

Національний транспортний університет
Міністерства освіти і науки України

Національний транспортний університет
Міністерства освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

ВЕРБОВСЬКИЙ ОЛЕКСІЙ ВАЛЕРІЙОВИЧ

УДК 621.436

ДИСЕРТАЦІЯ

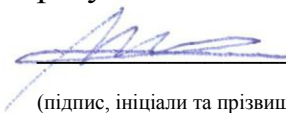
ВИБІР І ОБГРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ МІКРОПРОЦЕСОРНОЇ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ЧАСТОТИ ОБЕРТАННЯ ДИЗЕЛЯ

Спеціальність 05.05.03 – двигуни та енергетичні установки

Електрична інженерія

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

 О.В. Вербовський
(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник:

Лісовал Анатолій Анатолійович
доктор технічних наук, професор

Київ – 2017

АНОТАЦІЯ

Вербовський О.В. Вибір і обґрунтування параметрів мікропроцесорної системи автоматичного регулювання частоти обертання дизеля. - Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.05.03 «Двигуни та енергетичні установки» - Національний транспортний університет, Київ, 2017.

Основні результати дослідження

На підставі літературних джерел щодо САРЧ дизелів різних видів проаналізовано функціональні переваги і недоліки кожної, розроблено структурну і функціональну схеми електронного регулятора дизеля, що корегує ПД-параметри за частотою обертання колінчастого вала і за положенням рейки ВМ.

Розроблено і випробувано експериментальний зразок всережимного МР з ПД-управлінням і електромеханічним ВМ, що забезпечує момент 1,4 Н·м при 36° повороту вала і відсутності редуктора. Обґрунтовано мінімальну кількість АЦП та цифрових входів мікропроцесорного блоку – не менше 4-х аналогових та 4-х цифрових входів.

Розроблено алгоритм розрахунку циклової подачі палива при всережимному регулюванні для математичної моделі електронної САРЧ дизеля з всережимним регулюванням, який враховує динамічне моделювання ВМ, ПД-алгоритм регулювання циклової подачі палива, підтриманням кута нахилу регуляторної гілки та відтворенням впливу вібрацій дизеля на роботу системи. Підтверджено адекватність математичної моделі в статичі і динаміці.

Розроблено експериментально-розрахункову методику досліджень з визначення раціональних ПД-параметрів з урахуванням умов експлуатації

автотракторного дизеля, яка була підтверджена безмоторними і моторними дослідженнями на автомобільному дизелі 4ЧН12/14. Результатом досліджень став 3-х вимірний масив значень запропонованого K_{Σ} комплексного корегуючого коефіцієнта ПД-складових МР.

В процесі досліджень встановлено зростання вібрацій дизеля на частотах обертання колінчастого вала $\bar{n} = 0,9 \dots 1,06$. За цих значень ($\bar{n} = 0,9 \dots 1,06$) необхідно збільшувати П-складову для забезпечення стабільності роботи дизеля. Для дизеля 4ЧН12/14 П-складову необхідно збільшувати в $2 \dots 2,5$ рази при ступені нерівномірності регулятора $0 \dots 6 \%$. Рекомендовано після безмоторних випробувань виконати корекцію ПД-складових на дизелі в діапазонах $\bar{n} = 0,5 \dots 0,9$ і $0,9 \dots 1,06$ відносних частот обертання колінчастого вала, зменшивши запропонований комплексний корегуючий коефіцієнт K_{Σ} з 5% до 2% відповідно. Розроблена методика налаштування ПД-параметрів підтверджена результатами дорожніх випробувань.

Визначено, що зростання витрати палива зі збільшенням зовнішніх вібрацій нелінійне. За зовнішніх вібрацій рейки ПНВТ з амплітудою $1 \dots 3$ мм зменшення І-складової приводить до зменшення витрат палива. За результатами моделювання перехідних процесів отримана економія палива в розмірі $2,25 \%$. Розроблений всережимний регулятор відповідає першому класу точності САРЧ.

Результати дисертаційної роботи впроваджені при виконанні науково-дослідних робіт в Інституті газу НАН України. Методика налаштування ПД-параметрів мікропроцесорного регулятора швидкості прийнята до використання в компанії ТОВ «Мотортех» (м.Первомайськ).

Наукова новизна полягає в:

1. Вперше обґрунтовано необхідність введення в математичну модель електронної САРЧ дизеля аналога вібрацій для якісного налаштування ПД-регулятора;

2. Вперше досліджено вплив зовнішніх вібрацій різної амплітуди та частоти на якість динамічних процесів і паливну економічність автотракторного дизеля з ПД-регулятором;
3. Подальший розвиток отримала математична модель автотракторного дизеля з електронною всережимною САРЧ:
 - запропоновано диференціальне рівняння електромеханічного виконавчого органа – сервопривода;
 - в модель розрахунку циклової подачі палив на регуляторній гілці введено універсальну початкову точку, яка розміщена на нижній обмежувальній кривій холостого ходу.
4. В модель електронного ПД-управління введено комплексний корегуючий коефіцієнт K_{Σ} , який пропорційно впливає на всі коефіцієнти регулювання.

Практичне значення одержаних результатів складають:

1. Розроблена загальна методика налаштування раціональних ПД-параметрів всережимної електронної САРЧ транспортного дизеля з урахуванням вібрацій;
2. Розробка математичного алгоритму роботи всережимної електронної САРЧ транспортного дизеля з електромеханічним виконавчим механізмом.
3. Результати моделювання роботи електронної САРЧ дизеля під впливом вібрацій корпусу дизеля;
4. Рекомендації та результати налаштувань П-, І- та Д-складових електронної САРЧ автотракторного дизеля під навантаженням в діапазоні $\bar{n} = 0,5 \dots 1,06$ відносних частот обертання колінчастого вала;
5. Результати дорожніх випробувань електронного всережимного регулятора встановленого з раціональними параметрами налаштування;
6. Результати досліджень передані до використання в Інститут газу НАН України, а також впроваджені у виробництво в ТОВ «Мотортех».

Ключові слова: *дизель, регулятор швидкості, ПД-регулювання, паливна економічність, вплив вібрацій, зворотній зв'язок.*

Список публікацій здобувача

1. Лісовал А.А. Виконавчі механізми для електронних регуляторів паливних насосів високого тиску дизелів. / А.А. Лісовал, С.В. Костриця, О.В. Вербовський // Автошляховик України. — №4. — 2009. — С. 23.
2. Лісовал А.А. Виконавчі механізми для електронних регуляторів паливних насосів високого тиску дизелів (продовження) / А.А. Лісовал, С.В. Костриця, О.В. Вербовський // Автошляховик України. — №5. — 2009. — С. 18-20.
3. Лісовал А.А. Микропроцессорный регулятор дизеля и расчёт цикловой подачи топлива / А.А. Лісовал, С.В. Костриця, О.В. Вербовський // Двигатели внутреннего сгорания. — №2. — 2010. — С. 58-61.
4. Лісовал А.А. Проверка адекватности математической модели системы автоматического регулирования дизеля / А.А. Лісовал, С.В. Костриця, О.В. Вербовський // Двигатели внутреннего сгорания. — №2. — 2011. — С. 64-69.
5. Лісовал А.А. Всережимный электронный регулятор дизеля колесного транспортного средства / А.А. Лісовал, О.В. Вербовський // Двигатели внутреннего сгорания, №1, 2012 – С. 49-53.
6. Лісовал А.А. ПД-параметри мікропроцесорного регулятора дизеля / А.А. Лісовал, О.В. Вербовський // Вісник КДПУ: Наук. праці, Кременчук, вип. 5/2008(52). Част. 2, 2008. — С. 112-114.
7. Лісовал А.А. Настройка электронного регулятора дизеля / А.А. Лісовал, О.В. Вербовський // Автоматизация судовых технических средств: наук.-техн. зб. — 2013. — Вип. 19.— Одеса: ОНМА. — С. 49-54.
8. Лісовал А.А. Математичне моделювання автоматичної системи управління автотракторним дизелем / А.А. Лісовал, О.В. Вербовський // Управління проектами, системний аналіз і логістика,— Наук.журнал: в 2ч. — Ч.1.— Серія «Технічні науки».— К: НТУ.— 2014.— Вип.14. — С.109–114.

9. Лісовал А.А. Когенераційна установка з газовим двигуном / А.А. Лісовал, М.Є. Нижник, О.В. Вербовський / Водний транспорт: зб. наук. праць – 2013. – Вип. 3 (18). – К.: КДАВТ. – С. 51–55.

