

УДК 681.5

С.А. Серіков, к.т.н., доц.
Ю.М. Бороденко, к.ф.-м.н., доц.
О.А. Дзюбенко, аспір.

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

НЕЧІТКА МОДЕЛЬ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ СИЛОВОЮ УСТАНОВКОЮ ГІБРИДНОГО АВТОМОБІЛЯ

Розглянуто концепцію створення автоматичної системи керування агрегатами гібридного автомобіля в термінах нечіткої логіки, представлено ієрархічну структуру системи, наведено результати моделювання в Simulink.

Вступ. Одними з головних напрямків розвитку автомобільного транспорту на даний час є підвищення його економічності та екологічної безпечності. Світовий досвід показує, що найбільш перспективними в цьому напрямку є використання альтернативних видів палива і розробка гібридних силових установок. Такі установки дозволяють оптимізувати режим роботи ДВЗ і акумулювати надлишки кінетичної енергії транспортного засобу при гальмуванні, що надзвичайно ефективно в міському циклі руху.

У рамках програми Міністерства освіти і науки України роботи зі створення екологічно чистого автомобіля з гібридною силовою установкою ведуться в Харківському національному автомобільно-дорожньому університеті. Спрощена схема силових установок гібридного автомобіля наведена на рис. 1.

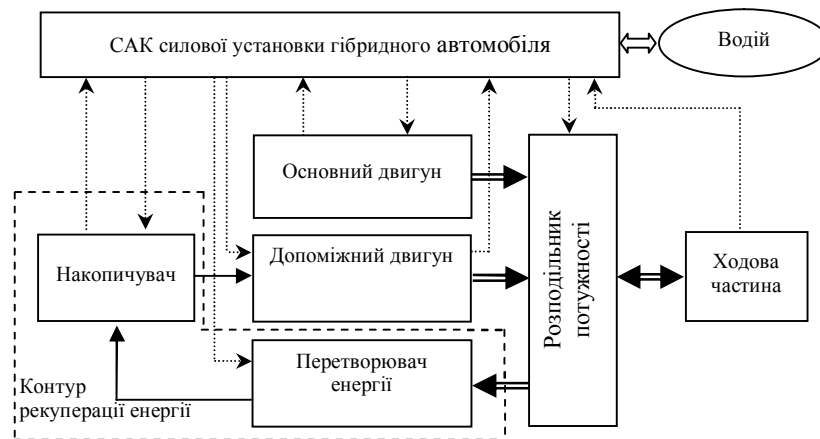


Рис. 1. Функціональна схема силових установок гібридного автомобіля

Основним двигуном гібридної силових установок є газовий двигун внутрішнього згоряння. Як допоміжний двигун використовується або пневматичний двигун, або синхронний двигун змінного струму, або двигун постійного струму. Контур рекуперації енергії складається з компресора, балонів, редуктора, – при використанні пневматичного допоміжного двигуна; або генератора, акумулятора, перетворювача напруги, інвертора, – у випадку використання електричного допоміжного двигуна. Ключовим елементом гібридної силових установок є розподільник потужності, який забезпечує перерозподіл потоків потужності між ходовою частиною автомобіля, основним двигуном, допоміжним двигуном і контуром рекуперації енергії.

Аналіз публікацій. Відомі три схеми побудови гібридних силових установок [1, 2]. При використанні електродвигуна як допоміжного схема гібридної установок має наступні конфігурації:

1) *послідовна схема.* Навантаженням ДВЗ є генератор, при цьому обирається найбільш економічний режим роботи ДВЗ. Енергія, яка вироблюється генератором, подається або на тяговий електродвигун, або в накопичувач енергії та на тяговий електродвигун, або тільки в накопичувач енергії. Тяговий електродвигун забезпечує всі необхідні потужнісні й швидкісні режими транспортного засобу, а при гальмуванні автомобіля працює в режимі генератора, забезпечуючи рекуперацію кінетичної енергії. Перевагою такої схеми є простота керування силовою установкою, відсутність спеціальних вузлів трансмісії, можливість використання ДВЗ малої потужності в економічних режимах. Недоліком такого варіанта є малий коефіцієнт корисної дії (ККД).

2) *паралельна схема.* ДВЗ і тяговий електродвигун разом з акумуляторною батареєю через трансмісію пов'язані з ведучими колесами. Підсумковий обертаючий момент визначається сумою

обертаючих моментів ДВЗ і електродвигуна. У такій схемі більш високий ККД і використовується одна електрична машина в режимах тягового електродвигуна і генератора. До недоліків такого варіанта варто віднести ускладнення трансмісії системи керування, відхилення від економічного режиму роботи ДВЗ при регулюванні швидкості транспортного засобу.

