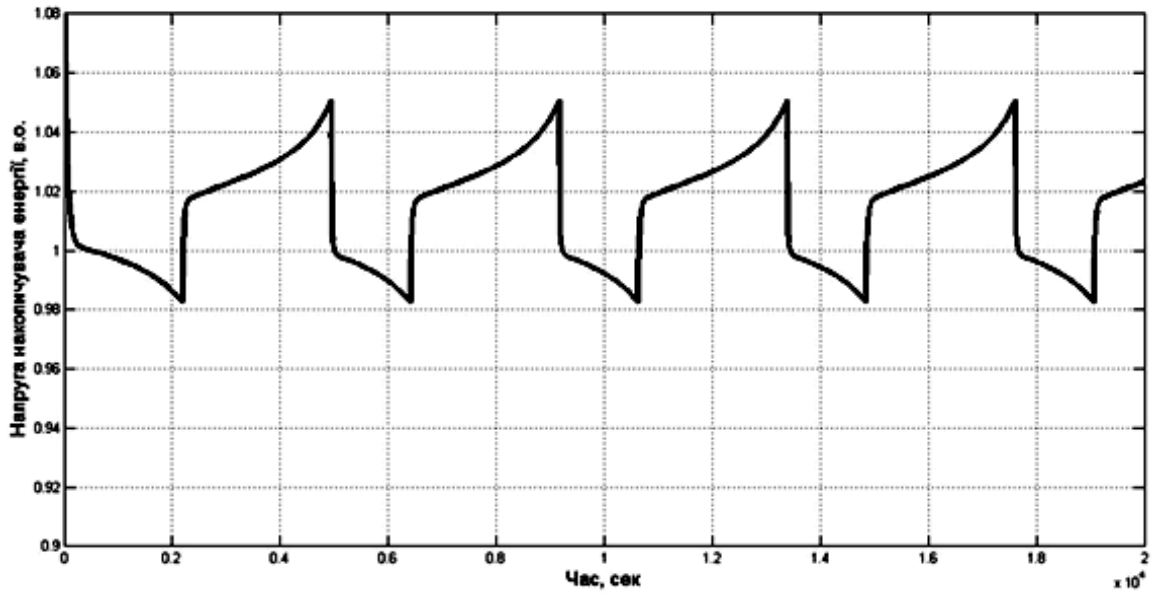


Рис. 17. Результати моделювання

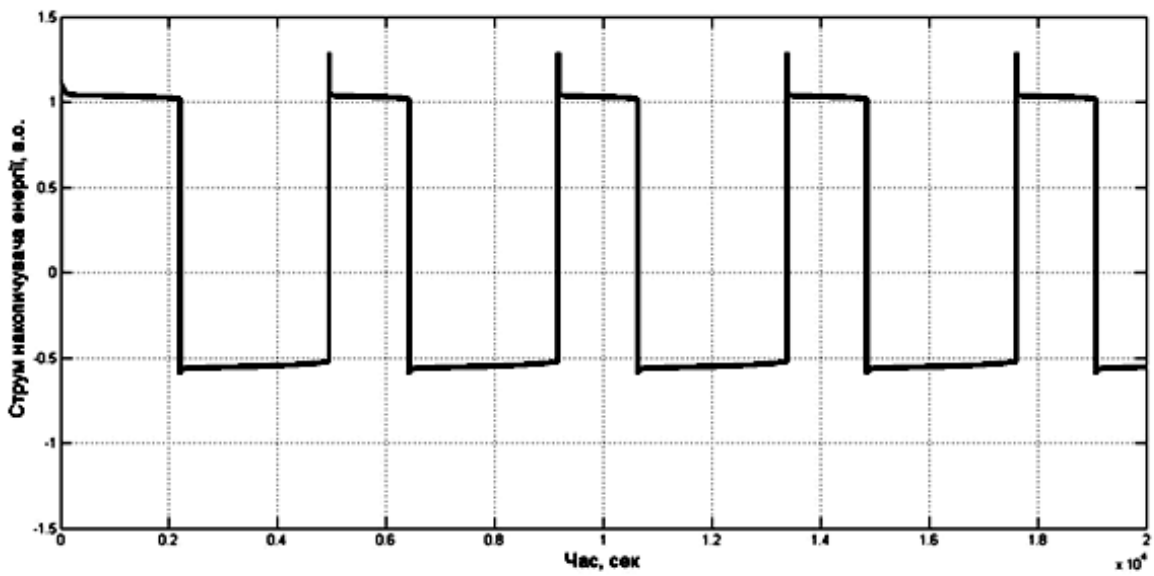


Рис. 18. Результати моделювання



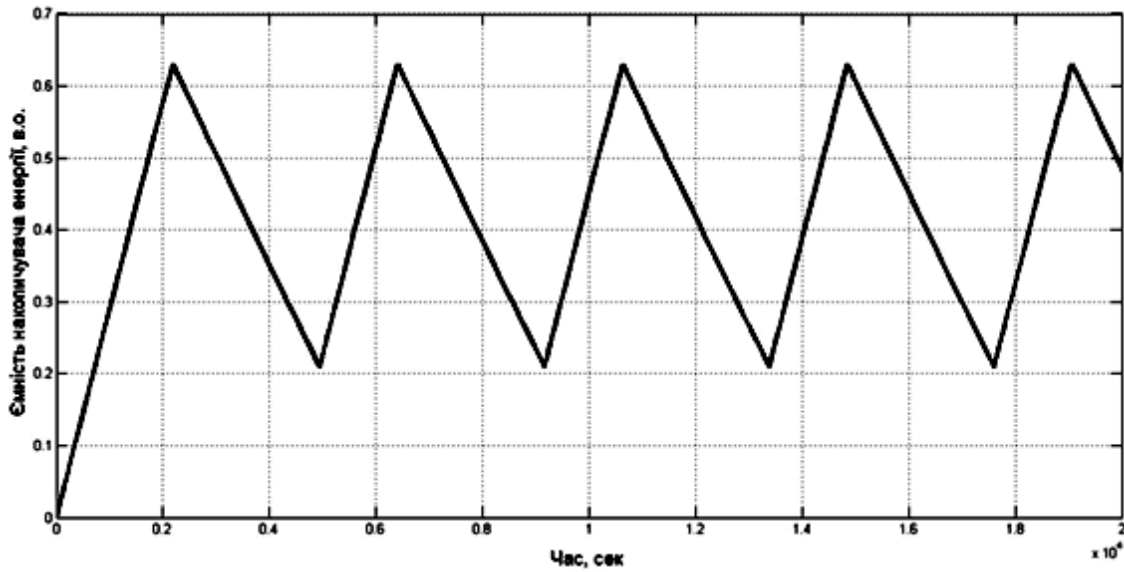


Рис. 19. Результати моделювання

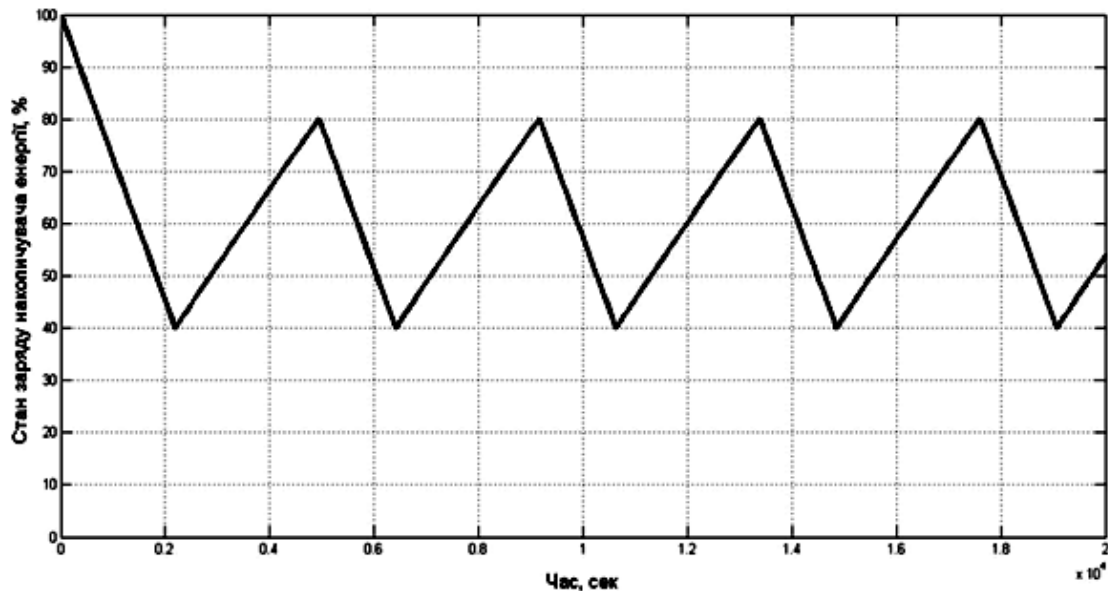


Рис. 20. Результати моделювання

**Висновки:** Отриманий математичний опис двигуна внутрішнього згорання для задач проектування силової установки гібридного транспортного засобу. Двигун внутрішнього згорання в динаміці описується аперіодичною ланкою з нелінійним коефіцієнтом підсилення, який визначається особливостями фізичних процесів робочого тіла в поршні. Енергетичні характеристики двигуна внутрішнього згорання мають екстремуми в усіх перетинах.