10. Лісовал А.А. Моделирование работы электронного ПИД-регулятора скорости двигателя внутреннего сгорания / А.А. Лісовал, О.В. Вербовський, Ю.А. Свистун / Двигатели внутреннего сгорания. — №2. — 2016. — С. 51-54.

11. Лісовал А.А. Микропроцессорный регулятор автомобильного дизеля / А.А. Лісовал, С.В. Костриця, О.В. Вербовський // Systems and means of motor transport. Politechnika Rzesowska, Poland. — №1. — 2010. — С. 157-160.

12. Корежуючий коефіцієнт ПД-параметрів мікропроцесорного регулятора дизеля / Лісовал А.А., Вербовський О.В. // Systems and means of motor transport. Selected problems. Seria:Transport, Politechnika Rzesowska, Poland, 2011. — С. 167-170.

13. Лісовал А.А. Результати досліджень на математичній моделі дизеля з електронним регулятором / А.А. Лісовал, С.В. Костриця, О.В. Вербовський // LXIX Науково-практична конференція науково-педагогічних працівників, студентів та структурних підрозділів університету. — К.: НТУ, — 2013. — С. 21.

14. Лісовал А.А. Виконавчі механізми для електронного регулятора дизеля / А.А. Лісовал, С.В. Костриця, О.В. Вербовський // Матеріали III-ої всеукраїнської науково-технічної конференції сучасні проблеми двигунобудування: стан, ідеї, рішення. — Первомайськ: ППІ НУК, 2009. — С. 231 - 236.

15. Лісовал А.А. Моделирование цифровой системы регулирования скорости автотранспортного дизеля / А.А. Лисовал, С.В. Костриця, О.В. Вербовський // Матеріали III-ої всеукраїнської науково-технічної конференції сучасні проблеми двигунобудування: стан, ідеї, рішення. — Первомайськ: ППІ НУК, 2011. — С. 214-216.

16. Лісовал А.А. Математична модель електронного всережимного регулятора з ПНВТ дизеля / А.А. Лісовал, О.В. Вербовський // Тези доповідей LXVIII науково-практичної конференції науково-педагогічних працівників, аспірантів, студентів та структурних підрозділів університету.- К: НТУ, 2012р.

17. Лісовал А.А. Безмоторні випробування складових елементів електронного регулятора на базі регулятора фірми Heinzmann/ А.А. Лісовал, О.В. Вербовський // Тези доповідей LXIV науково-практичної конференції науково-педагогічних працівників, аспірантів, студентів та структурних підрозділів університету.-К: НТУ, 2008р. — С. 21-22.

18. Лісовал А.А. Дослідження і настройка електронного регулятора Henzmann / А.А. Лісовал, О.В. Вербовський // LXX наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та працівників відокремлених структурних підрозділів університету. Тези доповідей.- К.: НТУ, – 2014. — С. 19.

19. Лісовал А.А. ПІД-параметри мікропроцесорного регулятора дизеля / А.А. Лісовал, О.В. Вербовський // Матеріали III-ої всеукр. наук.-техн. конф. «Сучасні проблеми двигунобудування», м. Первомайськ, 2009, С.90-95.

20. Вербовський О.В. Науковий твір «Моделювання всережимного електронного регулятора швидкості дизеля» / Свідोцтво про реєстрацію авторського права на твір № 58166 від 20.01.2015 р.

ANNOTATION

Verbovskii O.V. Selection and justification of the parameters of the microprocessor system for automatic regulation of the speed of diesel engines. - Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

Dissertation for the degree of candidate of technical sciences (doctor of philosophy) in specialty 05.05.03 "Engines and power plants" - National Transport University, Kiev, 2017.

Main results

On the basis of literary sources on different types of diesel speed regulators analyzed the functional advantages and disadvantages of each, developed structural and functional schemes of the electronic regulator of diesel, corrected PID parameters for the speed of the crankshaft and the position of the fuel pump rail.

The experimental model of the electronic speed regulator with PID control and the electromechanical actuator mechanism was developed and tested, providing a torque of $1.4 \text{ N} \cdot \text{m}$ at 36° rotation of the shaft and no gear. A reasonable minimum number of ADCs and digital inputs of the microprocessor unit is at least 4 analog and 4 digital inputs.

An algorithm for calculating diesels engine fuel supply are developed. Algorithm are taking into account the dynamic simulation of the spin-off mechanism, the PID-algorithm for regulating the cyclic fuel supply, maintaining the angle of inclination of the regulatory branch and reproducing the effect of the vibration of the diesel engine on the system's operation. The adequacy of the mathematical model in statics and dynamics is confirmed.

The experimental and design methodology for investigating the determination of rational PID parameters, taking into account the conditions of operation of the automotive diesel engine, has been developed, which was confirmed by the non-motor and motor research on the automobile diesel engine 4CHN12 / 14. The

result of the research was a 3-dimensional array of the complex correction factor of the PID components.

During the research, the rise of engines vibration at the rotational speeds of the crankshaft = 0.9 ... 1.06 are confirmed. In these values (= 0.9 ... 1.06), it is necessary to increase the P-component to ensure the stability of the diesel engine. For a diesel engine 4CHN12 / 14, the P-component should be increased by 2 ... 2.5 times with the degree of unevenness of the controller 0 ... 6%. It is recommended, after non-motor tests, to correct the PID components on the diesel engine in the ranges = 0.5 ... 0.9 and 0.9 ... 1.06 relative speeds of the crankshaft, reducing the complex correction coefficient K_{Σ} from 5% to 2% respectively. The developed method of adjustment of PID parameters is confirmed by the results of road tests.

Scientific novelty lies in:

1. For the first time, it is justified to introduce a vibration analogue in the mathematical model of an electronic diesel controller for a qualitative tuning of the PID controller;

2. For the first time the influence of external vibrations of different amplitude and frequency on the quality of dynamic processes and the fuel efficiency of an autotractor diesel engine with a PID controller is studied;

3. Further development of the mathematical model of an autotractor diesel engine from an electronic all-regulator:

- the differential equation of an electromechanical executive body - a servo-driver is offered;

- a universal starting point located on the lower limiting curve of idling is entered in the model for calculating the cyclic fuel supply on the regulatory branch.

4. The complex correction coefficient K_{Σ} are introduced into the model of electronic PID control, which proportionally affects all the control factors.

The practical significance of the results obtained is as follows:

1. A general method for tuning the rational PID parameters of the all-mode electronic regulator of a transport diesel engine with consideration of vibrations has been developed;

2. Development of a mathematical algorithm for the operation of the all-mode electronic regulator of a transport diesel engine with an electromechanical actuator.
3. Results of modeling the operation of the electronic regulator of a diesel engine under the influence of vibrations;
4. Recommendations and results of adjustments of P, I-and D-components of the electronic regulator of autotractor diesel engine under loading in a range = 0,5 ... 1,06 relative frequencies of rotation of a cranked shaft;
5. Results of road tests of electronic all-regulator with rational settings;
6. The results of the research were transferred to the Institute of Gas of the National Academy of Sciences of Ukraine, and also introduced into production at Motortech Ltd.

Keywords: diesel, speed controller, PID control, fuel efficiency, vibration influence, feedback.

List of applicant's publications:

1. Lisoval A.A. Vykonavchi mekhanizmy dlia elektronnykh rehulatoriv palyvnykh nasosiv vysokoho tysku dyzeliv. / A.A. Lisoval, S.V. Kostrytsia, O.V. Verbovskyi // Avtoshliakhovyk Ukrainy. — №4. — 2009. — С. 23.
2. Lisoval A.A. Vykonavchi mekhanizmy dlia elektronnykh rehulatoriv palyvnykh nasosiv vysokoho tysku dyzeliv (prodovzhennia) / A.A. Lisoval, S.V. Kostrytsia, O.V. Verbovskyi // Avtoshliakhovyk Ukrainy. — №5. — 2009. — С. 18-20.
3. Lisoval A.A. Mykroprotsessorni rehulator dyzelia y raschët tsyklovoi podachy toplyva / A.A. Lisoval, S.V. Kostrytsia, O.V. Verbovskyi // Dvyhately vnutrenneho shoranyia. — №2. — 2010. — С. 58-61.
4. Lisoval A.A. Proverka adekvatnosti matematycheskoi modely systemy avtomatycheskoho rehulyrovanyia dyzelia / A.A. Lisoval, S.V. Kostrytsia, O.V. Verbovskyi // Dvyhately vnutrenneho shoranyia. — №2. — 2011. — С. 64-69.

5. Lisoval A.A. Vserezhymnyi elektronni rehulator dyzelia kolesnogo transportnogo sredstva / A.A. Lisoval, O.V. Verbovskiy // Dvyhately vnutrenneho shoranyia, №1, 2012 – S. 49-53.

