

НАЛАШТУВАННЯ МІКРОПРОЦЕСОРНОГО ПІД-РЕГУЛЯТОРА ШВИДКОСТІ ДЛЯ ЗАСТОСУВАННЯ НА АВТОМОБІЛЬНОМУ ДИЗЕЛІ

Лисовал А.А., доктор технічних наук, Національний транспортний університет, Київ, Україна, e-mail: li-dvz@bigmir.net. orcid.org/0000-0001-6168-4010

SETTING UP MICROPROCESSOR PID-REGULATOR OF SPEED FOR USE ON AUTOMOBILE DIESEL

Lisoval A.A., Doctor of Technical Science, National Transport University, Kyiv, Ukraine, e-mail: li-dvz@bigmir.net. orcid.org/0000-0001-6168-4010

НАСТРОЙКА МИКРОПРОЦЕССОРНОГО ПИД-РЕГУЛЯТОРА СКОРОСТИ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ НА АВТОМОБИЛЬНОМ ДИЗЕЛЕ

Лисовал А.А., доктор технических наук, Национальный транспортный университет, Киев, Украина, e-mail: li-dvz@bigmir.net. orcid.org/0000-0001-6168-4010

Постановка проблеми і аналіз останніх досліджень.

Мікропроцесорні ПІД-регулятори швидкості добре зарекомендували себе у якості систем автоматичного регулювання частоти обертання (САРЧ) колінчастого вала дизельних електростанцій. Особливість роботи електростанцій полягає у необхідності підтримувати постійне значення частоти обертання вала в умовах зміни навантаження на приводному двигуні. На відміну від колісних транспортних засобів (КТЗ), швидкісний режим приводного дизеля постійний.

Розробку і впровадження електронного керування кафедра двигунів і теплотехніки НТУ здійснює у співпраці з Інститутом газу НАН України. Спільно був створений мікропроцесорний всережимний регулятор з ПІД-алгоритмом керування на базі стандартних вузлів фірми Hainzmann. [1–3]. Від Інституту газу розробку і випробування проводив Вербовський О.В.

Налаштування ПІД-параметрів мікропроцесорного регулятора дизель-електростанції здійснили на номінальному швидкісному режимі (1500 хв^{-1} для електростанцій з 4-полюсними генераторами) при різних значеннях навантаження (5-7 точок). Для кожного режиму визначали значення ПІД-параметрів, які забезпечують найменшу амплітуду коливання частоти обертання колінчастого вала на номінальному режимі.

Для використання ПІД-регуляторів на дизелях КТЗ цієї методики недостатньо. Необхідно визначати значення ПІД-параметрів в широких межах швидкісного режиму ($800...3000 \text{ хв}^{-1}$ для дизелів вантажних автомобілів) і забезпечити якісні перехідні процеси для цього швидкісного діапазону. Можна здійснювати налаштування ПІД-параметрів САРЧ автомобільного дизеля в «ручному» режимі, як це рекомендують деякі виробники [3, 4].

На вибір ПІД-параметрів також впливають механічні складові САРЧ дизеля, які присутні у виконавчому механізмі (ВМ), перехідному вузлі між ВМ і рейкою ПНВТ. Механічні складові мають певні величини інерційності, сухого і в'язкого тертя, реагують на зовнішні збурення з різною чутливістю. До механічних складових можна віднести і вплив гідравлічного опору плунжерних пар на рейку ПНВТ і далі на ВМ. Істотний вплив на динаміку САРЧ здійснюють рухомі частини самого двигуна, тобто впливає інерційність дизеля як об'єкта регулювання. Впливає і нерівномірність крутного моменту.

Мета дослідження – розробка універсальних рекомендацій для налаштування ПІД-параметрів мікропроцесорної САРЧ автомобільного дизеля.

Це завдання вимагає проведення частини досліджень на математичній моделі. Розроблена математична модель всережимного електронного регулятора з ПІД-алгоритмом управління була опублікована раніше в праці [5]. Модель САРЧ разом з моделями дизеля, системи наддуву є динамічною [6]. Моделі були реалізовані в програмному комплексі Matlab/Simulink [7].

