

УПРАВЛІННЯ СМУГОВИМ ЧАСТОТНО-ЗАЛЕЖНИМ КОМПОНЕНТОМ ІНФОРМАЦІЙНО-УПРАВЛЯЮЧОЮ СИСТЕМОЮ ДЛЯ УСУНЕННЯ ДЕТОНАЦІЇ ДВИГУНА ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРАННЯ

Ухіна Г., Теплечук А., Кірьязов Ю., Ситніков В.

У роботі розглянуті підходи усунення детонації двигуна внутрішнього згорання. Виявлено недолік базових рішень, для підвищення ефективності та економічності системи запропоновано використовувати систему керування на основі зміни коефіцієнта надлишку повітря.

Це дозволило зменшити апаратні витрати, габаритні розміри, і як наслідок зменшити собівартість системи в цілому. Головні переваги цієї системи: універсальність, підвищення економічності двигуна і використання одного смугового цифрового фільтру. Ідея керування при зміні коефіцієнта надлишку повітря полягає у наступному.

При появі детонації система керування збільшує коефіцієнта надлишку повітря, це переводить роботу двигуна в режим збіднення робочої суміші. При цьому виникає падіння потужності двигуна, що призводить до зниженню навантаження на двигун, що приведе не тільки до зникнення детонації, а і до економії палива і зниженню CO, NOX та СН. Оскільки основною задачею смугового фільтрує розпізнавання детонації і власних шумів двигуна на різних частотах, знайдені формули для розрахунку нових значень коефіцієнтів цифрового смугового фільтру другого порядку. Таке рішення дозволило зменшити похибки при роботі блоку виділення детонації на початкових етапах зародження детонації, що дає змогу оперативніше приймати рішення на усунення небажаної детонації.

Ключові слова. Коефіцієнт надлишку повітря, датчики детонації, обробка сигналів, кут випередження запалювання, цифровий смуговий фільтр, перебудова коефіцієнтів фільтру.

ВСТУП

Сучасний стан розвитку гібридних та електричних автомобілів не знімає проблеми підвищення економічності бензинового двигуна внутрішнього згорання і зниження токсичних газів у вихлопах автомобіля, що є однією із важливих задач при розробці та експлуатації автомобіля. Несумісність цих показників приводить до ускладнення системи керування двигуном.

Підвищення економічності залежить від значення коефіцієнта надлишку повітря α [1]

де G_T – вага палива, яке подається у циліндри ДВЗ,

G_B – вага повітря, яке подається на такті впуску у циліндри ДВЗ,

L – стехіометричний склад пальної суміші (на 1 кг палива приходить 14,5 кг повітря).

Для роботи двигуна в режимі економічності палива коефіцієнт надлишку повітря α повинен мати значення $\alpha = 1,1 \div 2,0$, а для роботи двигуна в режимі повної потужності N_e^{\max} та максимального крутного моменту $M_e^{\max} - \alpha = 0,8 \div 0,9$, що підвищує ккд (η_e) двигуна. Однак при роботі двигуна в названих режимах при використанні неякісного палива в циліндрах з'являються режими згорання з високими швидкостями порядку (1000-2000) м/с, які приводять до зносу робочих поверхонь поршневої групи та газорозподільного механізмів [2-10], рис.1. Ці режими згорання, які одержали назву детонація, характеризуються наступними параметрами:

- швидкістю детонації;
- масовою швидкістю продуктів реакції за ударною хвильою;
- розподіленою температурою, тиском та густиною суміші безпосередньо за ударною хвильою;
- термодинамічними властивостями палива та його продуктів реакції, які залежать від фізико-хімічних властивостей.



Рис.1 – Наслідки детонації

ДЕТОНАЦІЯ ТА СПОСОБИ ЇЇ УСУНЕННЯ

Для вимірювання швидкості детонації використовують фотографічні камери, які дозволяють безперервно реєструвати переміщення полум'я газоподібних продуктів реакції та ударних хвиль, що виникають у середині та навколо заряду, який детонує. Це дозволяє вивчати процеси хімічних реакцій, які визивають детонації.