3) *змішана схема*. Комбінація послідовної і паралельної схем. Залежно від умов руху, привід ведучих коліс може здійснюватися від допоміжної силової установки, ДВЗ або від допоміжної силової установки і ДВЗ, які включаються паралельно. У цьому випадку досягається максимальна ефективність силової установки. Саме така схема побудування силової установки застосована на автомобілях Lexus RX400h, Lexus GS450h, Toyota Prius. Особливостями силової установки гібридного автомобіля як об'єкта керування є змінна структура, невизначеність керуючих впливів і впливів, що збурюють. Основні складові такої силової установки характеризуються нелінійністю та істотною параметричною невизначеністю.

Складності формального опису силової установки гібридного автомобіля як об'єкта керування з урахуванням структурних і параметричних невизначеностей робить доцільним застосування в алгоритмах керування методів нейро-фазирегулювання. Такий підхід дозволяє сформувати алгоритм керування силовою установкою в термінах нечіткої логіки на підставі формалізації експертних висновків, а також здійснити налаштування отриманого алгоритму в процесі випробувань і подальшої експлуатації гібридного транспортного засобу.

В останні роки провідними компаніями з розробки систем керування агрегатами автомобіля широко застосовуються компоненти нечіткої логіки та штучні нейронні мережі [3]. Системами з використанням нечіткої логіки оснащуються автомобілі Nissan, Mitsubishi, Honda, BMW, Hyundai, Mazda, Mercedes, Peugeot.

Мета досліджень і постановка задачі. Основним завданням САК силової установки гібридного автомобіля є забезпечення найбільш економічного й екологічно безпечного режиму роботи ДВЗ за рахунок перерозподілу навантаження між ДВЗ, допоміжним двигуном і контуром рекуперації енергії. Додатковими завданнями САК є забезпечення: рекуперації енергії гальмування транспортного засобу; необхідної розгінної динаміки транспортного засобу за рахунок використання допоміжної силової установки й накопичувача енергії; режиму старт-стоп з мінімальним періодом холостого ходу ДВЗ у випадку короткочасних зупинок транспортного засобу.

Питома ефективна витрата палива визначається з урахуванням теплоти його згоряння H_u ; індикаторного η_i і механічного η_m ККД двигуна:

$$g_e = \frac{3,6 \cdot 10^3}{H_u \cdot \eta_m \cdot \eta_i}.$$

Витрата палива зменшується з підвищенням навантаження двигуна за рахунок збільшення η_m . При деякому навантаженні, що відповідає моменту обертання ДВЗ $M_{AA\zeta}^{i\dot{a}}$, зменшення g_e припиниться й починає зростати через зменшення η_i внаслідок зниження коефіцієнта надлишку повітря. Поряд з цим, значення $M_{AA\zeta}^{i\dot{a}}$ збільшується при підвищенні частоти обертання колінчастого вала ω . Прирошення швидкості обертання визначається алгебраїчною сумою моментів:

$$\frac{d\omega}{dt} = M_{AA\zeta}^{i\dot{a}} + M_{\dot{a}\dot{a}\dot{a}}^{i\dot{a}} - M_{\dot{a}\dot{a}\dot{a}}^{i\dot{a}} - M_{\dot{a}\dot{a}\dot{a}}^{i\dot{a}},$$

де $M_{AA\zeta}^{i\dot{a}}$ – момент обертання ДВЗ; $M_{\dot{a}\dot{a}\dot{a}}^{i\dot{a}}$ – момент обертання допоміжного двигуна (електродвигуна); $M_{\dot{a}\dot{a}\dot{a}}^{i\dot{a}}$ – момент опору, що створюється дорогою з урахуванням передатного відношення коробки передач; $M_{\dot{a}\dot{a}\dot{a}}^{i\dot{a}}$ – момент опору, що створюється генератором.

Задача синтезу САК силової установки може бути сформульована в такий спосіб. При всіх припустимих змінах тягово-швидкісного режиму силової установки забезпечити керування частотою обертання колінчастого вала ω , при якому мінімізується середньоквадратична помилка регулювання σ_e й середньоквадратичне відхилення моменту обертання ДВЗ від оптимального значення σ_i при наявності обмежень на керуючі впливи.

$$\sigma_e = \sqrt{M\left[\left(\omega_\zeta(t) - \omega(t)\right)^2\right]}, \quad \sigma_M = \sqrt{M\left[\left(M_{AA\dot{N}}^{i\dot{a}}(t) - M_{AA\dot{N}}^{\dot{a}\dot{a}}(t)\right)^2\right]},$$

де ω_ζ – задана частота обертання колінчастого вала.