У статті наведені результати: моторних досліджень впливу ПІД-параметрів на стійкість роботи автомобільного дизеля; розрахунків на динамічній моделі впливу ПІД-параметрів на витрату палива при налаштуванні регулятора з урахуванням впливу випадкових зовнішніх вібрацій (коливань) різної амплітуди.

Розрахункові дослідження мікропроцесорної САРЧ, які враховують вплив зовнішніх вібрацій на стійкість роботи дизеля, були розпочаті ще на дворежимному мікропроцесорному регуляторі дизеля і опубліковані Костицею С.В. в праці [8]. У моделі всережимного регулювання низькочастотні зовнішні вібрації формує спеціальний програмний блок – генератор випадкових коливань [5].

Як об'єкт експериментальних досліджень обрано мікропроцесорна система регулювання автомобільного дизеля. Дизель оснащений газотурбінним наддувом. Паливна система обладнана рядним ПНВТ. Для досліджень САРЧ обрано автомобільний дизель 4ЧН12/14.

Результати попередніх налаштувань регулятора на дизелі.

Для випробувань дизеля 4ЧН12/14 з всережимним мікропроцесорним регулятором на основі вузлів фірми Hainzmann були обрані значення ПД-параметрів: П-складова дорівнює 5, І-складова – 10, Д-складова – 12. Значення ПД-параметрів представлені в безрозмірному виді для відповідних коефіцієнтів посилення. Вибір цих складових виконали за рекомендованою методикою налаштування в «ручному» режимі [4] і на підставі накопиченого досвіду налаштувань мікропроцесорних регуляторів для дизель-електростанцій. Ці значення ПД-параметрів далі використовували як еталонні.

В ході моторних досліджень перевірили правильність попередньо вибраних ПД-параметрів і оцінювали стійкість роботи двигуна при «миттєвій» зміні швидкісного режиму роботи. «Миттєвість» у мікропроцесорному регуляторі задається параметром налаштування – часом (темпом) переміщення важеля управління паливopoдачею від мінімального до максимального положення.

Встановлено, що зі зменшенням П-складової поліпшується стійкість роботи дизеля на низьких частотах обертання ($720 \dots 1000 \text{ хв}^{-1}$). На низьких частотах обертання колінчастого вала і при відсутності навантаження витрата палива відносно мала і великі значення П-складової істотно впливають на частоту обертання і можуть спричинити автоколивання САРЧ. Це пояснюється тим, що зі збільшенням П-складової збільшуються зусилля, які посилюють рух важеля ВМ. Коливання в 20 % від положення вала ВМ призводять до коливань рейки ПНВТ з амплітудою 4 мм.

Рекомендуємо в режимі мінімального холостого ходу і пуску автомобільного дизеля зменшувати П-складову (еталонну) в 2-2,5 рази.

Із збільшенням частоти обертання збільшуються і вібрації безпосередньо дизеля. Це вимагає збільшення зусиль утримання ВМ, і відповідно збільшення П-складової. Крім цього, збільшення П-складової зменшує час перехідного процесу.

Під час проведення моторних досліджень спостерігали зростання коливань вала ВМ, що призводило до некерованого коливання рейки ПНВТ. Зростання амплітуди коливань пов'язано зі збільшенням вібрацій корпусу дизеля внаслідок підвищення швидкісного режиму. При збільшенні частоти обертання колінчастого вала від холостого ходу до значень близьких до номінальних амплітуда коливань рейки ПНВТ збільшилася в 6...8 разів. Зростання амплітуди коливань може бути ознакою недостатньої потужності електродвигуна ВМ.

На рис. 1 показано цифровий запис перехідного процесу за стендових випробувань, де видно коливання рейки ПНВТ в зоні номінального режиму.

З графіків на рис. 1 визначили, що амплітуда коливань рейки ПНВТ за частоти обертання наближеної до номінальної досягала 1 мм. Подальші випробування показали, що значення амплітуди сягало 2 мм при збільшенні навантаження і за номінальної частоти обертання.

