

Бороденко Ю.М., к.ф-м.н., Серіков С.А., к.т.н., Смирнов О.П., к.т.н.

ХНАДУ, м. Харків

СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ГІБРИДНОЮ СИЛОВОЮ УСТАНОВКОЮ З ПНЕВМОДВИГУНОМ

Розглянуто питання, пов'язані з побудуванням системи розподілу потужності між силовими агрегатами гібридної установки. Приведено результати розробки системи керування.

Вступ

Забруднення шкідливими речовинами повітря великих міст викликає дуже серйозну тривогу не тільки екологів, але й всього людства. Зменшення запасів нафти та газу, постійне подорожчання автомобільного палива змушує виробників транспортних засобів вести активні пошуки альтернативних екологічно чистих джерел енергії.

Існує декілька підходів до створення екологічно чистих транспортних засобів: удосконалення конструкції та конвертація ДВЗ, розробка гнучких систем керування, використання електроприводу або кріогенних двигунів на рідинному азоті. В даній статті, як екологічно чистий, розглядається пневматичний двигун, який встановлюється як допоміжний агрегат гібридної силової установки автомобіля.

Аналіз досліджень та публікацій. На сьогоднішній день практично всі провідні виробники автотранспортних засобів почали випускати на ринок свої гібридні автомобілі [1]. Перші сучасні серійні електро-бензинові гібридні автомобілі розробили японські компанії Toyota (Toyota Prius) та Honda (Honda Insight) в 1997-98 роках. Компанія MDI (Motor Development International) запропонувала двигуни системи CAT's (Compressed Air Technology systems), які використовуються в міських пневмомобілях CityCAT's Taxi та MiniCAT's з 1998 року. Південнокорейський автомобіль PHEV (Pneumatic hybrid electric vehicle) фірми Energene має гібридну силову установку з пневматичним та електричним двигунами.

Дане дослідження є логічним продовженням робіт авторів в галузі створення екологічно чистих транспортних засобів та систем керування гібридними силовими установками автомобіля [1-4].

Постановка задачі

Основним завданням системи автоматичного керування (САК) силової установки гібридного автомобіля є забезпечення найбільш економічного й екологічно безпечного режиму роботи ДВЗ за рахунок перерозподілу навантаження між ДВЗ та пневмодвигуном. Додатковими завданнями САК є забезпечення необхідної розгонної динаміки та режиму старт - стоп з мінімальним періодом холостого ходу ДВЗ у випадку короткочасних зупинок транспортного засобу. Для відпрацювання оптимальних керуючих впливів й алгоритмів керування агрегатами трансмісії в макетному зразку САК треба передбачити можливість примусового керування виконавчими пристроями й контролю поточних режимів.

Для реалізації САК треба підібрати периферійні пристрої та мікроконтролер електронного блоку керування, виготовити макетний зразок системи та розробити програмне забезпечення для реалізації алгоритмів керування.

Основна частина

Об'єкт керування. Привід автомобіля від ДВЗ і пневмодвигуна здійснюється незалежними зчепленнями окремо на передні й задні колеса. У якості основного обраний інжекто-

рний ДВЗ, конвертований під газове паливо. Дросельний вузол двигуна доповнений електроприводом дросельної заслінки (кут положення β).

Пневмотрансмісія складається з балона зі стисненим повітрям, пневмомагістралі, редуктора тиску керування, модулятора тиску, пневмодвигуна, механізму зчеплення валу пневмодвигуна з механічною передачею обертаючого моменту на колеса автомобіля. Пневмодвигун (ПД) побудовано на базі двигуна автомобіля ЗАЗ зі змінним колінчастим валом й механічним розподільником стисненого повітря по циліндрах. Балони постачені понижуючим редуктором з електроклапаном відсічення подачі повітря в магістраль. Регулювання частоти обертання валу пневмодвигуна здійснюється за рахунок зміни тиску в пневмомагістралі P за допомогою електропневматичного модулятора тиску (МТ). Механізм зчеплення, виконаний як електропневмопривод дискретної дії.