Для усунення цих режимів запропонуються різні підходи. Так, наприклад, є пропозиції охолоджувати паливноповітряну суміш перед подачі її до циліндрів двигуна [11], або обробляти цю суміш акустичною хвилею [12]. Але частіше цю проблему усувають за допомогою зменшення кута випередження запалювання або зменшення подачі палива. Так, наприклад, на рис. 2, показані індикаторні діаграми процесів у циліндрах двигуна внутрішнього згорання (ДВЗ).

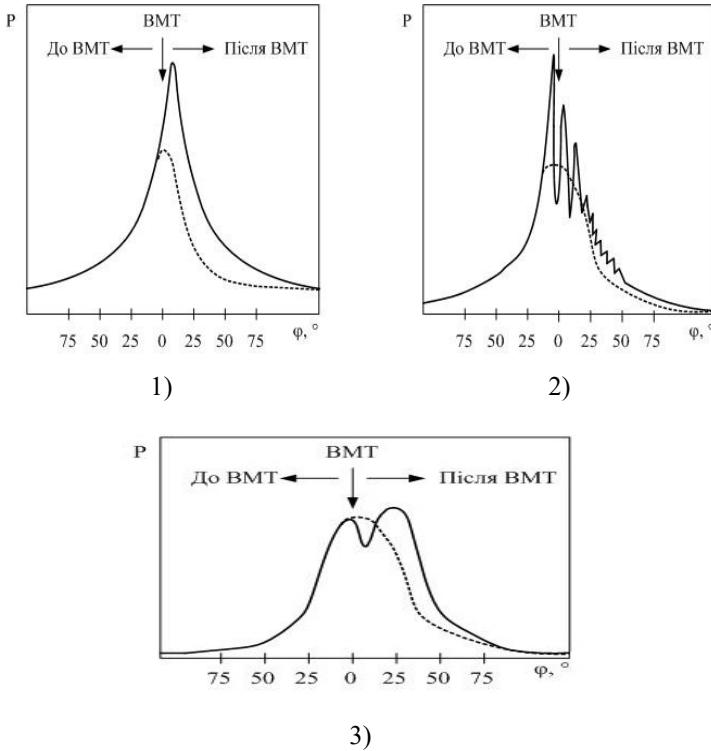


Рис. 2 – Індикаторні діаграми процесів у циліндрах ДВС
 1 – при оптимальному запалюванні; 2 – при згоранні з детонацією;
 3 – при пізньому запалюванні, де ВМТ – верхня мертва точка

У сучасних автомобілях використовують систему електронного керування упорскуванням – BOSH MotronicME7.1.1, що дозволяє реалізувати високу потужність двигуна W12 при мінімальних витратах пального за рахунок узгодження режимів його роботи з умовами експлуатації. Електронне регулювання кута випередження запалювання узгоджується з сигналами від датчиків детонації, яких встановлюється

чотири штуки на дванадцять циліндрів, рис.3. По цим сигналам електронний блок управління двигуном розпізнає циліндр, що детонує.

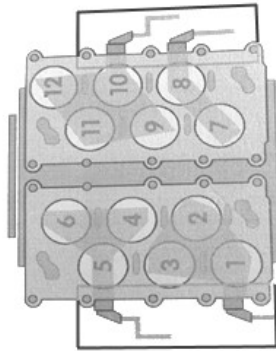


Рис. 3 – Схема встановлення датчиків детонації на блоці циліндрів двигуна W12.

В загальному випадку датчик детонації встановлюється [10] на блоці циліндрів і розпізнає коливання [5], які виникають при детонації. Обробка цих сигналів у електронному блоці керування дозволяє, в залежності від ступеня детонації, виробляти команди на зміну кута випередження запалювання. Загальна структурна схема системи контролю детонації, яка використовується у цих системах, наведена на рис. 4.