На підставі цього, для проведення досліджень на математичній моделі були прийняті значення вібрацій (коливань) рейки 0 мм, 1 мм, 2 мм і 3 мм. Значення амплітуди коливань в 3 мм додано спеціально для визначення загальних тенденцій впливу ПД-параметрів у випадку не оптимального налаштування САРЧ дизеля та коли невірно вибрано значення потужності ВМ.

Програма і результати теоретичних досліджень.

Для оцінки допустимого значення коливань рейки ПНВТ і для визначення їх впливу на раціональні значення ПД-параметрів розроблена наступна програма досліджень на математичній моделі:

- моделювання перехідних процесів дизеля при «миттєвому» підвищенні частоти обертання з кроком $100 \dots 300 \text{ хв}^{-1}$ від холостого ходу до номінальної;
- визначення витрати палива за різних значень ПД-параметрів регулятора і різних значень амплітуди зовнішніх вібрацій.

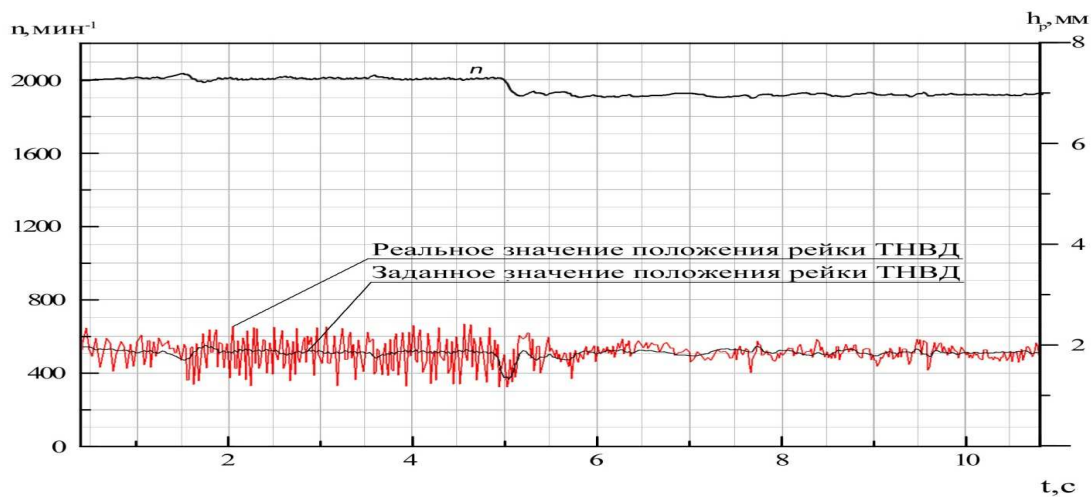


Рисунок 1 – Перехідні процеси при зміні частоти обертання з 2000 хв^{-1} до 1900 хв^{-1} :
 n – частота обертання колінчастого вала дизеля 4ЧН12/14, h_p – хід рейки ПНВТ.
 Figure 1 – Transient processes when changing the rotational speed from 2000 rpm to 1900 rpm:
 n – rotational speed of the engine crankshaft of diesel 4ЧН12/14, h_p – stroke rail of fuel pump.

Під час першого етапу по чергово змінювалися значення П-, І- і Д-складових в діапазоні, який забезпечував стійку роботу дизеля. Межі регулювання Д-складової вибирали за умови забезпечення не більше одного перерегулювання під час перехідних процесів. Для П-складової це були значення: 2, 5 і 13, для І-складової: 2, 10, 20, а для Д-складової відповідно: 2, 12, 25. Це дозволило визначити індивідуальний вплив кожної складової на стійкість роботи дізеля за зовнішнього впливу вібрацій.

Другий етап почали з моделювання розгонів дизеля від холостого ходу 1850 хв^{-1} за відсутності зовнішніх вібрацій. Час вимірювання витрати палива вибрали 12 с з розрахунку: 4 с на усталений режим до початку розгону; 4 с на сам перехідний процес; 4 с на усталений режим після розгону.