Функціональна схема системи керування. Алгоритм керування силовими агрегатами пояснюється функціональною схемою (рис. 1).

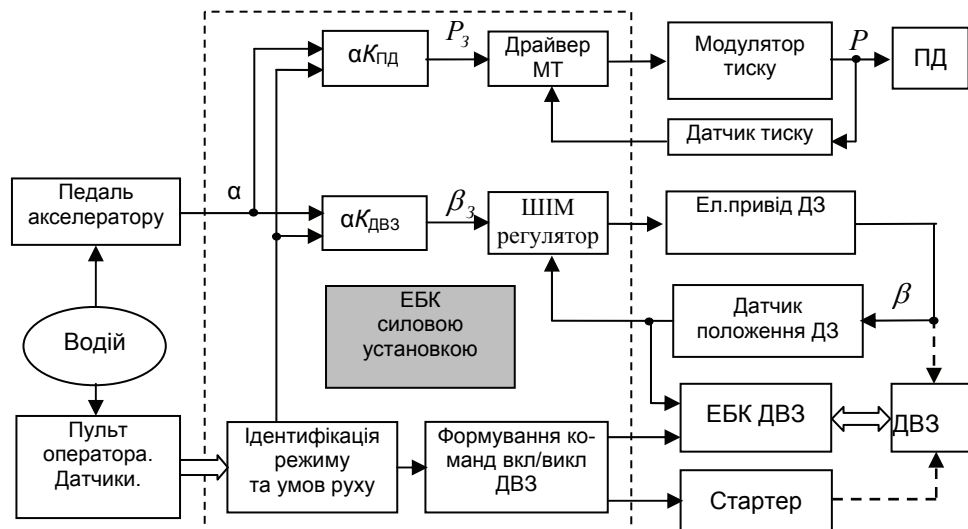


Рис. 1. Функціональна схема керування гібридною силовою установкою

По кожному каналу керування як вихідні розглядаються два сигнали. Перший сигнал α , загальний для обох каналів, задається з педалі акселератора й відповідає бажаному збільшенню потужності за рахунок підвищення тиску та відкриття дроселя. Другий – формується на підставі ідентифікації стану й режимів силової установки на підставі інформації з датчиків або задається примусово оператором. Цей сигнал визначає коефіцієнт участі кожного силового агрегату $K_{ПД}=0\dots P_{\max}/\alpha_{\max}$, $K_{ДВЗ}=0\dots \beta_{\max}/\alpha_{\max}$ при передачі потужності на колеса автомобіля. При цьому виконується умова $K_{ПД} + K_{ДВЗ} = 1$. Задані значення керуючих сигналів відповідно становлять $P_3 = \alpha K_{ПД}$, $\beta_3 = \alpha K_{ДВЗ}$.

Сигнал P_3 , модифікований через драйвер, подається на модулятор тиску, який реалізує керуючий вплив на пневмодвигун. Для стійкості процесу регулювання тиску, канал керування охоплено негативним зворотним зв'язком (датчик тиску на виході МТ).

В електроприводі дросельної заслінки використовується електродвигун постійного струму, тому в якості драйверу обрано найбільш економічна схема ШІМ регулятора (регулювання струму за рахунок широтно-імпульсної модуляції). Система, що відслідковує положення дросельної заслінки, утворена через відповідний датчик.

За результатами ідентифікації стану силової установки формуються команди, що забезпечують режим «старт-стоп» і роботу ДВЗ на потужносних режимах. При цьому як об'єкти керування розглядаються стартер (СТ) та електронний блок керування (ЕБК ДВЗ). Таким чином, створено ієрархічну структуру системи. На верхньому рівні ієрархії здійснюється керування перерозподілом потужності між силовими агрегатами. На нижньому – реалізуються локальні системи керування та окремі регулятори.