1. Отриманий математичний опис годографу руху автомобіля за довільною траєкторією. Годограф руху автомобіля при різних режимах - прискореному, уповільненому, постійної швидкості, в розв'язках і поворотах, на прямих і криволінійних ділянках, при уклоні і підйомах може бути синтезований в класі пропозованих спіраль-гвинтових ліній (тих, що спрямовують), відповідних іс-

тинним, незбуреним траєкторіям автомобіля, що розглядається як матеріальна точка

2. Дослідження щодо надійності гібридного автомобіля як складної технічної системи на скінченій кількості структурних елементів запропоновано проводити на основі розроблених матричних методів, які дозволяють ефективно застосовувати сучасні комп'ютерні технології.

3. Розроблено алгоритми кількісної та якісної оцінки надійності, використовуючи введені ланкові діаграми станів і відповідні матриці станів, матриці значимості структурних елементів, матриці чутливості надійності системи до варіацій надійності структурних елементів.

4. Побудовано алгоритми кількісної оцінки надійності, включаючи структурну надійність системи, значимість за надійністю окремих елементів системи.

5. Приведено алгоритми кількісної оцінки надійності, корегування надійності системи при дублюванні значимих елементів.

#### **Перелік посилань**

1. Туренко А.М (2011). Комбінована силова установка транспортного засобу Пат. 59062 Україна. БН, 2011, №9.
2. Хачатуров А.А., Афанасьев В.Л., Васильев В.С. (1976). Динамика системы «дорога-шина-автомобиль-водитель». Машиностроение. М. 535 с.
3. Santini D., Vyas A. (2008). How to Use Life Cycle Analysis Comparisons of PHEVs to Competing Powertrains. [Електронний ресурс] / Proceedings of the 8th International Advanced Automotive Battery and Ultracapacitor: Conference. Tampa, Florida. [www/URL: http://www.transportation.anl.gov/pdfs/HV/501.pdf](http://www.transportation.anl.gov/pdfs/HV/501.pdf).
4. Daniel Michael Lamberson. (2012), Torque Management of Gasoline Engines: A report submitted in partial satisfaction of the Requirements for the degree of Masters of Sciences. pp. 8-9.
5. Бажинов О.В. (2001). Пат. 49349 Україна. Гібридний автомобіль з мехатронним накопичувачем енергії.-БН, №8.
6. Синеглазов В.М. (2011). Пат. 65006 Україна. Пристрій підвищення ефективності рекупративного гальмування в електромобілях. БН, №22.
7. Cooper, J. Furakawa, M. Kellaway, and L. Lam. (2009). The UltraBattery- A new battery design for a new beginning in hybrid electric vehicle energy storage. Journal of Power Sources, vol. 188, No. 2. pp. 642-649/

#### **АННОТАЦІЯ**

**Цель.** Разработка методики математического описания двигателя внутреннего сгорания для задач проектирования силовой установки гибридного транспортного средства. Описание двигателя внутреннего сгорания в динамике как аperiodическое звено с нелинейным коэффициентом усиления, который определяется особенностями физических процессов рабочего тела в поршне, и энергетические характеристики двигателя внутреннего сгорания. Исследования по надежности гибридного автомобиля как сложной технической системы на конечном числе структурных элементов. Разработка алгоритма количественной и качественной оценки надежности, используя введенные звеньевые диаграммы состояний и соответствующие матрицы состояний, матрицы значимости структурных элементов.

**Методика исследования** заключается в осмотре и систематизации опыта математического описания двигателей известных электрических транспортных средств, описания подсистемы

динамики коленчатого вала, расчета внешней скоростной характеристики, и теоретического обоснования новой методики математического описания двигателя внутреннего сгорания гибридов.

**Результаты исследования.** Предоставлена классификация электрических транспортных средств, и гибридов, полученный математическое описание двигателя внутреннего сгорания для задач проектирования силовой установки гибридного транспортного средства, Получено математическое описание годографа движения автомобиля в произвольной траектории. Исследования по надежности гибридного автомобиля как сложной технической системы, конечные числа структурных элементов предложено проводить на основе разработанных матричных методов, которые позволяют эффективно применять современные компьютерные технологии.