6. Lisoval A.A. PID-parametry mikroprotsesornoho rehulatora dyzelia / A.A. Lisoval, O.V. Verbovskiy // Visnyk KDPU: Nauk. pratsi, Kremenchuk, vyp. 5/2008(52). Chast. 2, 2008. — C. 112-114.

7. Lisoval A.A. Nastroiika elektronnoho rehulatora dyzelia / A.A. Lisoval, O.V. Verbovskiy // Avtomatyzatsiia sudovykh tekhnicheskikh sredstv: nauk.-tekh. zb. – 2013. – Vyp. 19. – Odesa: ONMA. – S. 49-54.

8. Lisoval A.A. Matematychni modeliuvannia avtomatichnoi systemy upravlinnia avtotraktornym dyzelem / A.A. Lisoval, O.V. Verbovskiy // Upravlinnia proektamy, systemnyi analiz i lohistyka, – Nauk.zhurnal: v 2ch. – Ch.1.– Seriiia «Tekhnichni nauky».– K: NTU.– 2014.– Vyp.14. – S.109–114.

9. Lisoval A.A. Koheneratsiina ustanovka z hazovym dvyhunom / A.A. Lisoval, M.Ie. Nyzhnyk, O.V. Verbovskiy / Vodnyi transport: zb. nauk. prats – 2013. – Vyp. 3 (18).– K.: KDAVT. – S. 51–55.

10. Lisoval A.A. Modelyrovanye raboty elektronnoho PYD-rehulatora skorosty dvyhatelia vnutrenneho shoranyia / A.A. Lisoval, O.V. Verbovskiy, Yu.A. Svystun / Dvyhately vnutrenneho shoranyia. — №2. — 2016. — C. 51-54.

11. Lisoval A.A. Mykroprotsessornyi rehulator avtomobylnoho dyzelia / A.A. Lisoval, S.V. Kostriysia, O.V. Verbovskiy // Systems and means of motor transport. Politechnika Rzesowska, Poland. — №1. — 2010. — C. 157-160.

12. Korehuiuchy koefitsiiient PID-parametriv mikroprotsesornoho rehulatora dyzelia / Lisoval A.A., Verbovskiy O.V. // Systems and means of motor transport. Selected problems. Seria:Transport, Politechnika Rzesowska, Poland, 2011. — C. 167-170.

13. Lisoval A.A. Rezultaty doslidzhen na matematychnii modeli dyzelia z elektronym rehulatorom / A.A. Lisoval, S.V. Kostriysia, O.V. Verbovskiy // LXIX Naukovo-praktychna konferentsiia naukovo-pedahohichnykh pratsivnykiv, studentiv ta strukturnykh pidrozdiliv universytetu. — K.: NTU, — 2013. — C. 21.

14. Lisoval A.A. Bykonavchi mekhanizmy dlia elektronnoho rehuliatora dyzelia / A.A. Lisoval, S.V. Kostytsia, O.V. Verbovskyi // Materialy III-oi vseukrainskoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii suchasni problemy dvyhunobuduvannia: stan, idei, rishennia. — Pervomaisk: PPI NUK, 2009. — C. 231 - 236.

15. Lisoval A.A. Modelyrovanye tsyfrovoy systemy rehulyrovanyia skorosty avtotransportnoho dyzelia / A.A. Lysoval, S.V. Kostytsia, O.V. Verbovskyi // Materialy III-oi vseukrainskoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii suchasni problemy dvyhunobuduvannia: stan, idei, rishennia. — Pervomaisk: PPI NUK, 2011. — C. 214-216.

16. Lisoval A.A. Matematychna model elektronnoho vserezhyrnnoho rehuliatora z PNVT dyzelia / A.A. Lisoval, O.V. Verbovskyi // Tezy dopovidei LXVIII naukovo-praktychnoi konferentsii naukovo-pedahohichnykh pratsivnykiv, aspirantiv, studentiv ta strukturnykh pidrozdiliv universytetu.-K: NTU, 2012r.

17. Lisoval A.A. Bezmotorni vyprobuvannia skladovykh elementiv elektronnoho rehuliatora na bazi rehuliatora firmy Heinzmann/ A.A. Lisoval, O.V. Verbovskyi // Tezy dopovidei LXIV naukovo-praktychnoi konferentsii naukovo-pedahohichnykh pratsivnykiv, aspirantiv, studentiv ta strukturnykh pidrozdiliv universytetu.-K: NTU, 2008r. — C. 21-22.

18. Lisoval A.A. Doslidzhennia i nastroiika elektronnoho rehuliatora Henzmann / A.A. Lisoval, O.V. Verbovskyi // LXX naukova konferentsiia profesorsko-vykladatskoho skladu, aspirantiv, studentiv ta pratsivnykiv vidokremenykh strukturnykh pidrozdiliv universytetu. Tezy dopovidei.- K.: NTU, – 2014. — C. 19.

19. Lisoval A.A. PID-parametry mikroprotsesornoho rehuliatora dyzelia / A.A. Lisoval, O.V. Verbovskyi // Materialy III-oi vseukr. nauk.-tekhn. konf. «Suchasni problemy dvyhunobuduvannia», m. Pervomaisk, 2009, S.90-95.

20. Verbovskyi O.V. Naukovyi tvir «Modeliuvannia vserezhyrnnoho elektronnoho rehuliatora shvydkosti dyzelia» / Certificate of registration of copyright to a work № 58166 vid 20.01.2015 r

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ.....	2
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	11
ВСТУП.....	17

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ЕТАПІВ РОЗВИТКУ ДОСЛІДЖЕНЬ САРЧ ДИЗЕЛЯ.....	23
1.1. Дизель як об'єкт регулювання.....	23
1.2. Аналіз досліджень автоматичних систем регулювання частоти обертання колінчастого вала дизеля.....	25
1.3. Аналіз складових електронної системи регулювання дизеля....	37
1.4. Задачі дослідження електронної САРЧ для автомобільного дизеля.....	41
Висновки до розділу 1.....	42

РОЗДІЛ 2

РОЗРОБКА ЕЛЕКТРОННОЇ ВСЕРЕЖИМНОЇ САРЧ ДИЗЕЛЯ З ПІД-ЗАКОНОМ УПРАВЛІННЯ.....	44
2.1. Розробка структурної схеми	44
2.2. Обґрунтування введення ПІД-закону управління в електронну САРЧ дизеля.....	45
2.3. Виконавий механізм і зворотній зв'язок	49
2.4. Технічні параметри та конструкція експериментальної всережимної САРЧ дизеля.....	50
Висновки до розділу 2.....	59

РОЗДІЛ 3

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ДИЗЕЛЯ З ЕЛЕКТРОННОЮ ВСЕРЕЖИМНОЮ САРЧ З ПІД-РЕГУЛЮВАННЯМ.....	61
3.1. Базова модель САРЧ дизеля для дослідження.....	61
3.2. Математична модель електронної всережимної САРЧ з ПІД-	

	14
регулятором.....	65
3.3. Моделювання принципу роботи ЕБК.....	73
3.4. Математична модель підпрограми електромеханічного виконавчого механізму.....	76
Висновки до розділу 3.....	81

РОЗДІЛ 4

ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ НАЛАШТУВАННЯ ПІД-РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ АВТОТРАКТОРНОГО ДИЗЕЛЯ.....	83
4.1. Обґрунтування необхідності вибору раціональних параметрів. Програма досліджень.....	83
4.2. Методика і результати досліджень МР на ПНВТ.....	86
4.3. Методика визначення і значення вихідних параметрів для математичної моделі електронної САРЧ.....	90
4.4. Уточнення вихідних даних для математичної моделі дизеля 4ЧН12/14.....	94
4.5. Перевірка адекватності математичної моделі.....	98
4.6. Дослідження ПІД-параметрів ЕВР на вплив вібрацій двигуна..	101
4.7. Вплив раціональних параметрів ПІД-регулятора на витрату палива дизеля.....	104
Висновки до розділу 4.....	110

РОЗДІЛ 5

ВИКОРИСТАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ПІД-МОДЕЛЮВАННЯ В МОТОРНИХ І ДОРОЖНІХ ВИПРОБУВАННЯХ.....	112
5.1. Додаткове уточнення процесів запуску і зупинки на дизелі.....	112
5.2. Перевірка раціональних налаштувань ПІД-параметрів дизеля при зміні швидкісних режимів.....	114
5.3. Порівняння показників роботи дизеля з різними регуляторами..	123

	15
5.4. Підтвердження результатів ПД-моделювання дорожніми випробуваннями.....	126
Висновки до розділу 5.....	130
ВИСНОВКИ.....	131
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	133
ДОДАТОК А.....	145
ДОДАТОК Б.....	146
ДОДАТОК В.....	149
ДОДАТОК Г.....	150
ДОДАТОК Д.....	151
ДОДАТОК Е.....	153
ДОДАТОК Ж.....	155

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

- АЦП – аналого-цифровий перетворювач;
ВГ – відпрацьовані гази;
ВМ – виконавчий механізм;
ДВЗ - двигун внутрішнього згорання;
ЕБК – електронний блок керування;
ЕВР – електронний всережимний регулятор;
КТЗ – колісний транспортний засіб;
МР – мікропроцесорний регулятор;
НК – негативний коректор;
ОЗП – оперативний запам'ятовуючий пристрій;
ПЗП – постійний запам'ятовуючий пристрій;
ПІД – пропорційно інтегрально диференціальний;
ПНВТ – паливний насос високого тиску;
САРЧ – система автоматичного регулювання частоти обертання
колінчастого вала;
ЦАП – цифро-аналоговий перетворювач.