За відсутності зовнішніх вібрацій вплив налаштування ПД-параметрів в межах стійкої роботи дизеля на витрату палива незначний. Зміни ПД-параметрів істотно не вплинули на витрату палива. Суттєве збільшення витрати палива може бути спричинене неправильним налаштуванням І-складової за умови правильного вибору діапазону регулювань Д-складової.

Наступним етапом дослідження було визначення впливу налаштування ПД-параметрів на витрату палива за різних значень амплітуди вібрацій при «миттєвому» збільшенні частоти обертання від величини холостого ходу до значення 1850 хв^{-1} . Приклад графічного відображення результату моделювання розгону дизеля зі значенням вібрації 3 мм та еталонними ПД-параметрами показаний на рис. 2.

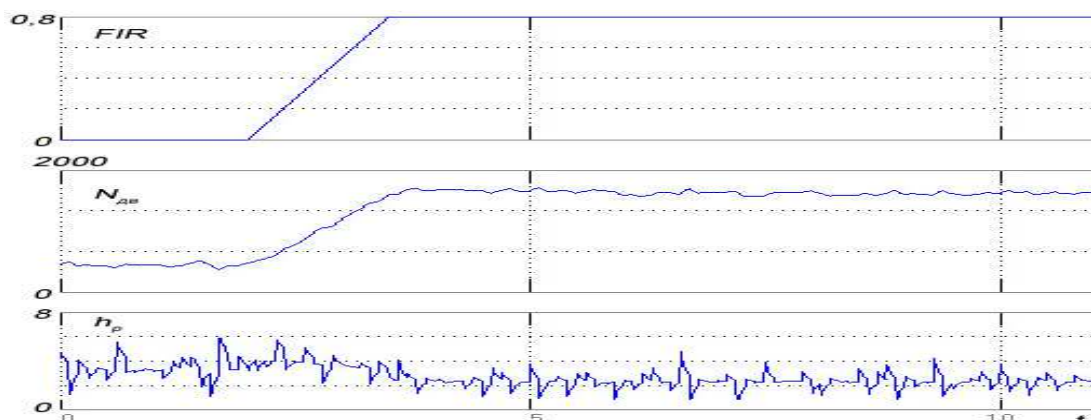


Рисунок 2 – Результати моделювання розгону дизеля зі значенням вібрації 3 мм: FIR – задатчик частоти обертання САРЧ, $N_{дв}$ – частота обертання колінчастого вала дизеля, h_p – хід рейки ПНВТ.
 Figure 1 – The results of a diesel acceleration simulation with a vibration value of 3 mm: FIR – setter of rotational speed of regulator, $N_{дв}$ – rotational speed of the engine crankshaft, h_p – stroke rail of fuel pump.

Визначені значення витрати палива відрізняються від аналогічних значень, отриманих за відсутності вібрацій. Це пояснюється тим, що першу частину часу перед перехідним процесом дизель працював за певного положення рейки ПНВТ, а частину часу після перехідного процесу – за іншого положення. Якби залежність циклової подачі палива від положення рейки ПНВТ була б лінійна, то вібрації рейки в бік збільшення і зменшення подачі компенсували б одна одну. Однак, ця залежність нелінійна і призводить до зміни витрати палива і, як наслідок, зростає роль налаштування ПІД-параметрів.

Витрату палива визначену за різних значень І- та Д-складової та різних значеннях амплітуди вібрацій показано на рис. 3.