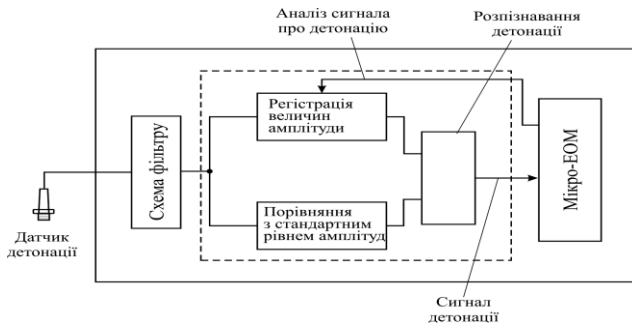


Рис. 4 – Структурна схема системи контролю детонації

Для детонації характерна поява у високочастотній частині спектру частот складової з високою амплітудою, рис. 2, яка виділяється за допомогою смугового фільтру. Шляхом віднімання поточного сигналу і середньої величини амплітуди сигналу датчика при відсутності детонації виконується розпізнавання детонації. Ступінь детонації визначається підрахунком числа амплітуд, величина яких перевищує стандартну

величину, характерну для початку детонації. Після розпізнавання детонації в залежності від її ступеня проводиться зменшення кута випередження запалювання. Якщо після цього детонація зникає, кут випередження запалювання поступово підвищується, тобто керування кутом випередження запалювання проводиться таким чином, щоб він був близький до детонаційного краю [2].

У стандартних блоках керування двигуном, автомобілів Impreza (концерн Subaru) реалізована активна система регулювання, яка дозволяє в нормальному режимі роботи двигуна вносити в кут випередження запалення поправки величиною приблизно від 3° до $+12^\circ$. Так, для турбированих двигунів нові блоки керування здатні оперувати істотно великими поправками. Застосування аналогових систем керування та мікросхем на їх основі не дозволило підвищити перешкодозахищеність та якість керування. Для підвищення цих показників використовують комбіновані аналого-цифрові системи керування. Так, наприклад, для виявлення детонації в двигунах внутрішнього згорання автомобільні концерни застосовують сигнальні процесори детонаційного шуму [13]. Ці процесори здійснюють аналогову обробку сигналів, але застосування цієї мікросхеми передбачає установку на її виході зовнішнього АЦП і мікроконтролера, який керує коефіцієнтами фільтрів мікросхеми та виробляє сигнали керування до системи запалювання (рис. 5).

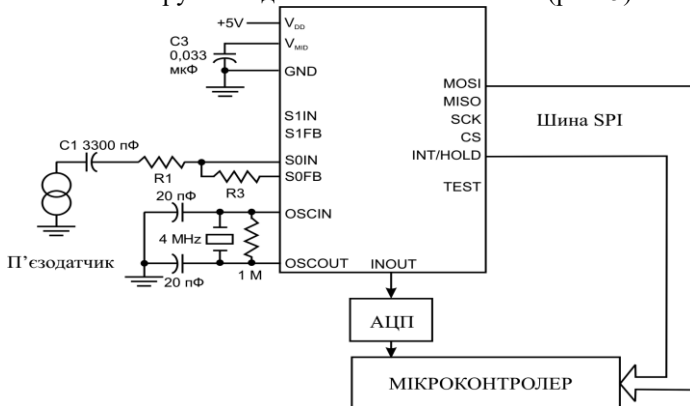


Рис. 5 – Схема системи контролю детонації на основі сигнального процесора детонаційного шуму HIP9010AB

Сигнал з датчика детонації в момент відсутності детонації надходить на один канал мікросхеми (для виявлення власних шумів двигуна), а в момент детонації сигнал надходить на інший канал мікросхеми. Обидва сигнали надходять на програмований інтегратор, у якому відбувається виділення сигналу детонації і його інтегрування. Підсилений сигнал надходить до АЦП, з виходу якого подається на

мікроконтролер. Мікроконтролер приймає інформацію, обробляє її і подає сигнали керування на електронний блок запалювання. Мікроконтролер змінює коефіцієнти фільтрів мікросхеми відповідно до частоти обертів колінчастого вала двигуна (рис. 6). Розглянуті вище рішення для усунення детонації ДВЗ базуються в основному на керуванні кутом випередження запалювання, як найбільш прості рішення, але не зовсім ефективні та економічні.