Принципи побудови САК гібридною силовою установкою. Особливості об'єкта керування припускають ієрархічну організацію системи керування силовою установкою гібридного автомобіля.

Необхідні режими роботи кожного агрегату силової установки забезпечуються відповідними регуляторами і блоками керування, які враховують особливості побудови конкретних вузлів й агрегатів і становлять перший рівень ієрархії. Підтримка оптимального режиму роботи ДВЗ на різних режимах автомобіля за рахунок перерозподілу навантаження між ДВЗ, допоміжним двигуном і контуром рекуперації енергії забезпечується елементами САК другого рівня ієрархії. Структурна схема силової установки гібридного автомобіля з використанням електродвигуна як допоміжного агрегату, наведена на рис. 2.

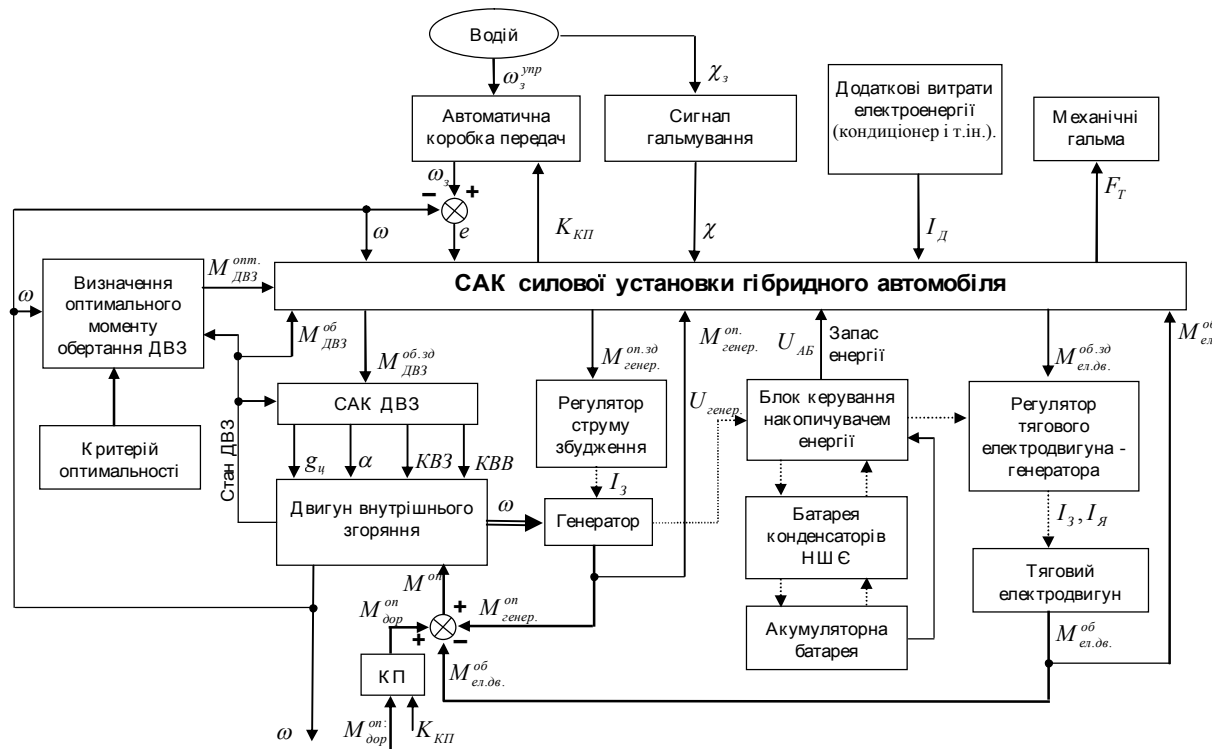


Рис. 2. Структурна схема силової установки гібридного автомобіля

Згідно з рисунком: $g_{ци}$ – циклова витрата палива, α – коефіцієнт надлишку повітря, KBZ – кут випередження запалювання, KBB – кут випередження впорскування, $K_{КП}$ – коефіцієнт передачі коробки передач.

Формальний опис принципів роботи САК гібридної силової установки полягає в наступному.

1. Початок руху, рух при малому навантаженні, з невеликою швидкістю або під ухил. Оскільки ДВЗ має низький ККД при малих навантаженнях, рух забезпечується за рахунок допоміжного двигуна, якщо запас енергії в накопичувачі достатній. Якщо ні – рух забезпечується двигуном внутрішнього згоряння.

2. Рівномірний рух. САК забезпечує найбільш ефективний режим роботи ДВЗ. У випадку, якщо обертаючий момент ДВЗ менший за момент опору, потужність, якої бракує, забезпечується за рахунок підключення допоміжного двигуна. Якщо оптимальний обертаючий момент більший за момент опору, надлишок потужності надходить до контуру рекуперації енергії.