Структурна схема системи керування. Для відлагодження алгоритмів керування силовими агрегатами на першому етапі розробки режими ДВЗ й автомобіля задаються від штатних органів керування, а режими пневмотрансмісії-оператором з пульта. В такому разі до складу САК силової установки окрім виконавчих пристроїв входять датчики штатної системи керування ДВЗ, додаткові датчики пневмотрансмісії та блок інтерфейсу оператора (рис. 2).

Функціональні зв'язки між інформаційними сигналами датчиків та виконавчими пристроями, а також динамічні властивості агрегатів силової установки є підставою для побудовання алгоритмів керування. Для реалізації алгоритмів керування програмою контролера виконуються операції логічних перетворень та використовуються характеристичні карти заздалегідь визначених значень керуючих сигналів (впливів). Змістовність характеристичних карт визначається в процесі випробувань силової установки та поновлюється в пам'яті мікропроцесора системи через інтерфейс оператора. Таким чином створюється калібрувальна інформація, необхідна для оптимізації режимів функціонування силових агрегатів.

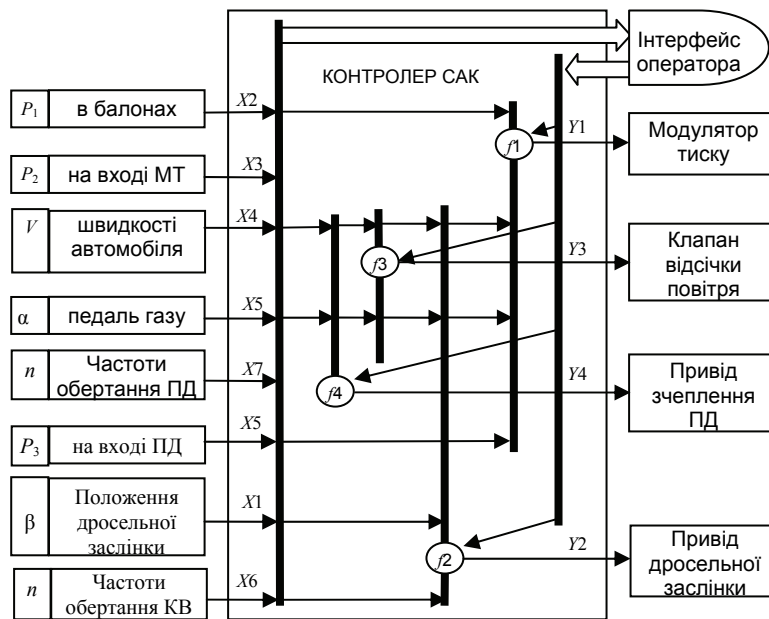


Рис. 2. Структурна схема системи керування

Програмно-апаратна реалізація системи. Вихідними даними для вибору периферійних пристроїв є: функціональні параметри, напруга живлення, робоча температура, стійкість до вібрації й агресивного середовища, точність або дискретність виміру параметра (для датчиків), точність відпрацювання керуючого впливу (для виконавчих пристроїв), вимоги до вихідного (для датчиків) або вхідного (для виконавчих пристроїв) сигналу, габарити, вартість і можливість придбання.

За принципом дії, як датчик частоти обертання, обрано датчик Холлу із цифровим вихідним сигналом і торцевою поверхнею, що активізується. Такими атрибутами характеризується датчик фази, який входить до складу сучасних систем керування інжекторними ДВЗ з фазованим впорскуванням палива. Датчик має задовільні характеристики: нормований сигнал, живлення 5...15 В, діапазон робочих температур -40...+125 °С, номінальний робочий зазор 1,0...2,0 мм, мінімальну вартість, підключення через рознімання.