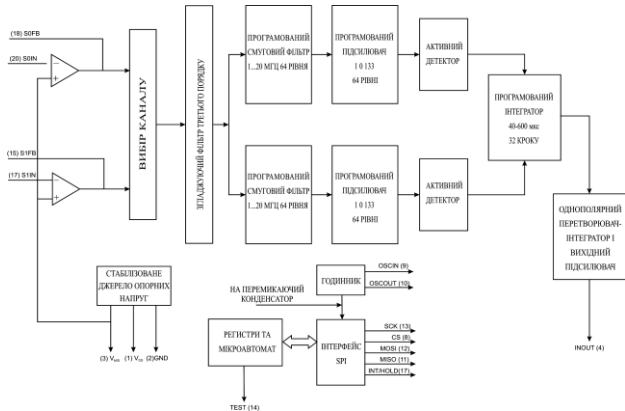


Рис. 6 – Структурна схема сигнального процесора NIP9010AB

УСУНЕННЯ ДЕТОНАЦІЇ НА ОСНОВІ ЗМІНИ КОЕФІЦІЄНТА НАДЛИШКУ ПОВІТРЯ

Сучасний розвиток спеціалізованих комп'ютерних та інформаційно-керуючих систем дозволяє побудувати іншу систему керування на основі зміни коефіцієнта надлишку повітря α . Розробка такої системи дозволила зменшити апаратні витрати, габаритні розміри, і як наслідок зменшити собівартість системи в цілому. Головні переваги цієї системи: універсальність, підвищення економічності двигуна і використання одного смугового цифрового фільтра.

Ідея керування при зміні коефіцієнта надлишку повітря α полягає у наступному. При появі детонації система керування збільшує α до $1,1 \div 2,0$, це переводить роботу двигуна в режим збіднення робочої суміші. При цьому виникає падіння потужності двигуна, що змусить водія перейти на нижчу передачу, а автомобіль, обладнаний автоматичною коробкою передач, зробить це сам не зменшуючи комфорту подорожі і тим самим знизити навантаження на двигун, що приведе не тільки до зникнення детонації, а і до економії палива і зниженню CO, NOX та CH.

При побудові такої системи спрощується її структурна організація, яка близька до типової, рис 7.

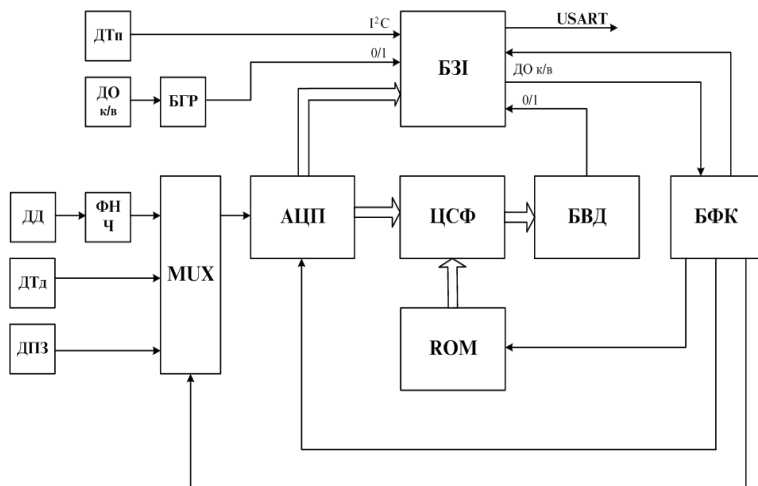


Рис. 7 – Структурна схема системи відстеження детонації

ДТп – датчик температури повітря; ДО к/в – датчик обертів колінчастого валу; ГР – блок гальванічної розв’язки; БЗІ – блок збору інформації; ДД – датчик детонації; ДТд – датчик температури двигуна; ДПЗ – датчик положення дросельної заслінки; MUX – мультиплексор; АЦП – аналого-цифровий перетворювач; ЦСФ – цифровий смуговий фільтр; БВД – блок виявлення детонації; БФК – блок формування команд; ROM – блок пам’яті.

За командами блока формування команд (БФК) мультиплексор (МПС) підключає до АЦП необхідний датчик і оцифрований сигнал надходить до блоку збору інформації (БЗІ). Після БЗІ всі дані зняті з датчиків в цифровому вигляді за протоколом USART подаються в пристрій обробки інформації. Таким чином, пристрій знімає дані з усіх датчиків, які використовуються загальною системою управління коефіцієнтом α та кутом випередження запалення.