3. Розгін. Необхідна розгінна динаміка забезпечується в основному за рахунок допоміжного двигуна при підтримці найбільш економічного режиму основного ДВЗ. При недостатньому запасі енергії в накопичувачі або недостатку потужності допоміжного двигуна, додаткова потужність забезпечується основним ДВЗ.

4. Гальмування. Надлишок кінетичної енергії транспортного засобу утилізується контуром рекуперації. При недостатній ефективності рекуперативного гальмування, підключається система гідравлічного гальмування.

5. При зупинці й наявності енергії в накопичувачі, достатньої для рушання автомобіля, ДВЗ відключається. Якщо запасної енергії недостатньо, ДВЗ продовжує працювати до її необхідного поповнення.

Побудування нечіткої моделі системи керування. Наведений опис роботи САК гібридної силової установки формалізовано у вигляді бази правил нечітких продукцій. Для зручності запису найменувань термів лінгвістичних змінних використовуються загальноприйняті скорочення (табл. 1).

Таблиця 1

Скорочення для значень основних термів лінгвістичних змінних

Символічне позначення	Англомовна нотація	Російськомовна нотація
NB	Negative Big	Негативне велике
NM	Negative Middle	Негативне середнє
NS	Negative Small	Негативне мале
ZN	Zero Negative	Негативне близьке до нуля
Z	Zero	Нуль, близьке до нуля
ZP	Zero Positive	Позитивне близьке до нуля
PS	Positive Small	Позитивне мале
PM	Positive Middle	Позитивне середнє
PB	Positive Big	Позитивне велике

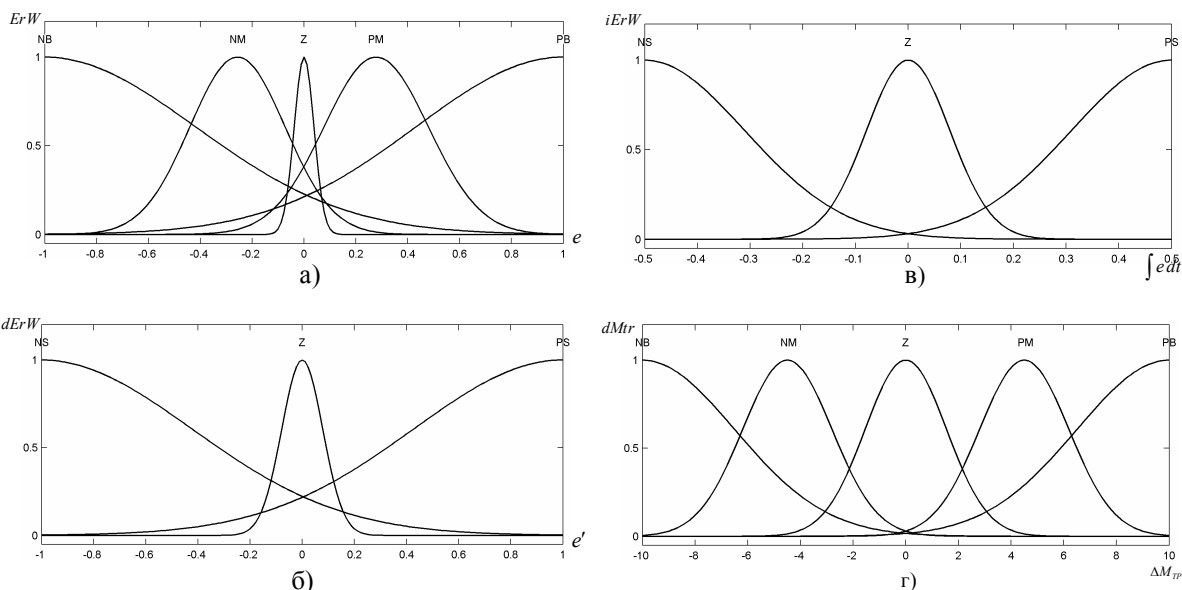


Рис. 3. Функції приналежності для термів лінгвістичних змінних:

- а) – помилка регулювання швидкості обертання; б) – приращення помилки регулювання;
- в) – нагромадження помилки регулювання; г) – необхідне приращення моменту обертання