ВСТУП

Актуальність теми

Впровадження європейських норм на викиди шкідливих речовин з відпрацьованими газами (ВГ) в атмосферу сприяє широкому застосуванню і удосконаленню на автомобільних дизелях бортових мікропроцесорних систем керування роботою двигуна та його систем. Такі системи можуть швидко обробляти достатньо велику кількість вхідних сигналів від датчиків, здійснювати оптимальне налаштування двигуна на експлуатаційні режими роботи, постійно здійснювати бортову діагностику систем, що впливають безпосередньо на токсичність ВГ та сигналізувати водію про несправності. Такі системи включають в себе і автоматичний регулятор частоти обертання колінчастого вала.

Мікропроцесорні системи керування для транспортних дизелів необхідно розробляти та виготовляти на сучасній електронній елементній базі. Програмне забезпечення є інтелектуальною власністю розробника і налаштування відбувається за рекомендацією або в присутності представника розробника.

З теорії і практики автоматичного регулювання відомі ПІД-регулятори, де П - це пропорційна, І - інтегральна і Д - диференційна складові закону регулювання. Для стаціонарних і транспортних дизелів такі регулятори широко застосовують для систем автоматичного регулювання частоти обертання (САРЧ) колінчастого вала дизеля. В Україні на дизелях колісних транспортних засобів (КТЗ) ПІД-регулятори стали застосовувати і випробовувати при переході від механічних і гідромеханічних САРЧ до мікропроцесорних.

Теоретичними і практичними задачами розробки, впровадження та експлуатації мікропроцесорних САРЧ дизелів різного призначення в Україні займаються: в Національному технічному університеті «Харківський політехнічний університет» – для автотракторних і спеціальних дизелів; в Харківському національному автомобільно-дорожньому університеті – для автомобільних і тепловозних дизелів; в Одеській національній морській академії – для суднових дизелів; в Національному технічному університеті «Київський

політехнічний інститут» – для стаціонарних дизелів; в Національному транспортному університеті в співпраці з Інститутом газу НАН України – для автотракторних і стаціонарних дизелів.

Фахівці з автоматичного регулювання вважають, що більшість законів регулювання можна реалізувати на базі ПД-регуляторів. Здебільшого, при експлуатації КТЗ застосовують іноземні регулятори і відповідно, процес їх налаштування є інтелектуальною власністю цих фірм. До працівників експлуатації доходить лише дозволена інформація у виді технічних інструкцій в залежності від рівня доступу.

Дисертаційне дослідження присвячено вирішенню актуальної науково-технічної задачі щодо налаштувань складових ПД-регулятора автотракторних дизелів на стійку роботу в усьому швидкісному і навантажувальному діапазоні без погіршення паливної економічності.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Дисертаційне дослідження виконано на кафедрі «Двигуни та теплотехніка» Національного транспортного університету та відповідає держбюджетній тематиці МОН України: «Покращення показників дорожніх і транспортних засобів удосконаленням двигунів та їх систем» в 2007–2008 рр. (ДР№ 0107U002832, Інв. №0308U001281, Інв. №0208U004974), та держбюджетній тематиці кафедри «Двигуни та теплотехніка» НТУ: «Поліпшення паливної економічності та екологічних показників транспортних засобів удосконаленням систем регулювання та використанням альтернативних палив» в 2010-2012 рр. (ДР№ 0110U000128, Інв. №0210U005694, Інв. №0212U001160, Інв. №0213U003114); «Використання альтернативних палив та удосконалення систем регулювання та живлення двигунів колісних транспортних засобів» в 2013-2015 рр. (ДР№ 0112U008409, Інв. №0213U008208, Інв. №0214U008214).

Метою роботи є обґрунтування і визначення раціональних налаштувань складових мікропроцесорного всережимного ПД-регулятора, які поліпшують паливну економічність та якість роботи САРЧ автотракторного дизеля.

Для досягнення мети були поставлені і вирішені наступні **задачі**:

1. На основі наукових джерел виконали аналіз досліджень з застосування різних типів систем регулювання транспортних дизелів;
2. Розроблено і досліджено функціональні складові електронної САРЧ дизеля для колісного транспортного засобу;
3. Розроблено математичну модель електронної всережимної САРЧ дизеля, виконано перевірку адекватності;
4. Проведено розрахункові та моторні дослідження роботи електронної САРЧ транспортних дизелів за різних експлуатаційних режимів;
5. Розроблено рекомендації з вибору та налаштування електронної САРЧ на транспортному дизелі.

Об'єкт дослідження – усталені та перехідні процеси автотракторного дизеля з мікропроцесорним всережимним регулятором частоти обертання колінчастого вала.

Предмет дослідження – поліпшення якості роботи САРЧ дизеля з всережимним ПІД-алгоритмом управління за різних швидкісних і навантажувальних режимів, вибір раціональних налаштувань ПІД-складових мікропроцесорного регулятора без погіршення динаміки перехідних процесів, паливної економічності та незалежно від вібрацій дизеля.

Методи дослідження – методи наукової ідентифікації та порівняльного аналізу при опрацюванні літературних джерел, експериментальне визначення вихідних даних для математичної моделі із застосуванням методики планування багатофакторного експерименту і числового методу Рунге-Кутта-Фельдберга при вирішенні системи диференціальних рівнянь, статистичні методи обробки результатів досліджень.

В теоретичних дослідженнях використано метод математичного моделювання, метод інтерполяції для формування нахилу часткових характеристик, метод симуляції вібрацій різної амплітуди та частоти.

В експериментальних дослідженнях САРЧ на дизелі дотримано регламент державних стандартів на моторні випробовування, в дослідженнях динамічних процесів застосовано цифровий запис в режимі реального часу, вирішенням

зворотної задачі за результатами динамічної характеристики сервопривода отримано коефіцієнти диференціального рівняння виконавчого механізму.

Наукова новизна полягає в:

1. Вперше обґрунтовано необхідність введення в математичну модель електронної САРЧ дизеля аналога вібрацій для якісного налаштування ПД-регулятора;
2. Вперше досліджено вплив зовнішніх вібрацій різної амплітуди та частоти на якість динамічних процесів і паливну економічність автотракторного
 - а. дизеля з ПД-регулятором;
3. Подальший розвиток отримала математична модель автотракторного дизеля з електронною всережимною САРЧ:
 - запропоновано диференціальне рівняння електромеханічного виконавчого органа – сервопривода;
 - в модель розрахунку циклової подачі палив на регуляторній гілці введено універсальну початкову точку, яка розміщена на нижній обмежувальній кривій холостого ходу;
4. В модель електронного ПД-управління введено комплексний корегуючий коефіцієнт K_{Σ} , який пропорційно впливає на всі коефіцієнти регулювання.

Практичне значення одержаних результатів складають:

1. Розроблена загальна методика налаштування раціональних ПД-параметрів всережимної електронної САРЧ транспортного дизеля з урахуванням вібрацій;
2. Розробка математичного алгоритму роботи всережимної електронної САРЧ транспортного дизеля з електромеханічним виконавчим механізмом.
3. Результати моделювання роботи електронної САРЧ дизеля під впливом вібрацій корпусу дизеля;
4. Рекомендації та результати налаштувань П-, І- та Д-складових електронної САРЧ автотракторного дизеля під навантаженням в діапазоні $\bar{n} = 0,5 \dots 1,06$ відносних частот обертання колінчастого вала;

5. Результати дорожніх випробувань електронного всережимного регулятора встановленого з раціональними параметрами налаштування;

6. Результати досліджень передані до використання в Інститут газу НАН України, а також впроваджені у виробництво в ТОВ «Мотортех».

Особистий внесок здобувача.