Для вимірювань тиску обрано п'єзорезистивні датчики фірми Honeywell. Датчики забезпечують точність виміру до 0,05 %. За результатами аналізу характеристик альтернативних типів обрано недорогий датчик типу MLH (тиск 20, 250 бар, різьбове сполучення 1/8, електричне сполучення Packard, пропорційний вихідний сигнал) з термокомпенсацією у діапазоні -40...+105 °С, калібрований, з поліпшеною електромагнітною сумісністю, малим ча-

сом відгуку, захистом від випадкової зміни полярності по колу живлення, жорсткими кліматичними умовами експлуатації.

У якості задатчика потужності пневмодвигуна та газового ДВЗ використовується псевдо педаль акселератора автомобіля Volkswagen Bora 1,8 Turbo. Датчик положення педалі акселератора складається з двох потенціометрів, опір яких змінюється протилежно: $\Delta R_1 = 660 \dots 1320 \text{ Ом}$, $\Delta R_2 = 1240 \dots 450 \text{ Ом}$. Псевдопедаль штатної системи автомобіля Volkswagen керує положенням дросельної заслінки за допомогою електродвигуна постійного струму. Максимальний струм, що споживає двигун при напрузі 5 В становить 2,0 А. Положення дросельної заслінки відслідковується за допомогою подвійного потенціометричного датчика, побудованого аналогічно датчику положення педалі акселератора.

Електроклапани, що працюють в статичних режимах (відсічення повітря, приводу зчеплення) уніфіковані з відповідним прохідним перетином. Клапани споживають відносно малий струм (опір обмотки 90 Ом) та мають обмежену швидкодію. Клапани модулятора тиску, які функціонують в динамічному режимі, оцінюються за часом спрацьовування. За результатами аналізу обрані уніфіковані клапани фірми Camozzi з напругою живлення 12 В (опір обмотки 60 Ом). Таким чином за результатами аналізу характеристик обрані конкретні типи периферійних пристроїв (табл. 1, рис. 3).

Таблиця 1

Перелік обраних периферійних пристроїв

Призначення пристрою	Вхідний (вих.) параметр	Точність вимірювань	Тип	Рис. 3
Датчик швидкості руху автомобіля	$V_{\max} = 150 \text{ км/год}$ $V_{\min} = 0 \text{ км/год}$	2 км/год	Сигнал від ЕБК ДВЗ	—
Датчик обертів пневмодвигуна	$n_{\max} = 1000 \text{ хв}^{-1}$ $n_{\min} = 0 \text{ хв}^{-1}$	5 хв ⁻¹	Датчик фази (Холла)	е
Датчик обертів ДВЗ	$n_{\max} = 6000 \text{ хв}^{-1}$ $n_{\min} = 600 \text{ хв}^{-1}$	10 хв ⁻¹	Сигнал від ЕБК ДВЗ	-
Датчик тиску повітря у балоні P_1	$P_{\max} = 25 \text{ МПа}$ $P_{\min} = 0,5 \text{ МПа}$	0,1 МПа	MLH250BSB02A Honeywell	а
Датчики тиску повітря в магістралі P_2, P_3	$P_{\max} = 4,5 \text{ МПа}$ $P_{\min} = 0,5 \text{ МПа}$	0,05 МПа	MLH300PSB01A Honeywell	а
Положення педалі акселератора α	0 - 100% $\Delta\alpha = 30^\circ$	5 %	Volkswagen Bora 1,8 Turbo	б
Клапан відсічки тиску балона	Ду18 $P_{\max} = 8 \text{ МПа}$	$U_C = 8 \text{ В}$ $U_{II} = 4 \text{ В}$	КОГ-18	г
Клапани МТ та приводу зчеплення	Ду8 $P_{\max} = 4 \text{ МПа}$	$U_C = 8 \text{ В}$ $U_{II} = 4 \text{ В}$	P00-303-P52 Camozzi	д
Дросельний вузол з ел.приводом	$\beta = 0 - 100\%$	5%	Volkswagen Bora 1,8 Turbo	в