Сигнал у цифровому вигляді з датчика детонації (ДД) надходить на вхід цифрового смугового фільтра (ЦСФ). Після фільтрації сигналу блок виявлення детонації (БВД) аналізує одержаний сигнал, і результат передає до блоку збору інформації (БЗІ). Застосування датчика обертів (ДО) і ДД дозволило точно встановити моменти виникнення детонації і моменти її відсутності. Це дало можливість застосувати цифровий фільтр, який у моменти відсутності детонації відстежує власні шуми двигуна, а в моменти прояву детонації – суму сигналів детонації та

власних шумів двигуна. Різниця цих значень дозволяє виявити наявність детонації. Слід відмітити, що смуговий фільтр повинен відстежувати частоту обертів колінчастого вала двигуна. У цьому випадку є проблема в побудові смугового фільтру що перебудовується.

ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ І СТРУКТУР ЦИФРОВОГО ФІЛЬТРУ

Оскільки основною задачею смугового фільтрує розпізнавання детонації і власних шумів двигуна на різних частотах, то чим точніше задані коефіцієнти передавальної функції ЦСФ, тим точніше фільтр виділить сигнал, зв'язаний з детонацією. Тому найбільша увага приділялась дослідженню властивостей і структур цифрового фільтру при відстеженні частоти обертів колінчастого валу, що пов'язано зі змінами коефіцієнтів передавальної функції. Передавальна функція ЦСФ має вигляд:

$$H(z^{-1}) = \frac{a_0 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + a_3 z^{-3} + a_4 z^{-4}}{1 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + b_3 z^{-3} + b_4 z^{-4}}$$

В роботі [10] запропоновано підхід на основі попереднього розрахунку з заданим кроком коефіцієнтів передавальної функції. В цьому випадку зовнішня пам'ять (ПЗУ) зберігає розраховані коефіцієнти цифрового фільтру, які по команді блоку формування команд (БФК) передаються на цифровий смуговий фільтр (ЦСФ). Діапазон робочих частот знаходиться в межах між $f_H = 20$ Гц та $f_B = 200$ Гц, при смузі пропущення (заданий крок) \square Гц. Слід відмітити, що ці параметри обумовлені режимами роботи двигуна і появою детонації. Так при частоті обертання колінчастого валу 600 об/хв (режим холостого ходу) центральна частота смугового фільтра дорівнює 20 Гц. В даному режимі роботи двигуна детонація неможлива (по визначенню) і система аналізує власні шуми двигуна. Так, для центральної частоти $f_0 = 100$ Гц і частоти дискретизації $f_d = 4000$ Гц цифровий смуговий фільтр має АЧХ H_{id} , яка наведена на рис. 7.

У даному діапазоні робочих частот необхідно розрахувати коефіцієнти для $N = \frac{f_B - f_H}{\Delta f} = \frac{200 - 20}{2} = 90$ фільтрів.

Така організація не дозволяє виконувати плавне регулювання. Тому проводились дослідження можливості плавної перебудові ЦСФ.

Однак, при плавному регулюванні можливі випадки виходу за межі стійкості фільтру [14].

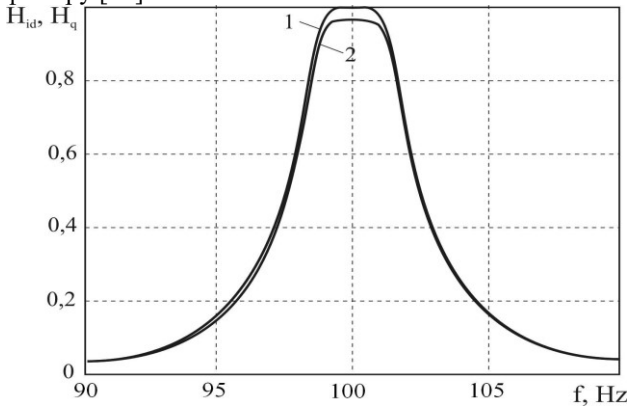


Рис. 8 – АЧХ смугового фільтру з ідеальними (1) та з округленими (2) коефіцієнтами на частоту $f_0 = 100$ Гц