При виконанні дисертаційного дослідження здобувачем особисто:

- проведено аналіз основних елементів мікропроцесорних САРЧ;
- удосконалено методику створення і налаштування мікроконтролерної САРЧ дизеля;
- визначено вихідні дані для математичної моделі експериментального мікропроцесорного регулятора (МР) всережимної САРЧ дизеля;
- удосконалено математичну модель МР дизеля;
- виконано розрахункові дослідження на математичній моделі, проведено аналіз результатів;

Здобувач приймав безпосередню участь в стендових дослідженнях експериментального зразка МР на дизелях 4ЧН12/14 і дорожніх випробуваннях трактора Т-150К, безмоторних і моторних дослідженнях складових частин експериментального зразка та МР в цілому.

Отримано одноосібно свідоцтво на реєстрацію авторського права на твір №58166 «моделювання всережимного електронного регулятора швидкості дизеля».

Узагальнено результати досліджень, зроблено висновки і рекомендації.

Апробація результатів дисертації

Основні результати досліджень доповідалися на XV, XVI, XVII, XXI Міжнародних конгресах двигунобудівників (с. Рибаче, смт. Коблево) в 2010, 2011, 2012, 2016 рр., на міжнародних науково-технічних конференціях SAKON (м. Жешув, Республіка Польща) в 2010, 2011 рр., на III, IV всеукраїнських науково-технічних конференціях «Сучасні проблеми двигунобудування» (м. Первомайськ) в 2009, 2011 рр., на конференціях професорсько-викладацького складу Національного транспортного університету (м. Київ) в 2008–2014 рр.

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи опубліковано в 20 наукових працях: 10 статей у фахових виданнях України, 2 іноземні публікації, 1 свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір. Додаткові публікації апробаційного характеру в 4 матеріалах наукових конференцій і 3 тезах доповідей.

Структура та об'єм роботи. Дисертаційна робота складається із анотації, вступу, п'яти розділів, додатків. Повний обсяг дисертації складає 156 сторінок, 79 рисунків, 13 таблиць, 6 додатків на 12 сторінках, 105 найменувань використаних джерел на 12 сторінках.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ЕТАПІВ РОЗВИТКУ ДОСЛІДЖЕНЬ САРЧ ДИЗЕЛЯ

1.1. Дизель як об'єкт регулювання

Дизель, як регульований об'єкт може бути представленим як сукупність взаємодіючих структурних компонентів, таких як безпосередньо двигун, система подачі повітря, паливний насос високого тиску, система мащення, регулятор частоти обертання колінчастого вала, органи керування двигуном та інші. В рамках САРЧ, розглядатимемо ті компонентами, робота яких безпосередньо впливає на частоту обертання колінчастого вала. Кількісні значення фізичних величин, які розглядатимемо в рамках САРЧ в подальшому називатимемо координатами. Так, вхідними координатами блока двигуна, як об'єкта регулювання є циклова подача палива ($q_{ц}$), подача повітря ($G_{пов}$), та зовнішнє навантаження ($M_{нав}$). Вихідними координатами є частота обертання колінчастого вала (n_{δ}) та кількість відпрацьованих газів у випускному колекторі (G_r) [1].

В свою чергу циклова подача палива є вихідною координатою паливної апаратури. Вхідною координатою паливної апаратури є положення рейки паливного насоса високого тиску (ПНВТ). В залежності від типу паливної апаратури до вхідних координат також може відноситись частота обертання колінчастого вала (n_{δ}). Так як n_{δ} є вихідною координатою двигуна, це додає зворотний зв'язок.

В двигунах без турбонаддуву циклова подача повітря не регулюється, та є функцією від частоти обертання колінчастого вала. Якщо розглядати турбокомпресор як окремий об'єкт регулювання, то вихідним сигналом в нього є секундна подача повітря компресором. Вхідним сигналом в турбокомпресорі дизеля є кількість відпрацьованих газів за одиницю часу та положення органа управління (у випадку регульованого турбонаддуву) [1].

З теорії регулювання ДВЗ визначено функціональна схему дизеля як об'єкта регулювання (рис. 1.1), у яку увійшли ланки двигуна, ПНВТ, регулятора

частоти та турбокомпресора.

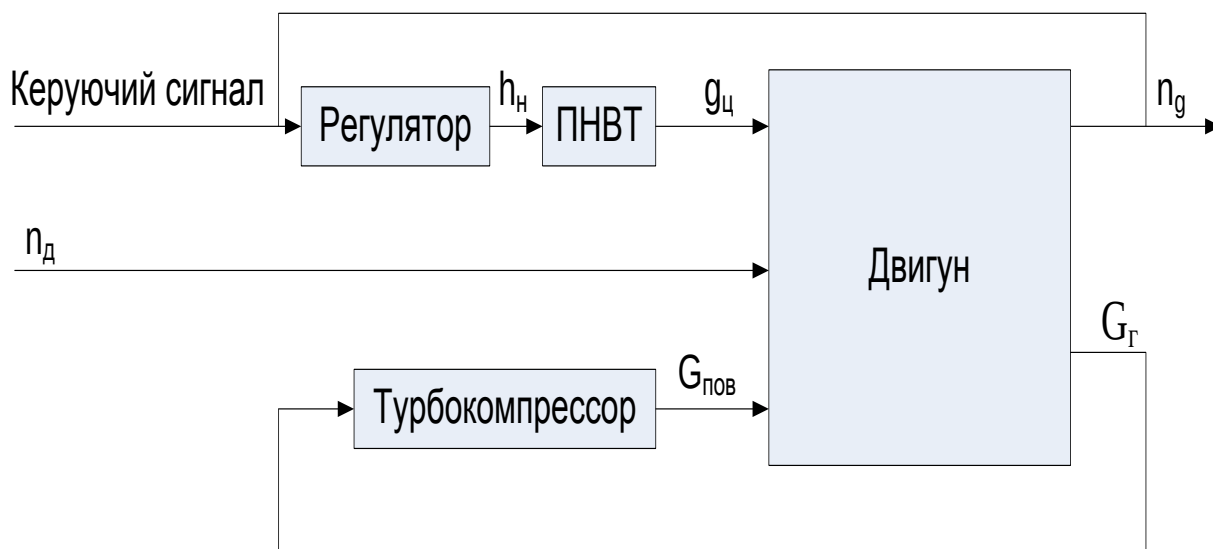


Рисунок 1.1 – Функціональна схема дизеля як об'єкта регулювання

Зв'язки між цими ланками описують і частоту обертання колінчастого вала (n_g), переміщення рейки ПНВТ (h_n), циклову подачу палива ($q_{ц}$), викиди відпрацьованих газів (G_g) та подачу повітря ($G_{пов}$). Ця схема є відправною точкою для аналізу існуючих систем автоматичного регулювання частоти обертання (САРЧ) колінчастого вала дизеля і розробки математичної моделі електронної САРЧ дизеля.

До дизеля і його автоматичних систем регулювання висувається ряд вимог. Основні з них: підтримання заданого швидкісного режиму, експлуатаційна надійність, виконання вимог та регламентів екології. Виходячи з експлуатаційного призначення дизеля визначають пріоритет вимог та, відповідно з цим, обирають алгоритм регулювання САРЧ. Забезпечення задовільних показників за всіма вимогами потребує використання складних алгоритмів, що опрацьовують багато вихідних сигналів двигуна.

Використання дизелів в якості автомобільних двигунів обумовлює режими експлуатації. Значну частину експлуатаційного часу автомобільні двигуни працюють в перехідних режимах [2].

Для покращення якості перехідних процесів, що впливають на частоту обертання колінчастого вала необхідно приймати до уваги не лише поточне значення частоти обертання, а і попередні значення та швидкість зміни частоти обертання. Це обумовлює необхідність дослідження поведінки дизелів не тільки в статиці, а й в динаміці.

Розробкою динамічних моделей дизелів займалися Крутов В.І. [3], Ештейн О.С. [4], Грунауер О.А. [5].

Динамічні моделі визначають стан регульованої системи в довільний змінний момент часу. Отже, сучасні динамічні математичні моделі САРЧ дизеля повинні враховувати швидкість зміни вхідних сигналів, зворотних зв'язків, щоб якісніше описувати перехідні процеси. Для реалізації динамічної моделі ДВЗ необхідно розглядати поведінку блоку двигуна, регулятора та систем повітряпостачання. Ці елементи мають бути представлені у вигляді системи рівнянь. Отримана система рівнянь матиме нелінійний характер. Кожний дослідник створює свою математичну модель на базі експериментальних даних, єдиної універсальної моделі немає.