Для побудування нечіткої моделі визначені наступні вхідні лінгвістичні змінні: E_rW $\{NB, NM, Z, PM, PB\}$ – помилка регулювання по швидкості з функціями належності (рис. 3, а); dE_rW $\{NS, Z, PS\}$ – похідна від помилки регулювання з функціями належності (рис. 3, б); iE_rW $\{NS, Z, PS\}$ – інтеграл від помилки регулювання (рис. 3, в); $\Delta M_{ДВЗ}$ $\{NB, NM, Z, PM, PB\}$ – відхилення моменту обертання ДВЗ від оптимального значення; $M_{ДВЗ}^{об}$ $\{ZP, PM, PB\}$ – момент обертання ДВЗ; $M_{ел.дв.}^{об}$ $\{ZP, PM, PB\}$ – момент обертання електродвигуна; $M_{генер.}^{он}$ $\{ZP, PM, PB\}$ – момент опору генератора; $U_{АБ}$ $\{PS, PM, PB\}$ – ступінь заряду АКБ; $I_{Д}$ $\{PS, PB\}$ – струм додаткових споживачів. Вихідна лінгвістична змінна dM_{tr} з базовим терм – множиною $\{NB, NM, Z, PM, PB\}$ відтворює необхідне приращення моменту обертання (мал. 3, г).

Для визначеного складу силової установки як вихідні лінгвістичні змінні САК розглядаються величини приращень моментів електродвигуна $\Delta M_{ел.дв.}^{об.зд.}$, ДВЗ $\Delta M_{ДВЗ}^{об.зд.}$ і генератора $\Delta M_{генер.}^{он.зд.}$. Функції належності кожного з термів кожної лінгвістичної змінної є гауссовськими функціями з центром c і варіацією σ [4]:

$$\mu(x; \sigma, c) = \exp\left[-\frac{(x-c)^2}{2\sigma^2}\right]$$

Параметри c і σ підбираються, виходячи з фізичного ества відповідних змінних. Нечітка модель системи керування, що реалізує завдання оптимізації роботи ДВЗ на різних режимах, розроблена з використанням пакета Fuzzy Logic Toolbox системи MATLAB. Для нечіткого виводу використовувались алгоритми Mamdani й Sugeno. З метою зменшення розмірності проведена декомпозиція задачі (рис. 4.)

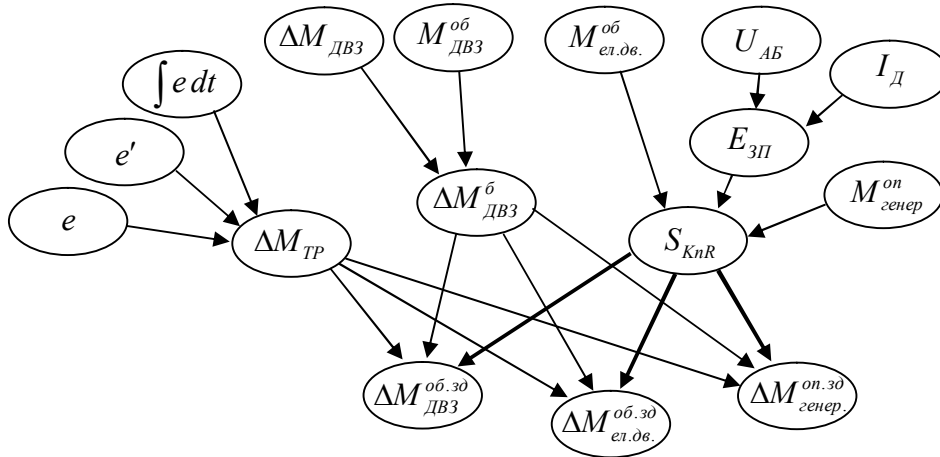


Рис. 4. Схема алгоритмічної декомпозиції обчислення моментів, які повинні утворюватися елементами системи

При цьому були введені проміжні лінгвістичні змінні: $\Delta M_{TP} \{NB, NM, Z, PM, PB\}$ – потрібне прирощення моменту обертання для підтримки заданого швидкісного режиму; $\Delta M_{ДВЗ}^{об} \{NB, NM, Z, PM, PB\}$ – бажане прирощення моменту обертання ДВЗ; $E_{зп}$ – запас енергії в контурі рекуперації; S_{KnR} – стан контуру рекуперації. Базу правил системи нечіткого виводу для визначення необхідного прирощення моменту обертання силової установки можна представити в табличному вигляді (табл. 2).

Таблиця 2

База правил нечіткого виводу для визначення необхідного прирощення моменту обертання силової установки

<i>ErW</i>		NB			NM			Z			PM			PB		
<i>dErW</i>		NS	Z	PS	NS	Z	PS	NS	Z	PS	NS	Z	PS	NS	Z	PS
<i>iErW</i>	PS	NB	NM	NM	NM	NM	Z	Z	PM	PB	PM	PB	PB	PB	PB	PB
	Z	NB	NB	NM	NB	NM	NM	NM	Z	PM	PM	PM	PB	PM	PB	PB
	NS	NB	NB	NB	NB	NB	NM	NB	NM	Z	Z	PM	PM	PM	PM	PB

Відповідно до складеної таблиці формулюється 31 правило нечітких продукцій. Для нечіткого виводу в заданій базі правил використовується алгоритм Мамдани. На рис. 5 представлені поверхні нечіткого виводу, які відображають залежності вихідної змінної $\Delta M_{об}$ (dM_{tr}), від вхідних змінних e , e' і $\int edt$ (*ErW*, *dErW* та *iErW*).