Для зручності корекції частотної характеристики цифровий смуговий фільтр складається з двох смугових фільтрів Баттерворта першого порядку, які описуються передавальною функцією другого порядку. Для перебудови цифрового смугового фільтру другого прядку знайдені формули для розрахунку нових значень коефіцієнтів фільтру. Так, коефіцієнти знаменника b_1 та b_2 перераховуються від залежності частоті обертів колінчастого валу та необхідної смуги частот, яка налагоджується при підготовки двигуна. Так, коефіцієнт b_1 для частоти зрізу $\bar{\omega}_1$ визначається наступним чином

$$b_1 = -(1 + b_2) \cos(\bar{\omega}_1) + (1 - b_2) \sin(\bar{\omega}_1) \frac{\sqrt{1 - c^2}}{c}. \quad (1)$$

На основі частот зрізу смугового фільтру є можливість визначити величину коефіцієнту знаменника b_2 як

$$b_2 = \frac{(\cos(\bar{\omega}_2) + \cos(\bar{\omega}_1)) - 2c^2 \cos(\bar{\omega}_2) - 2c\sqrt{1 - c^2} \sin \cos(\bar{\omega}_2)}{(\cos(\bar{\omega}_2) + \cos(\bar{\omega}_1)) - 2c^2 \cos(\bar{\omega}_1) - 2c\sqrt{1 - c^2} \sin \cos(\bar{\omega}_1)}. \quad (2)$$

Однак, для реалізації таке представлення залежностей коефіцієнтів знаменника b_1 та b_2 від частот зрізу і рівня пульсації c не зовсім вдале

для реалізації на мікропроцесорній техніці. Введемо деяку фіктивну величину ξ так, щоб $c = \cos\left(\frac{\xi}{2}\right)$, або фіктивна величина дорівнює $\xi = 2\arccos(c)$. В цьому випадку, співвідношення для коефіцієнтів мають наступний вигляд

$$b_1 = -(1 + b_2)\cos(\bar{\omega}_1) + (1 - b_2)\sin(\bar{\omega}_1)\operatorname{tg}\left(\frac{\xi}{2}\right);$$

$$b_2 = \frac{2\cos(\bar{\omega}_2) + \cos(\bar{\omega}_1) - \cos(\bar{\omega}_2 - \xi)}{\cos(\bar{\omega}_2) + 2\cos(\bar{\omega}_1) - \cos(\bar{\omega}_1 - \xi)}. \quad (3)$$

Таким чином, аналіз АЧХ цифрових смугових фільтрів показує, що при розробці смугових цифрових частотно-залежних компонент в залежності від заданих частот зрізу і рівня пульсацій C можна однозначно знайти значення коефіцієнтів чисельника і знаменника.

Коефіцієнти, які представляються з обмеженою розрядністю, обрані так, щоб максимум зваженої різниці частотних характеристик ідеального та реального фільтрів був мінімальним.

Проведений аналіз дозволяє значно полегшити вирішення поставленого завдання розробки цифрових смугових частотно-залежних компонент інформаційно-управляючої комп'ютерної системи з можливістю корекції і перебудови характеристик компоненти і системи в цілому.

Для реалізації цифрового смугового фільтру обрана програмована логічна інтегральна схема (ПЛІС) SPARTAN3 XC3S400-4-PQ20S фірми Xilinx [15], та обраний мікроконтролер фірми ATMEL MEGA128, яка поєднує в собі аналогову та цифрову частини схеми.

Для мікроконтролера фірми ATMEL MEGA128 розроблений алгоритм та написана програма обробки датчиків та системи керування коефіцієнтом надлишку повітря α . Це дало змогу зменшити апаратну частину системи керування, так як усі датчики (рис. 7) підключаються до АЦП, який знаходиться у мікроконтролері, а також зменшити час обробки даних з АЦП тому, що він знаходиться на одній шині даних з процесором.

Для побудови цифрового фільтру другого порядку виконано каскадне з'єднання двох смугових фільтрів першого порядку. Це

зроблено для більш зручної настройки та перебудови фільтру в цілому. Граф фільтру наведено на рис. 9.