1.2. Аналіз досліджень автоматичних систем регулювання частоти обертання колінчастого вала дизеля

Управління частотою обертання колінчастого вала відбувається завдяки управлінню процесом паливоподачі дизеля. Для досягнення найбільшої ефективності в задачах зменшення токсичності відпрацьованих газів та підвищення паливної економічності система управління паливоподачею повинна забезпечувати необхідні характеристики циклової подачі палива. Робота дизеля з прийнятними значеннями коефіцієнту надлишку повітря α , високою паливною економічністю та прийнятними екологічними показниками забезпечується реалізацією раціональних законів управління [6].

Аналіз даних, наведених в праці [6] показує, що при формуванні базових характеристик для автомобільного дизеля необхідно забезпечувати потрібну

форму зовнішньої швидкісної характеристики. Іншими характеристиками, що обмежують поле можливих режимів роботи дизелів є головна регуляторна характеристика та регуляторні характеристики мінімальної частоти обертання.

Від поставлених до дизеля транспортного засобу експлуатаційних вимог щодо швидкісних режимів роботи та навантажувальних режимів обирається тип системи регулювання.

В залежності від типу системи паливоподачі в дизелях різняться засоби регулювання і вимоги до регульованих параметрів.

Класична класифікація систем автоматичних регуляторів частоти (САРЧ) дизеля описана Крутовим В.І. [2]. Класифікація розроблена Крутовим В.І., доповнювалася за результатами досліджень Долганова К.Є. [7,10], Грехова Л.В., Іващенко М. А., Маркова В. А. [8], та Головчука А.Ф. [9].

Згідно теорії автоматичного регулювання ДВЗ розрізняють однорежимні, дворежимні та всережимні регулятори. Всі вони використовуються на автотракторних дизелях.

Дворежимні регулятори забезпечують стійку роботу в режимі холостого ходу, та обмежують подачу палива при підвищенні частоти обертання колінчастого вала за межі робочого діапазону. В іншому швидкісному діапазоні частот обертання колінчастого вала подача палива регулюється водієм (оператором) за допомогою педалі управління. Часткові регуляторні характеристики мають вигляд кривих близьких до горизонтальних. Недоліком дворежимного регулювання є підвищення складності управління транспортним засобом в неусталених режимах. Окрім цього, характеристика з частковим нахилом регуляторної гілки призводить до нестабільної роботи в режимах з низькою частотою обертання колінчастого вала.

Всережимні регулятори дозволяють водію задавати необхідну частоту обертання колінчастого вала, та підтримують її на постійному рівні. Часткові регуляторні характеристики мають вид прямих з кутом нахилу близьким до 90° по відношенню до горизонталі. Кут нахилу регуляторних характеристик визначає стійкість роботи регулятора. Недоліком всережимного регулювання є підвищена

ймовірність виходу дизеля на зовнішню швидкісну характеристику при різкій зміні навантаження. Згідно з працями [9, 11] частота виходу автотракторного дизеля на зовнішню швидкісну характеристику в 4,3 рази більша у порівнянні з дворежимними регуляторами.

За типом здійснення всережимності виділяють регулятори з попередньо заданими положеннями керуючих елементів, та зі змінними положеннями органа управління паливоподачею [12].

Трирежимні регулятори є компромісним варіантом між дворежимним та всережимним регулюванням. Трирежимні регулятори характеризуються регуляторними характеристиками з пологими проміжними кривими [13]. Дослідження три режимних регуляторів для автомобільних дизелів проводив Блаженів Е.І. [12].

За типом чутливого елемента виділяють механічні, пневматичні, гідравлічні електричні та електронні регулятори.

За наявністю посилення дії на орган управління паливоподачею регулятори поділяють на регулятори прямої та непрямої дії.

Згідно з працею [13] в автотракторних дизелях за всі минулі роки найбільше розповсюдження отримали механічні регулятори прямої дії. Розроблено узагальнену схему для аналізу функціональних можливостей регулятора з механічним чутливим елементом, яка показана на рис. 1.2.

Вхідним сигналом регулятора є частота обертання кулачкового вала ПНВТ. В якості чутливих елементів застосовують тягарці. Тягарці під дією відцентрових сил, переважають зусилля пружин регулятора та за допомогою системи важелів впливають на положення рейки паливного насоса і відповідно на циклову подачу палива в дизель.

Необхідні регуляторні характеристики формуються завдяки підбору маси чутливих елементів та використання набору пружин з різними попередньо заданими деформаціями.

Для покращення статичних та динамічних характеристик механічних регуляторів автотракторних дизелів використовують введення коригуючих

зв'язків, додаткових імпульсів за навантаженням або за похідною від регульованого параметру. На кафедрі двигунів та теплотехніки НТУ були розроблені спеціальні автономні паралельні коригуючі приставки до серійних регуляторів автотракторних дизелів [14, 15].

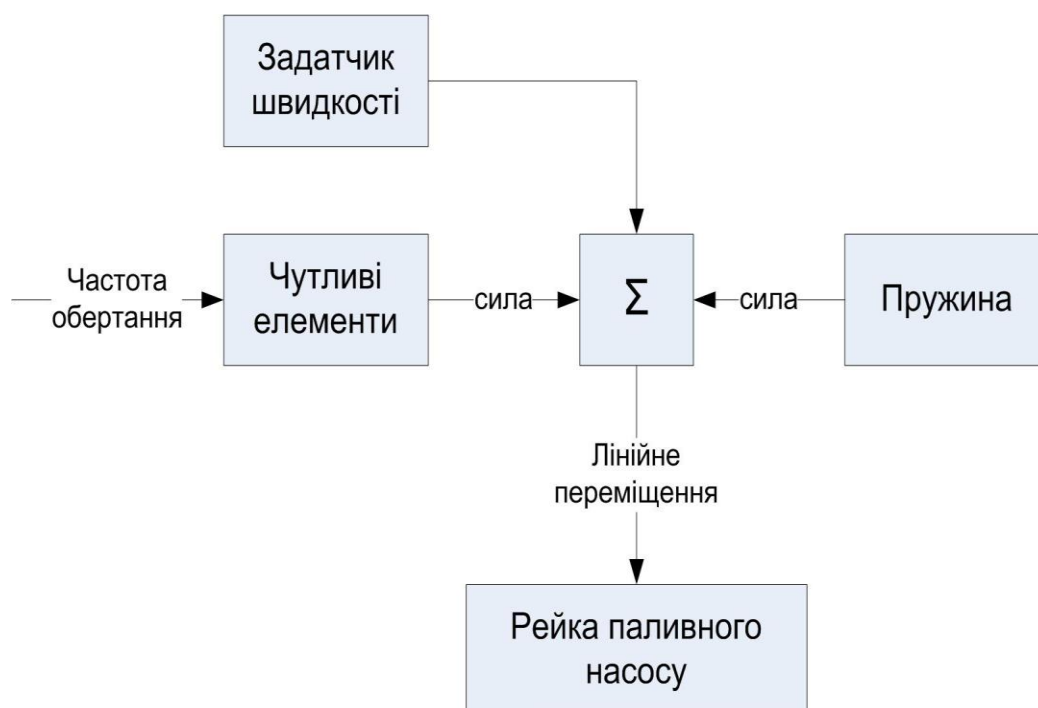


Рисунок 1.2 – Узагальнена функціональна схема регулятора прямої дії з механічним чутливим елементом

Введенням в закон управління похідної на механічних регуляторах для різних типів дизелів від стаціонарних до транспортних опубліковано в працях Крутова В.І. [3], Долганова К.Є. [16], Попова Е.П. [17], Іващенко М.М. [18], Герасимова С. Г. [19], Брошко Л. А., Хісаєва І. А. [20], Андрусенка С.І. [21]. Введення похідної дозволило підвищити точність регулювання та надійність роботи регулятора.

В дизелях з нерегульованим газотурбінним наддувом для запобігання зменшення впливу тиску наддуву в процесі експлуатації на робочий процес застосовують пневматичні негативні коректори (НК) паливоподачі. НК використовують для обмеження температурного режиму деталей центральної

поршневої групи. Це особливо важливо для автомобільних і тракторних дизелів [22].

Функціональне призначення пневматичних НК – зменшувати подачу палива при падінні тиску наддуву від турбокомпресора. Цими дослідженнями займався Головчук А.Ф. [9]. Чутливим елементом в пневматичному коректорі паливоподачі є діафрагма, що деформується під впливом різниці тиску між тиском наддуву та опорним (атмосферним) тиском.

Головна перевага механічних регуляторів полягає у відносній простоті їх виробництва та в тому, що за час використання механічних регуляторів розроблена велика кількість моделей регуляторів, що пройшли перевірку часом.