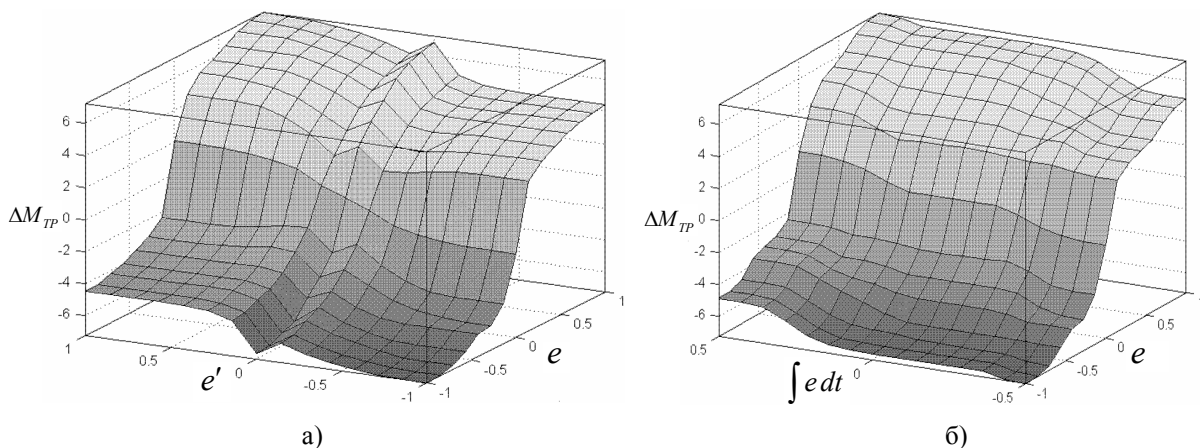


Рис. 5. Поверхні нечіткого виводу при обчисленні необхідного прирощення моменту обертання силової установки: а) – при відсутності накопиченої помилки; б) – при відсутності прирощення помилки регулювання

Процес створення моделі в термінах нечіткої логіки полягає в послідовному виконанні операцій фазифікації вхідних змінних, агрегування підумов у правилах нечітких продукцій, активації підвисновків, акумуляції висновків правил нечітких продукцій, дефазифікації вихідних змінних. Аналогічно складаються моделі для визначення інших змінних: бажаного прирощення моменту обертання ДВЗ; запасу енергії в контурі рекуперації; стану контуру рекуперації; прирощень керуючих впливів на агрегати силової установки.

Бажане прирощення моменту обертання ДВЗ, наближає його режим до оптимального та визначається поточним моментом обертання $M_{AA\dot{C}}^{i\dot{\delta}}$ й поточним відхиленням моменту обертання від оптимального значення. Запас енергії в контурі рекуперації, що може бути використаний у силевій установці гібридного автомобіля при перерозподілі потужності, залежить не тільки від ступеня заряду акумуляторних батарей (для випадку електричного допоміжного двигуна) але й від витрати енергії додатковими споживачами, які не пов'язані з утворенням тягового моменту. Стан контуру рекуперації енергії визначається можливістю забезпечення необхідного прирощення моменту обертання гібридної установки без використання ДВЗ.

Перерозподіл навантаження між агрегатами гібридної установки здійснюється на підставі значень необхідного прирощення моменту обертання силової установки dM_{tr} , бажаного прирощення моменту обертання ДВЗ dM_{dvsG} і стану контуру рекуперації енергії S_a, S_b, S_c . При цьому для збільшення додаткового моменту (моменту, що створюється електродвигуном або генератором) спочатку варто зменшити момент опору генератора, а тільки потім збільшити момент обертання електродвигуна. Для зменшення додаткового моменту починають зменшувати момент обертання електродвигуна, а потім збільшують момент опору генератора.

Моделювання нечіткої системи керування. Об'єднавши згідно з рис. 4 нечіткі моделі окремих компонентів, одержимо нечітку модель системи керування в цілому. Така модель системи розроблена з використанням пакета Fuzzy Logic Toolbox програми MATLAB. Для нечіткого виводу використані алгоритми Mamdani й Sugeno. Simulink-модель даної системи керування наведена на рис. 6.