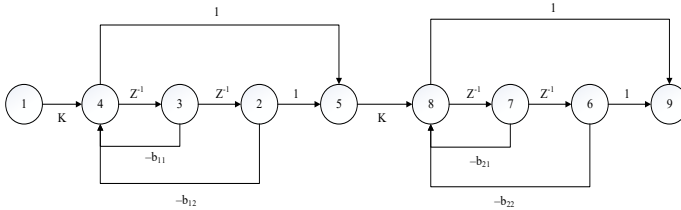
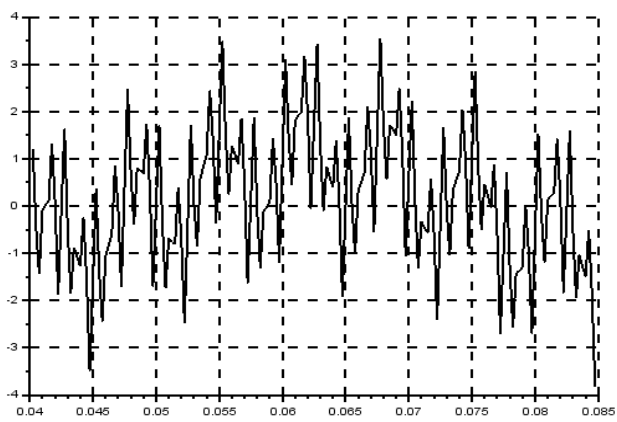


Рис. 9 – Сигнальний граф цифрового смугового фільтру другого порядку побудованого на основі каскадного з'єднання смугових фільтрів першого порядку

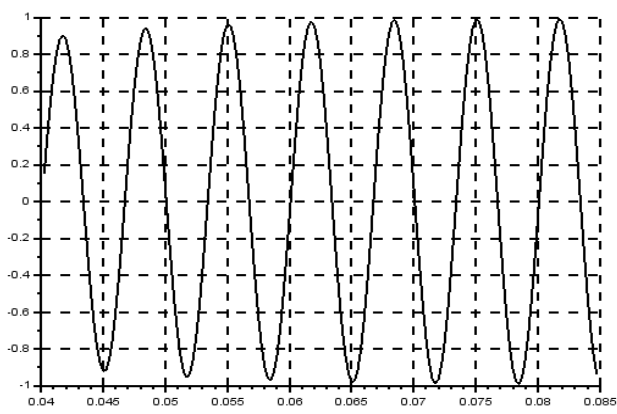
На основі сигнального графу складена система рівнянь роботи фільтру на основі якої побудовано алгоритм обчислень:

$$\begin{aligned}
 x_1[i] &= s(i); \\
 x_2[i] &= x_3[i-1]; \\
 x_3[i] &= x_4[i-1]; \\
 x_4[i] &= Kx_1[i] - b_{12}x_2[i] - b_{11}x_3[i]; \\
 x_5[i] &= x_2[i] + x_4[i]; \\
 x_6[i] &= x_7[i-1]; \\
 x_7[i] &= x_8[i-1]; \\
 x_8[i] &= Kx_5[i] - b_{22}x_6[i] - b_{21}x_7[i]; \\
 x_9[i] &= x_6[i] + x_8[i].
 \end{aligned}$$

Фрагмент моделювання даного фільтру показано на рис. 10



а)



б)

Рис 10 – Фрагмент вхідного (а) та вихідного (б) сигналів цифрового смугового фільтру з центральною частотою $f_0 = 150$ Гц

ВИСНОВКИ

При обробці сигналів датчиків у системі керування коефіцієнтом надлишку повітря α таке рішення дозволило зменшити похибки при роботі блоку виділення детонації на початкових етапах зародження детонації, що дає змогу оперативніше приймати рішення на усунення небажаної детонації.

Крім того, при розробці такої системи вдалося зменшити апаратні витрати, габаритні розміри, і як наслідок зменшити собівартість системи в цілому. Головні переваги цієї системи: універсальність, підвищення економічності двигуна і використання одного смугового цифрового фільтру.