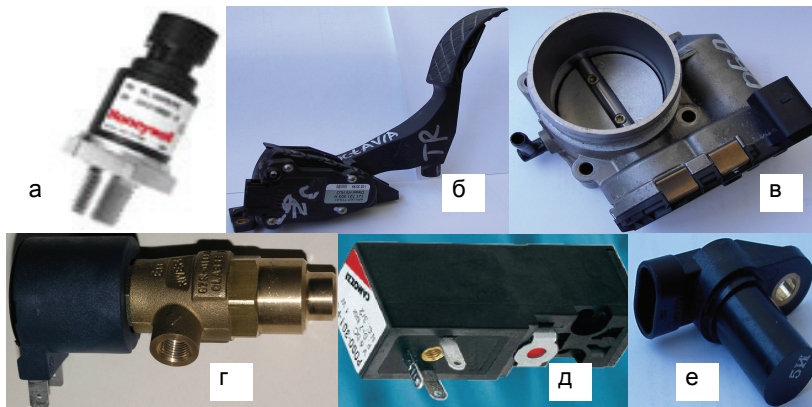


Рис. 3. Периферійні пристрої електронного блоку системи керування

Модулятор тиску безперервної дії (пневматичний підсилювач) з дискретним керуванням виконано на базі гальмівного крану з електроклапанами (рис. 4, а). Привод зчеплення дискретної дії виконано на базі пневмоприводу заслінки сповільнювача (система гальмування двигуном) з перемикаючим електроклапаном (рис. 4, б).

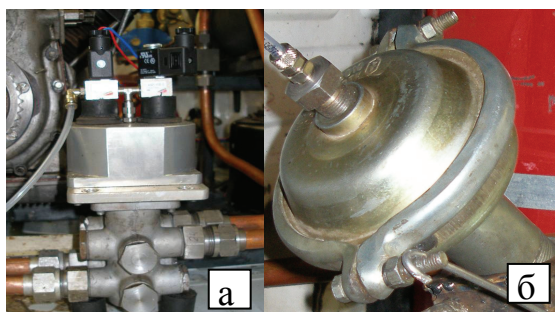


Рис. 4. Виконавчі пристрої пневмотрансмісії

Мікропроцесорний блок створюється на базі мікроконтролера фірми Silicon Laboratories. З метою мінімізації номенклатури покупних виробів тип мікроконтролеру C8051F040 обрано такий же як і для системи керування газовим ДВЗ гібридної установки. Обраний мікроконтролер забезпечує продуктивність до 25 MIPS. Енергонезалежна FLASH-пам'ять програм, обсягом 64 кВ може програмуватися «у системі», тобто на платі. При цьому в FLASH-пам'ять крім програм, можуть записуватися й дані, які, у такому випадку, стають енергонезалежними. Цей механізм дозволяє зручно завантажувати й зберігати характеристичні карти й інформацію про поточні настроювання системи керування. Обсяг оперативної пам'яті становить 4352 байта. Вбудована автономна система (JTAG), дозволяє проводити налагодження програмного забезпечення і корекцію характеристичних карт. Наявність убудованих 12-бітового 13-канального АЦП продуктивністю до 100 ksp/s й 8-бітовою 8-канального АЦП продуктивністю до 500 ksp/s, підсилювачів із програмувальним коефіцієнтом підсилення, 12-бітового 2-х канального ЦАП, 5-и 16-бітних таймерів-лічильників загального призначення й 5-канального 16-бітного програмувального таймер-лічильника з модулем захвата/порівняння дозволяє організувати ефективний алгоритм збору й обробки інформації. Мікроконтролер має убудований CAN - інтерфейс версії 2.0 В, що стає стандартом інформаційних мереж в автомобільній промисловості. Два убудованих UART дозволяють організувати обмін інформацією з персональним комп'ютером по інтерфейсу RS-232 або USB. Для живлення мікроконтролера використовується вторинний стабілізатор напруги 4,75...7,0 В/3,3 В, який у свою чергу живиться від первинного стабілізатора 15,0...30,0 В/5,0 В.