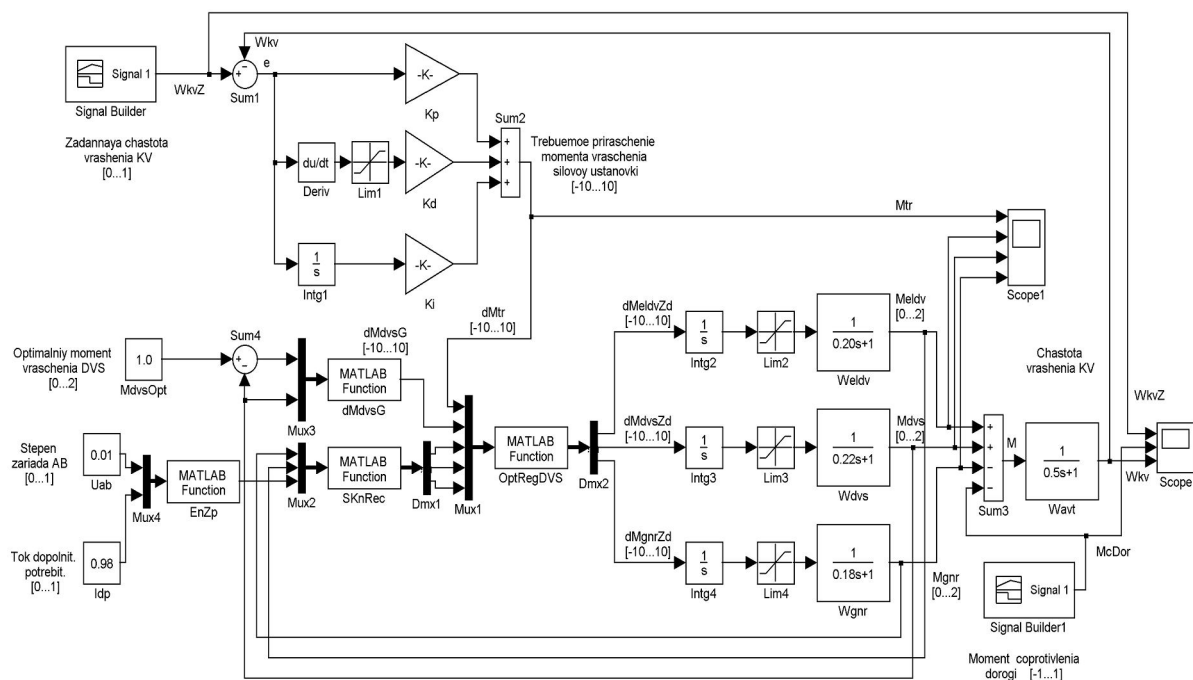


Рис. 6. Simulink-модель системи керування

На моделі модуль обчислення потрібного прирощення моменту обертання $\Delta M_{об}$ замінений ПІД (пропорційно-інтегрально-дериwаційним) регулятором, який оптимізовано за допомогою пакета Nonlinear Control Design Blockset системи MATLAB. Для опису об'єкта керування в складі електродвигуна, двигуна внутрішнього згоряння, генератора й автомобіля використані аперіодичні ланки першого порядку з відповідними постійними часу.

Для дослідження моделі використовувались керуючий ω_c і збурюючий $M_{ai\dot{\delta}}^{ii}$ впливи східчастого виду. На рис. 7, а, б наведено результат моделювання при середньому запасі енергії у контурі рекуперації, коли $U_{AA} = 0,5$ і $I_{\dot{A}} = 0,1$. Силова установка в цьому випадку після закінчення

перехідного процесу відпрацьовує керуючі впливи, утримуючі значення моменту $M_{AAC}^{i\dot{a}}$, близькі до оптимального ($M_{AAC}^{i\dot{r}o} = 1$). Рис. 7, в ілюструє реакцію установки при надлишковому запасі енергії в контурі рекуперації ($U_{AA} = 0,98$; $I_{\dot{A}} = 0,01$). Слід зазначити, що на окремих ділянках керуючий вплив не відпрацьовується цілком без домішки механічного гальмування (неможливість гальмувати генератором).