Недоліками механічних схем регулювання є те, що чутливі елементи та зв'язки між блоками виконані на базі механічних важелів, що забезпечується великою кількістю шарнірних з'єднань, необхідністю періодичних регулювань. Відтворення складних алгоритмів регулювання суттєво ускладнює конструкцію регулятора і як наслідок – зменшує його надійність. З часом характеристики пружин, які входять в склад регулятора, змінюються, що викликає необхідність перерегулювання системи.

В гідравлічних регуляторах частоти обертання кінетична енергія вихідного параметра (частоти обертання колінчастого вала) перетворюється на потенціальну енергію коригуючого параметра (тиску рідини), що зміщує рейку ПНВТ. Перетворення фізичних величин відбувається за допомогою насоса, що має привід від колінчастого вала дизеля. Таким чином тиск рідини є функцією від частоти обертання колінчастого вала. В якості робочої рідини використовується олива або дизельне паливо. На рис. 1.3 показано узагальнену функціональну схему гідравлічного регулятора частоти обертання колінчастого вала дизеля.

До насосу паралельно підключено поршень гідропривода, що переміщує рейку ПНВТ та регулювальний дросель. Таким чином зміни тиску робочої рідини, що викликані змінами частоти обертання колінчастого вала змінюють значення циклової подачі палива. Вибір режиму регулювання забезпечується органом управління дизелем. Недоліком гідравлічних регуляторів є вплив

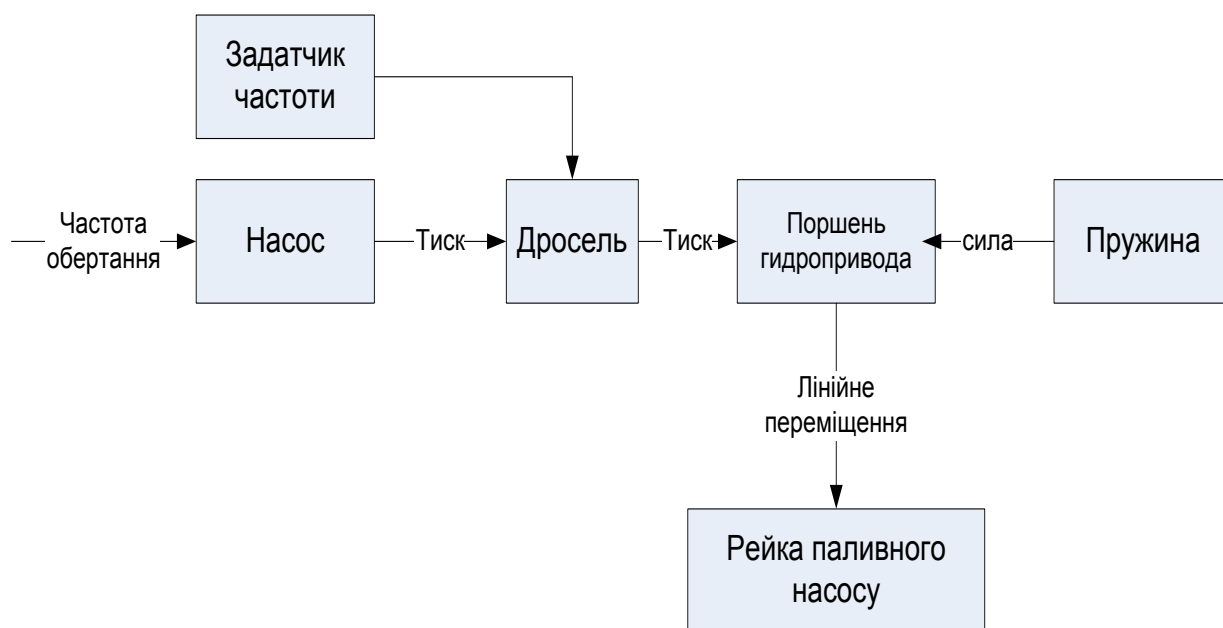


Рисунок 1.3 – Узагальнена функціональна схема гідравлічного регулятора частоти обертання колінчастого вала

фізичного стану робочої рідини на регуляторні характеристики. У зв'язку з тим, що в умовах експлуатації в'язкість та густина робочої рідини можуть змінюватися в широких межах, подібні регулятори не знайшли широкого застосування.

Для подолання цього недоліку в конструкцію гідравлічних регуляторів вводять корегуючі елементи. На рис. 1.4. показано функціональну схему всережимного гідравлічного регулятора з корегуючим тягарцем – золотником (чутливим елементом).

Регулюючим параметром в гідравлічному регуляторі з тягарцем - золотником продовжує залишатися тиск робочої рідини. Значення цього тиску регулюється не нагнітаючим насосом, а механічним регулятором, що змінює ефективний прохідний переріз регулюючого трубопроводу, і тим самим змінює тиск робочої рідини у поршні гідропривода. Вхідним параметром регулятора є частота обертання колінчастого вала. Керуючий сигнал подається не на регулюючий дросель, а змінює попередню деформацію зворотної пружини регулятора. Таким чином фізичні властивості робочої рідини не впливають на процес і алгоритм регулювання.

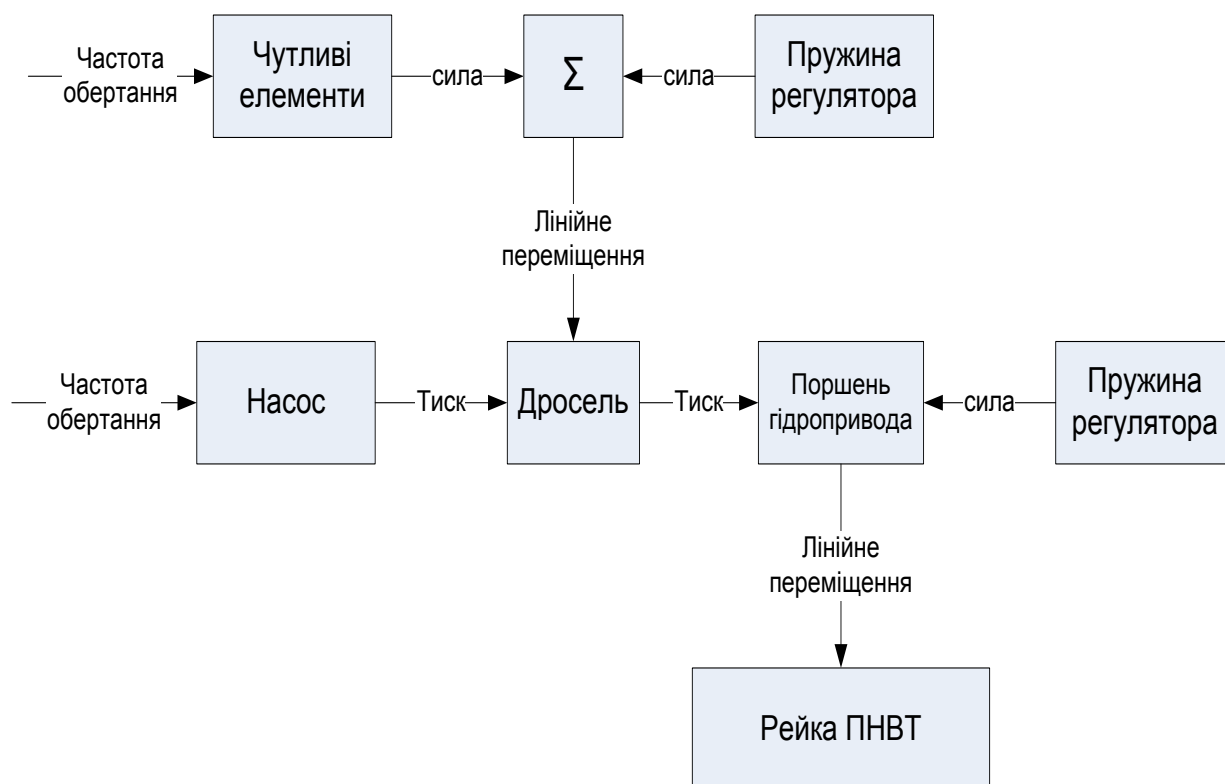


Рисунок 1.4 – Узагальнена функціональна схема всережимного гідравлічного регулятора з тягарцем - золотником

Роботи з розробки і дослідження гідравлічних регуляторів для автотракторних дизелів проводив К.Є. Долганов [21, 22]. Результати цих досліджень були використані в ХКБД заводу ім. Малишева на дизелях для мотоблоків серії ДТ [23].

Суттєвим для гідравлічних регуляторів є відсутність можливості введення інтегральної та диференціальної складових в закон регулювання. Гідравлічні регулятори чутливі до якості оливи.