На першому етапі створення системи коефіцієнт участі приводів визначається оператором з пульта. На рис. 5 показано функціональну схему керування модулятором тиску в магістралі пневмодвигуна та діаграму, що пояснює алгоритм керування клапанами.

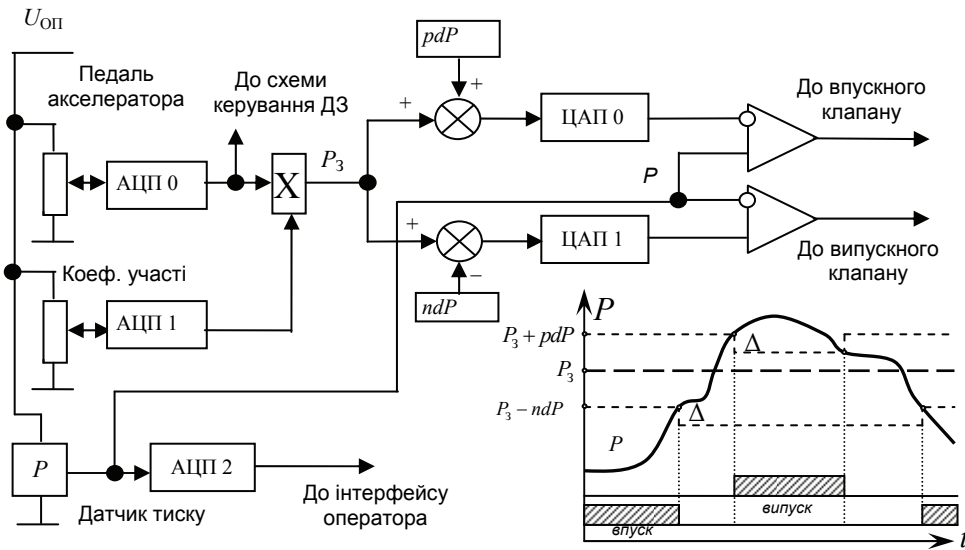


Рис. 5. Функціональна схема керування тиском в магістралі пневмодвигуна

Аналогові сигнали від педалі акселератора і задатчика коефіцієнта участі перетворюються до цифрового вигляду (АЦП) й перемножуються на програмному рівні. Цифровий код, що відповідає заданому тиску P_3 нормується по двосторонньому обмеженню. Граничні значення тиску перетворюються до рівнів аналогових сигналів (ЦАП) та надходять на схему порівняння по двосторонньому обмеженню, яка реалізована на компараторах. Поточне значення тиску P реєструється датчиком на виході модулятора та надходить на схему порівняння, як вимірювана величина. Щоб виключити дрижкіт вимірювань поблизу граничних рівнів задається поріг повернення Δ . Такий підхід дозволяє отримати задовільну швидкодію клапанів модулятора. Утворена система, що слідкує за тиском, дозволяє втримувати рівень тиску на виході модулятора в коридорі заданих значень. Модифікований сигнал положення акселератора використовується для керування дросельною заслінкою газового ДВЗ. Робочі програми для визначених алгоритмів керування й контролю складені на мові АСЕМБЛЕР.

Отримані результати. На даний час підібрано комплектацію системи, виготовлено електронний блок керування (рис. 6 а), розроблено програми керування модулятором тиску та контролю поточних параметрів через інтерфейс оператора, встановлено систему на силову установку автомобіля (рис. 6 б; рис. 7), проведено функціональні випробування системи та силової установки.