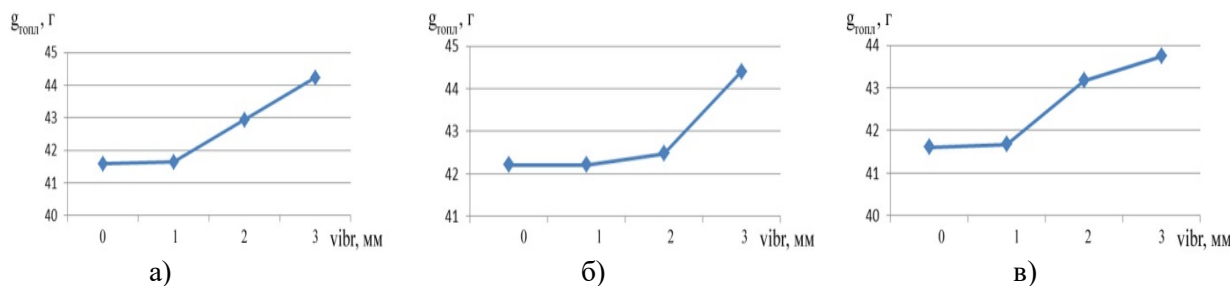


Рисунок 2 – Витрата палива за різних рівнів вібрацій і при:
а) П = 5, I = 10, Д = 12; б) П = 5, I = 2, Д = 12; в) П = 5, I = 10, Д = 25;
Vibr – значення амплітуди вібрацій, g_{топл} – витрата палива дизелем за 12 с.

Figure 1 – Fuel consumption at different levels of vibration and when:
а) P = 5, I = 10, D = 12; б) P = 5, I = 2, D = 12; в) P = 5, I = 10, D = 25;
Vibr – vibration amplitude value, g_{топл} – diesel fuel consumption for 12 s.

З рис. 3 видно, що зростання витрати палива зі збільшенням вібрацій відбувається нелінійно. Коли рівень вібрацій не перевищує 1 мм (включно) перевитрати палива не має. За малих (до 1 мм) і великих (понад 3 мм) амплітудах вібрацій зміна І-складової не впливає на витрату палива, однак за вібрацій в межах 1...3 мм зменшення І-складової приводить до зменшення витрати палива.

За результатами моделювання отримана економія палива 2,25 %. Зменшення витрати палива пов'язано із зменшенням коливань вала ВМ, і відповідно – зменшуються коливання рейки ПНВТ.

Висновки.

Для забезпечення стійкої роботи і якісних перехідних процесів дизелів КТС необхідно індивідуально проводити вибір ВМ та ПІД-параметрів для кожного модельного ряду двигунів з урахуванням умов їх експлуатації.

Робота на низьких частотах обертання вимагає малих значень П-складової, а з наближенням до номінального режиму необхідно збільшувати значення П-складової в 2-2,5 рази.

Вплив параметрів налаштування мікропроцесорного ПІД-регулятора дизеля на витрату палива відчувається в перехідних процесах. При малих (до 1 мм) і великих (понад 3 мм) амплітудах зовнішніх вібрацій зміна І-складової істотно не впливає на витрату палива. Коли вібрації становлять 1...3 мм, зменшення І-складової приводить до зменшення витрати палива.

За результатами моделювання перехідних процесів можлива економія палива при правильному налаштуванні ПІД-параметрів складала 2,25 %.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. HEINZMANN «Базовая информация по цифровому управлению» – К.: DG 95-105, 1997. – 72 с.
2. HEINZMANN «Цифровые регуляторы скорости» – К.: DG 95-105, 1997. – 49 с.
3. HEINZMANN «Базовая цифровая система PANDAROS II» – К.: DG 95-105, 1997. – 51 с.
4. Chowanietz E. Automobile electronics - Society of Automotive Engineers // E. Chowanietz. – 1995. – С. 246.
5. Лисовал А.А. Моделирование работы электронного ПИД-регулятора скорости двигателя внутреннего сгорания / А.А. Лисовал, А.В. Вербовский, Ю.А. Свистун // Двигатели внутреннего сгорания. – 2016. – №2. – С. 51–54.
6. Крутов В.И. Автоматическое регулирование и управление двигателями внутреннего сгорания / В.И. Крутов: учебник для студ. вузов, обучающихся по специальности «Двигатели внутреннего сгорания». – [5-е изд., перераб. и доп.]. – М.: Машиностроение, 1989. – 516 с.

7. Дьяконов В.П. MATLAB 6.5 SP1/7 + Simulink 5/6. Основные применения. Серия «Библиотека профессионала» / В.П. Дьяконов. – М.: СОЛОН-Пресс, 2005. – 800 с.
8. Костриця С.В. Вибір раціональних параметрів і розробка електронного регулятора частоти обертання дизеля: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: 05.05.03 / С. В. Костриця; Нац. трансп. ун-т. – Київ, 2014. – 20 с.