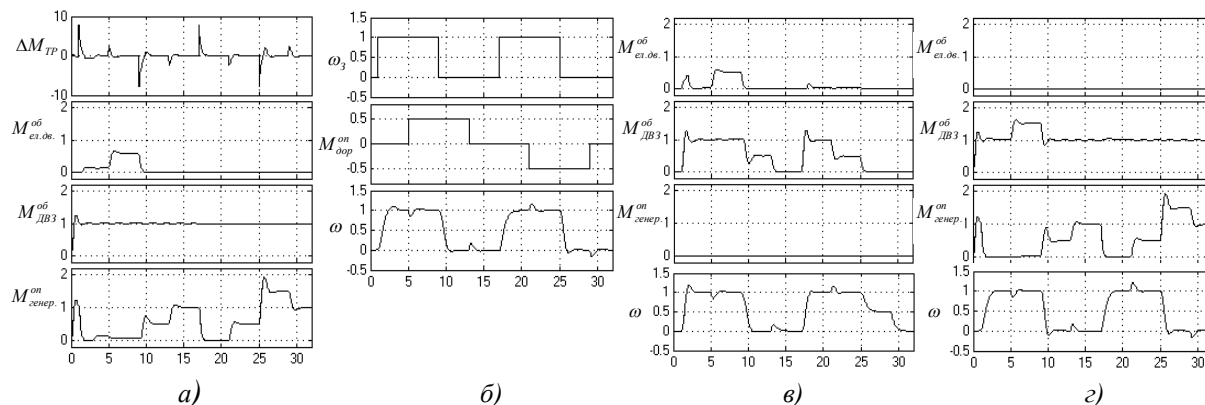


Рис. 7. Результати моделювання силової установки при різному запасі енергії в контурі рекуперації: а, б – середній запас; в – надлишковий запас; г – недостатній запас

На рис. 7, г представлена реакція установки при недостатньому запасі енергії в контурі рекуперації ($U_{AB} = 0,01$; $I_{\dot{D}} = 0,98$). У цьому випадку, на окремих режимах, неможливо задіяти електродвигун для збільшення моменту обертання ДВЗ, а отже не вдається підтримувати його оптимальне значення.

Висновки. Незважаючи на прийняті припущення, результати моделювання дозволяють зробити висновки про можливість використання нечіткого керування для вирішення поставлених завдань. Перевагою даного методу є можливість формалізувати та використовувати досвід фахівців різного профілю при підготовці бази правил нечітких продукцій.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Говорущенко Н.Я. Основные направления развития автомобильного транспорта в XXI веке // Автомобильный транспорт: Сб. научн. тр. – Харьков: РИО ХНАДУ. – 2003. Вып. № 13. – С. 7–11.
2. Смирнов О.П. Тенденция створення екологічно чистого транспортного засобу // Автомобильный транспорт: Сб. научн. тр. – Харьков: РИО ХНАДУ. – 2005. – Вып. № 17. – С. 17–21.
3. <http://www.kinnet.ru/cterra/415/13082.html>
4. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzy TECH. – Петербург: СПб.: БХВ – 2003. – 736 с.

СЕРІКОВ Сергій Анатолійович – кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобільної електроніки Харківського національного автомобільно-дорожнього університету.

Наукові інтереси:

- штучні нейронні мережі;
- нечіткі системи керування;
- цифрова обробка сигналів.

БОРОДЕНКО Юрій Миколайович – кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри автомобільної електроніки Харківського національного автомобільно-дорожнього університету.

Наукові інтереси:

- математичне моделювання;
- діагностичні системи.

ДЗЮБЕНКО Олександр Андрійович – аспірант кафедри автомобільної електроніки Харківського національного автомобільно-дорожнього університету.

Наукові інтереси:

- методи вимірювання неелектричних величин;
- моделювання мехатронних систем.

Серіков С.А., Бороденко Ю.М., Дзюбенко О.А. Нечітка модель системи керування силовою установкою гібридного автомобіля

Сериков С.А., Бороденко Ю.Н., Дзюбенко А.А. Нечеткая модель системы управления силовой установкой гибридного автомобиля

Serikov S.A., Borodenko Yu.N., Dzubenko A.A. Fuzzy model of a control system of power device of the hybrid automobile

УДК 681.5

Нечітка модель системи керування силовою установкою гібридного автомобіля / С.А. Серіков, Ю.М. Бороденко, О.А. Дзюбенко

Розглянуто концепцію створення автоматичної системи керування агрегатами гібридного автомобіля в термінах нечіткої логіки, представлено ієрархічну структуру системи, наведено результати моделювання в Simulink.

УДК 681.5

Нечеткая модель системы управления силовой установкой гибридного автомобиля / С.А. Сериков, Ю.Н. Бороденко, А.А. Дзюбенко

Рассмотрена концепция построения автоматической системы управления агрегатами гибридного автомобиля в терминах нечеткой логики. Представлена иерархичная структура системы. Приведены результаты моделирования в Simulink.

УДК 681.5

Fuzzy model of a control system of power device of the hybrid automobile / S.A. Serikov, Yu.N. Borodenko, A.A. Dzubenko

The concepts creation of an automatic control system of aggregates of the hybrid automobile in the terms of fuzzy logic is considered. The hierarchical structure of system is submitted. The results of Simulink modeling are given.