Разработаны алгоритмы количественной и качественной оценки надежности, используя введенные звеньевые диаграммы состояний и соответствующие матрицы состояний, матрицы значимости структурных элементов, матрицы чувствительности надежности системы к вариациям надежности структурных элементов.

**Научная новизна** предложена математическое описание двигателя внутреннего сгорания для задач проектирования силовой установки гибридного транспортного средства.

**Практическое значение.** Разработанная методика позволяет с достаточной точностью обосновывать целесообразность перехода на новый системный подход математического описания двигателя внутреннего сгорания для задач проектирования силовой установки гибридного транспортного средства.

**Ключевые слова:** электрический транспорт, гибрид, математическое описание динамики двигателя.

#### **ABSTRACT**

**Purpose.** Development of methods for the mathematical description of the internal combustion engine for the design of the power plant of a hybrid vehicle. Description of an internal combustion engine in dynamics as an aperiodic link with non-linear gain, which is determined by the peculiarities of the physical processes of the working fluid in the piston, and the energy characteristics of the internal combustion engine. Studies on the reliability of a hybrid car as a complex technical system on a finite number of structural elements. Development of the algorithm for the quantitative and qualitative assessment of reliability, using the introduced link state diagrams and the corresponding state matrices, the significance matrix of the structural elements.

**The research methodology** consists in inspecting and systematizing the experience of mathematical description of engines of known electric vehicles, describing the subsystem of the crankshaft dynamics, calculating the external velocity characteristic, and theoretical substantiation of the new method of mathematical description of the internal combustion engine of hybrids.

**The results of the study.** A classification of electric vehicles and hybrids, a mathematical description of an internal combustion engine for the design tasks of a hybrid vehicle powerplant are provided. A mathematical description of the hodograph of a vehicle moving in an arbitrary trajectory is obtained. Studies on the reliability of a hybrid car as a complex technical system, it is proposed to carry out finite numbers of structural elements on the basis of the developed matrix methods, which make it possible to effectively apply modern computer technologies.

Algorithms for quantitative and qualitative assessment of reliability have been developed, using the introduced link state diagrams and the corresponding state matrices, the matrix of significance of structural elements, the sensitivity matrix of the system reliability to variations of the reliability of structural elements.

**Scientific novelty** proposed mathematical description of the internal combustion engine for the design tasks of the power plant of a hybrid vehicle.

**Practical value.** The developed method allows with sufficient accuracy to justify the feasibility of the transition to a new systematic approach of the mathematical description of the internal combustion engine for the design tasks of the power plant of a hybrid vehicle.

**Keywords:** electric transport, hybrid, mathematical description of engine dynamics.

УДК 629.14

© В.В. Проців, К.А. Зіборов, В.В. Кривда, С.О. Федоряченко, Г.К. Ванжа

## **СИСТЕМНИЙ ПІДХІД ДО РОЗМІЩЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНОГО ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ОБСЛУГОВУВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ І ГІБРИДНИХ АВТОМОБІЛІВ**

© V. Protsiv, K. Ziborov, V. Krivda, S. Fedoriachenko, G. Vanzha

## **SYSTEMATIC APPROACH TO THE PLACEMENT OF FUNCTIONAL EQUIPMENT FOR THE MAINTENANCE OF ELECTRIC AND HYBRID CARS**

**Мета.** Розроблення методики розміщення функціонального обладнання для обслуговування електричних і гібридних автомобілів, для оцінки якісного, спроможного цінового сегменту, технічної оснащеності автосервісу, підвищення культури надання послуги та впровадження нових технологічних рішень.

**Методика дослідження** полягає в огляді та систематизації досвіду обслуговування відомих електричних транспортних засобів та підбору технологічного обладнання, аналізу підходів щодо вибору та теоретичного обґрунтування нової методики технології обслуговування електромобілів та гібридів.

**Результати дослідження.** Надано класифікацію електричних транспортних засобів, та гібридів, обладнання та технології їх обслуговування в умовах науково дослідницького центру Національного технічного університету «Дніпровська політехніка» для поширення роботи в умовах міської експлуатації, для розширення мережі обслуговування електромобілів і гібридів, як технологічне регламентне обслуговування, так і ремонт та заміни силових акумуляторних елементів, і їх складових. Виділено спектр послуг в обслуговуванні електромобілів і гібридів. Запропоновані різні підходи до надання послуг з обслуговування силових акумуляторів електромобілів і гібридів. Розроблена методика оцінки переваг нових транспортних засобів, в основі якої лежать методи системного підходу, аналогій, техніко-економічного аналізу та логічних інженерних рішень. Виділено екологічні аспекти діяльності підприємства автосервісу.