REFERENCES

1. HEINZMANN (1997), “Basic information on digital control” [“Bazovaya informatsiya po tcfrovomu upravleniu”], “DG 95-105 “, Kyiv, 72 p. [in Russian]
2. HEINZMANN (1997), “Digital speed controllers” [“Tcfrovue regulyatoru skorosty”], “DG 95-105 “, Kyiv, 49 p. [in Russian]
3. HEINZMANN (1997), “ Basic digital system PANDAROS II” [“Tcfrovue regulyatoru skorosty”], “DG 95-105 “, Kyiv, 51 p. [in Russian]
4. Chowanietz E. (1995), Automobile electronics – Society of Automotive Engineers // E. Chowanietz. – p. 246.
5. Lisoval A.A., Verbovskiy A.V., Svistun U.A. (2016), “Modeling the operation of the electronic PID speed controller of the internal combustion engine” [“Modelirovanie raboty elektronnoho PID-regulyatora skorosti dvigatelya vnutrennego sgoraniya”], Dvigateli vnutrennego sgoraniya], No 2, pp. 51–54. [in Russian]
6. Krutov V.I. (1989), “Automatic control and management of internal combustion engines”, [“Avtomaticheskoe regulirovanie i upravlenie dvigateley vnutrennego sgoraniya“], “Machine building“, Moscow, 516 p. [in Russian]
7. Diakonov V.P. (2005), “MATLAB 6.5 SP1/7 + Simulink 5/6. Main applications” [“MATLAB 6.5 SP1/7 + Simulink 5/6. Osnovnyie primeneniya”], “Solon-Press“, Moscow, 800 p. [in Russian]
8. Kostriutsya S.V. (2014), “The choice of rational parameters and the development of electronic speed regulator of the diesel engine” [Vibir ratsionalnih parametriv i rozrobka elektronnoho regulyatora chastoti obertannya dizelya], “National transport university“, Kiev, 20 p. [in Ukrainian]

РЕФЕРАТ

Лісовал А.А. Налаштування мікропроцесорного ПІД-регулятора швидкості для застосування на автомобільному дизелі / А.А. Лісовал // Вісник Національного транспортного університету. Серія «Технічні науки». Науково-технічний збірник – К.: НТУ, 2019. – Вип. 3 (45).

Мета дослідження – розробка універсальних рекомендацій для налаштування мікропроцесорного ПІД-регулятора швидкості автомобільного дизеля з наддувом.

У статті наведені результати: моторних досліджень впливу ПІД-параметрів на стійкість роботи дизеля; розрахунків на динамічній моделі впливу ПІД-параметрів на витрату палива при налаштуванні регулятора з урахуванням впливу зовнішніх вібрацій різної амплітуди.

Для забезпечення стійкої роботи і якісних перехідних процесів необхідно індивідуально підбирати виконавчі механізми і ПІД-параметри з урахуванням умов експлуатації автомобільних дизелів. Робота за низьких частот обертання вимагає малих значень П-складової, а за номінального режиму необхідно збільшувати значення П-складової в 2-2,5 рази.

Вплив параметрів налаштування мікропроцесорного ПІД-регулятора дизеля на витрату палива відчутно в перехідних процесах. При амплітудах зовнішніх вібрацій 1... 3 мм зменшення І-складової приводить до зменшення витрати палива. За результатами моделювання перехідних процесів економія палива склала 2,25%.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ДИЗЕЛЬ АВТОМОБІЛЬНИЙ, АВТОМАТИЧНЕ РЕГУЛЮВАННЯ, МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ, ПІД-РЕГУЛЯТОР ШВИДКОСТІ

ABSTRACT

Lisoval A.A. Setting up microprocessor PID-regulator of speed for use on automobile diesel. Visnyk of National Transport University. Series «Technical sciences». Scientific and Technical Collection. Kyiv. National Transport University. 2019. Vol. 3 (45).

The purpose of the research is the development of universal recommendations for tuning the microprocessor diesel PID- regulator.