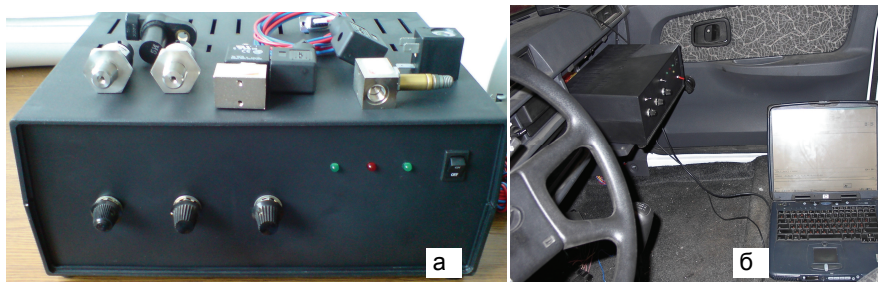


Рис. 6. Електронний блок керування

Експериментальні дослідження проводились в ХНАДУ на базі автомобіля ЗАЗ-110550 з типом кузова «пікап». Вибір вантажно-пасажирського варіанта кузова автомобіля пов'язано

ний з тім, що в кузові зручно розташовувати додаткове обладнання пневматичної силової установки та вимірювальну апаратуру (рис. 7)

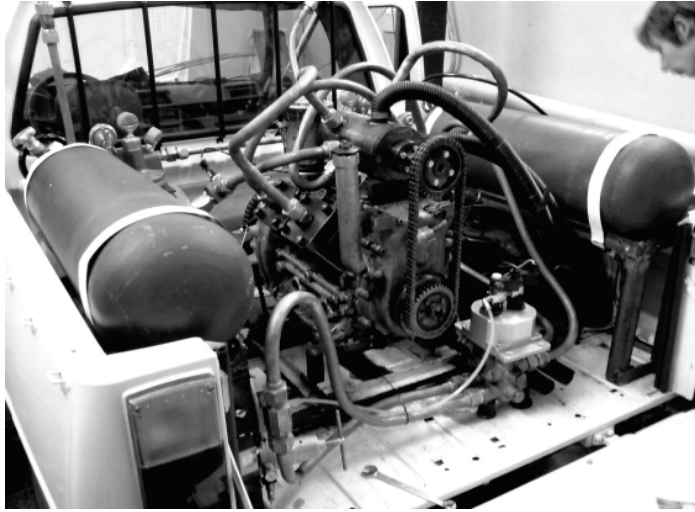


Рис. 7. Розташування пневматичної силової установки в кузові автомобіля

В даному дослідженні проведена розробка алгоритмів керування гібридною силовою установкою автомобіля на базі пневмопривода та ДВЗ, визначено вибір периферійних пристроїв електронного блоку системи керування та мікроконтролера, створено програмне забезпечення мікропроцесорного блоку керування та проведені експериментальні дослідження гібридної силової установки безпосередньо на транспортному засобі, які показали, що для розгону автомобіля до швидкості 20 км/год можна використовувати силову установку на базі пневмодвигуна.

Список літератури

1. Бажинов О.В., Смирнов О.П., Серіков С.А., Гнатов А.В., Колесніков А.В. Гібридні автомобілі. — Харків: ХНАДУ, 2008. — 327 с.
2. Бажинов А.В., Бороденко Ю.Н., Серіков С.А., Дзюбенко А.А. Система управління пневмотрансмісией гібридного автомобіля // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. — Луганськ: СХУ. — 2007. — № 6(112). — С. 11-14.
3. Смирнов О.П. Синергетичний підхід до створення силової установки автомобіля // Вестник ХНАДУ: Сб. науч. трудов. — Харьков: РИО ХНАДУ. — 2007. — Вып. 37. — С. 131-133.
4. Смирнов О.П., Калмиков В.І., Характерні режими роботи гібридної силової установки автомобіля // Автомобільний транспорт: Сб. науч. тр. — Харьков: РИО ХНАДУ. — 2006. — Вып. 18. — С. 13-15.

Стаття надійшла до редакції 04.06.08

© Бороденко Ю.М., Серіков С.А., Смирнов О.П., 2008