ЛІТЕРАТУРНІ ДЖЕРЕЛА

- [1] Акимов А.В., Акимов О.А. Электрооборудование автомобилей / Под ред. Ю.П. Чижкова. М.: Транспорт, 1999. – 384 с.
- [2] Почему детонирует двигатель. URL: <http://krutimotor.ru/detonaciya-topliva-v-dvigatеле/>
- [3] Детонация двигателя. URL: <http://krutimotor.ru/detonaciya-dvs/>
- [4] Причины детонации двигателя при выключении зажигания и запуске. URL: <https://znanieavto.ru/dvs/detonaciya-dvigatelya.html>
- [5] Что такое детонация двигателя. URL: <https://pricurivatel.ru/detonaciya-dvigatelya.html>
- [6] Особенности технического обслуживания и диагностики электронных систем управления двигателем. URL: https://studref.com/423793/tehnika/osobennosti_tehnicheskogo_obs_luzhivaniya_diagnostiki_elektronnyh_sistem_upravleniya_dvigatелем
- [7] Детонация двигателя, датчик детонации. URL: <https://carspec.info/detonaciya>
- [8] Датчик детонации. URL: <http://krutimotor.ru/datchik-detonacii/>
- [9] Детонация в двигателях внутреннего сгорания. URL: <https://www.chem21.info/info/351591/>
- [10] Бадерко І.В., Дікусар К.В., Полонська Н.О., Ситніков В.С., Теплечук А.М. Електронне управління характеристиками бензинового двигуна внутрішнього згорання для усунення детонації. *Вісник Чернівецького ун-та: Комп'ютерні системи та компоненти*, 2011. – Т.2. – Вип. 1. – С. 92– 100.
- [11] Способы для предотвращения детонационного сгорания. Патент № RU 2636253. URL: <http://www.findpatent.ru/patent/263/2636253.html>
- [12] Способ предотвращения детонационного сгорания. Патент № RU 2146016. URL: <http://ru-patent.info/21/45-49/2146016.html>
- [13] Александр Зыбайло. Сигнальный процессор обнаружения детонации в двигателе внутреннего сгорания НР9010АВ. URL: http://www.compitech.ru/html.cgi/arhiv/00_04/stat_34.htm

[14] Ukhina H., Sytnikov V. Express-analysis of stability of fourth order frequency-dependent rearrangeable components International Conference on Electronics and Information Technology, EIT 2016 – Conference Proceedings 7500998

[15] Малахов В.П., Ситников В.С, Ядвичук П.В. Реализация элементов быстродействующего цифрового фильтра на ПЛИС. Технология и конструирование в электронной аппаратуре, 2004. – № 4. – С. 3 – 8.

FREQUENCY-FREQUENCY COMPONENT MANAGEMENT INFORMATION AND CONTROL SYSTEM TO REMOVE DETONATION OF ENGINE INTERNAL

Ukhina G., Teplechuk A., Kiryazov Y., Sitnikov V.

Approaches to eliminating internal combustion engine detonation are considered in the paper. A lack of basic solutions has been identified, and it is suggested to use a control system based on changes in the excess air factor to improve the efficiency and economy of the system. This made it possible to reduce hardware costs, overall dimensions and, as a consequence, reduce the cost of the system as a whole. The main system benefits are versatility, increased engine efficiency and the use of a single bandpass filter. The idea behind controlling the excess air ratio is as follows. When a detonation occurs, the control system increases the coefficient of excess air, this puts the engine into the lean mode. This results in a decrease in engine power, which leads to a decrease in the load on the engine, which will lead not only to the disappearance of detonation, but also to fuel savings and reduce CO, NOX and CH. Since the main purpose of the bandpass filter is to detect detonation and intrinsic motor noise at different frequencies, formulas have been found to calculate new values of second order digital bandwidth coefficients. The frequency response analysis shows that in the development of bandwidth digital frequency-dependent components, depending on the specified cutoff frequency and the level of ripple, you can uniquely find the values of the numerator and denominator coefficients. To construct a second-order digital filter, a cascade connection of two first-order bandpass filters is made. This is for easier setup and restructuring of the filter as a whole. A graph and the equations system of filter operation were constructed, on the basis of which the calculations algorithm was implemented. This solution made it possible to reduce the errors during the operation of the detonation unit at the initial detonation stages, which makes it possible to make a more promptly decision to eliminate unwanted detonation. In addition, the development of such a system managed to reduce hardware costs, overall dimensions, and as a consequence, reduce the cost of the system as a whole.

Keywords. Excess air ratio, detonation sensors, signal processing, ignition timing angle, digital bandpass filter, filter coefficients adjustment.