The article presents the results: motor testes of the influence of PID-parameters on the stability of diesel operation; calculations on the dynamic model of the influence of PID-parameters on fuel consumption

when adjusting the regulator taking into account the effects of random external vibrations of different amplitudes.

To ensure stable operation and quality transient processes, it is necessary to individually select actuators and PID-parameters taking into account the operating conditions of diesel engines. Operation at low speeds requires a small proportional component, and in the nominal mode it is necessary to increase the value of the proportional component.

The effect of the tuning parameters of the microprocessor PID-regulator on the fuel consumption is noticeable in transient processes. At amplitudes of external vibrations of 1...3 mm, the decrease in the integral component leads to a decrease in fuel consumption. Based on the results of the simulation of transients, the fuel economy was 2.25 %.

KEY WORDS: AUTOMOBILE DIESEL, AUTOMATIC CONTROL, MATHEMATICAL MODELING, PID-REGULATOR OF SPEED

РЕФЕРАТ

Лисовал А.А. Настройка микропроцессорного ПИД-регулятора скорости для применения на автомобильном дизеле / А.А. Лисовал // Вестник Национального транспортного университета. Серия «Технические науки». Научно-технический сборник – К.: НТУ, 2019. – Вып. 3 (45).

Цель исследования – разработка универсальных рекомендаций для настройки микропроцессорного ПИД-регулятора скорости автомобильного дизеля с наддувом.

В статье приведены результаты: моторных исследований влияния ПИД-параметров на устойчивость работы дизеля; расчётов на динамической модели влияния ПИД-параметров на расход топлива при настройке регулятора с учётом воздействия случайных внешних вибраций различной амплитуды.

Для обеспечения устойчивой работы и качественных переходных процессов необходимо индивидуально подбирать исполнительные механизмы и ПИД-параметры с учётом условий эксплуатации автомобильных дизелей. Работа на низких частотах вращения требует малых значений пропорциональной составляющей, а в зоне номинального режима необходимо увеличивать значение пропорциональной составляющей 2-2,5 раза.

Влияние параметров настройки микропроцессорного ПИД-регулятора дизеля на расход топлива ощутимо в переходных процессах. При амплитудах внешних вибраций 1...3 мм уменьшение интегральной составляющей приводит к уменьшению расхода топлива. По результатам моделирования переходных процессов экономия топлива составила 2,25 %.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ДИЗЕЛЬ АВТОМОБИЛЬНЫЙ, АВТОМАТИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ, МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ПИД-РЕГУЛЯТОР

АВТОР:

Лисовал Анатолий Анатолійович, доктор технічних наук, професор, Національний транспортний університет, професор кафедри двигунів та теплотехніки, e-mail: li-dvz@bigmir.net, тел. +380442804716, Україна, 01010, м. Київ, вул. Омеляновича-Павленка 1, к. 303а.

AUTHOR:

Lisoval Anatoliy A., Doctor of Technical Science, Professor, National Transport University, Professor of the Department of engines and heat engineering, e-mail: li-dvz@bigmir.net, tel. +380442804716, Ukraine, 01010, Kyiv, Omeliyanovicha-Pavlenko St. 1, of. 303a.

АВТОР:

Лисовал Анатолий Анатольевич, доктор технических наук, профессор, Национальный транспортный университет, профессор кафедры двигателей и теплотехники, e-mail: li-dvz@bigmir.net, тел. +380442804716, Украина, 01010, г. Киев, ул. Омеляновича-Павленка 1, к. 303а.

РЕЦЕНЗЕНТИ:

Сахно Володимир Прохорович, доктор технічних наук, професор, Національний транспортний університет, завідувач кафедри автомобілів, Київ, Україна.

Майборода Олександр Миколайович, доктор технічних наук, професор, Державний університет інфраструктури і технологій, завідувач кафедри судноводіння та керування судном, Київ, Україна.

REVIEWERS:

Sakhno V.P., Doctor of Technical Science, Professor, National Transport University, Head of the Automobile department, Kyiv, Ukraine.

Mayboroda A.N., Doctor of Technical Science, Professor, State University of Infrastructure and Technology, Head of the Navigation and vessel control department, Kyiv, Ukraine.