В пневматичних регуляторах в якості вхідного сигналу використовується розрідження у впускному колекторі дизеля, що збільшується одночасно зі збільшенням частоти обертання колінчастого вала. Пневматичні регулятори використовували на автомобільних дизелях без наддуву [2]. На рис. 1.5 показано узагальнену функціональну схему пневматичного регулятора частоти обертання колінчастого вала дизеля.

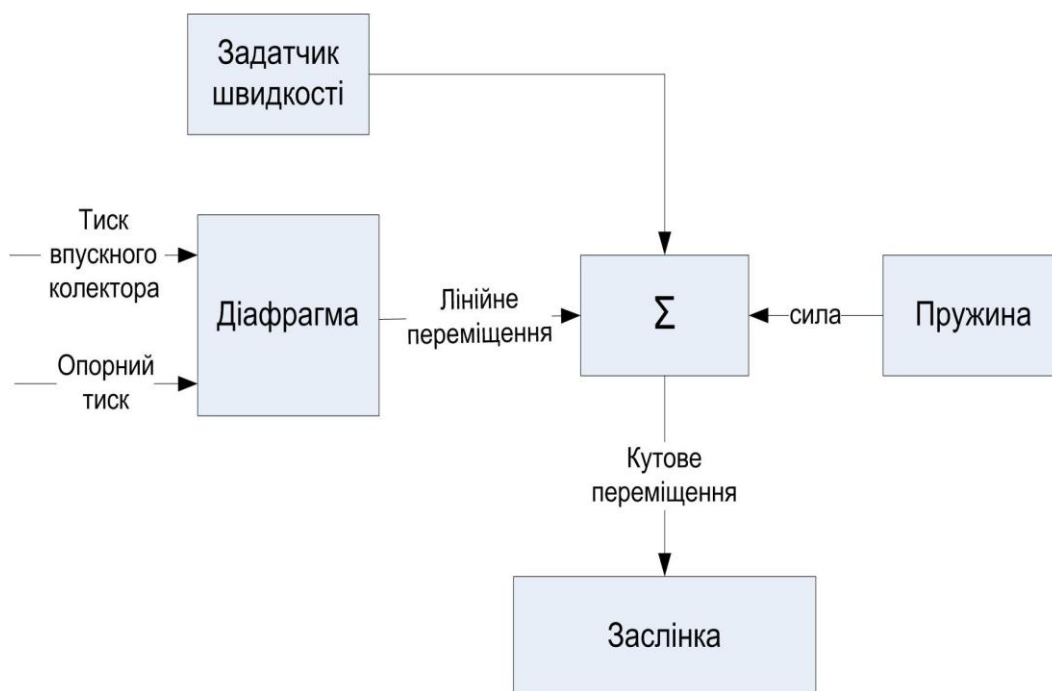


Рисунок 1.5 – Узагальнена функціональна схема пневматичного регулятора частоти обертання колінчастого вала

Різниця між тиском у впускному колекторі та опорним заданим тиском деформує діафрагму, що в свою чергу переміщує рейку паливного насоса. Вибір режиму регулювання забезпечується за допомогою повітряної заслінки встановленої в впускному колекторі. Зі зменшенням ефективного перерізу трубопроводу вхідного колектора зменшується частота обертання за якої обмежується подача палива.

До переваг пневматичного регулятора можна віднести конструктивну простоту. Вони знайшли застосування в автомобілях Mercedes-Bens з дизелями шостої серії OM з вихоровою камерою згорання і дворегимним регулюванням. До недоліків відноситься необхідність створення додаткового гідравлічного опору у вхідному колекторі, складність зберігання стабільного регулювання, складність введення інтегральних та диференціальних складових закону регулювання.

В електричних регуляторах перетворення вхідного сигналу в зміну вихідного сигналу відбувається у вигляді цифрових значень. На рис. 1.6 показано

одну з можливих функціональних схем електричного регулятора частоти обертання колінчастого вала.

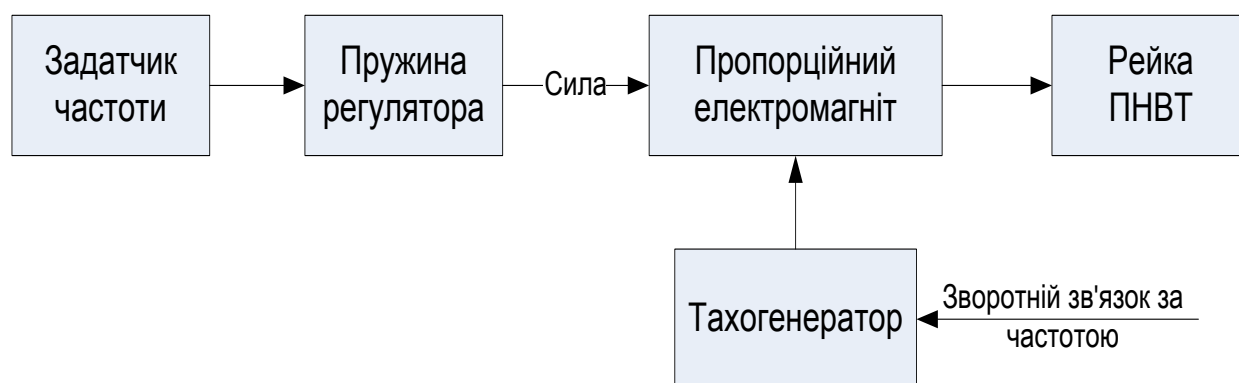


Рисунок 1.6 – Узагальнена функціональна схема електричного регулятора частоти обертання колінчастого вала

Аналіз функціональної схеми показав, що електричний регулятор є регулятором непрямої дії. В якості вхідного сигналу використовується частота обертання колінчастого вала. За допомогою тахогенератора механічна величина (частота обертання) перетворюється на електричну величину – напругу. В якості виконуючого механізму використовується пропорційний електромагніт, що переміщує рейку паливного насоса. Вибір режиму регулювання може бути забезпечений або зміною попередньої деформації зворотної пружини виконуючого механізму, або корекцією величини напруги живлення виконуючого механізму за допомогою реостату. Виконуючими механізмами можуть бути електродвигуни.

Існує багато альтернативних схем електричних регуляторів [3, 25]. В залежності від використаних компонентів можуть суттєво відрізнятися перетворення вхідних параметрів стану дизеля в електричні сигнали, та перетворення електричних сигналів в параметри управління паливоподачею дизеля. Електричні регулятори знайшли застосування на дизель-електричних агрегатах.

В електронних регуляторах за основу взято електричні регулятори, в склад яких входить електронний блок управління. В наведених вище типах регуляторів

регулювання частоти обертання колінчастого вала відбувалося виключно завдяки від'ємному зворотному зв'язку з вхідного параметра. Використання електронного блоку дозволяє розширити закон регулювання без значного ускладнення конструкції регулятора. Алгоритм регулювання може безпосередньо враховувати впливи багатьох вхідних факторів: температури двигуна, температури повітря, навантаження на двигун та інше [26].

Розрізняють аналогові і цифрові електронні регулятори. В аналогових регуляторах вихідний закон формується безперервно. Значення параметрів двигуна за допомогою системи датчиків перетворюються на електричні сигнали і вихідний закон формується в результаті математичних перетворень безпосередньо над цими сигналами. В цифрових регуляторах вхідні сигнали перетворюються в цифрову форму та обробляються мікропроцесорним блоком. В зв'язку з поширенням мікропроцесорної техніки аналогові регулятори не знайшли широкого використання в наш час.

Електронні регулятори є регуляторами непрямої дії. На відміну від механічних, гідравлічних та пневматичних регуляторів закон регулювання в них залежить не від механічних властивостей використаних компонентів, а від програми закладеної в мікропроцесорний блок. Це дозволяє гнучко підходити до формування регулюючого закону, не ускладнюючи при цьому механічні чутливі елементи регулятора.

До переваг електронних регуляторів відноситься можливість застосовувати оптимальні закони регулювання відповідно до експлуатаційних режимів та призначення дизеля, що необхідно для покращення паливоекономічних та екологічних показників. До недоліків відносять більшу вартість системи регулювання, складність налаштування.

На даний час існує багато розробок систем електронного регулювання, проведених іноземними фірмами [27 – 32]. До вітчизняних розробок відносяться роботи Грунауера А.А. та Долгих І. Д. [5], Лісовала А.А. [33].

Дослідження цифрових систем управління і регулювання для сучасних акумуляторних систем паливоподачі проводили Григор'єв О.Л. [34],

Врублевський А.М. Прохоренко О.П. [35]. В ХНАДУ Богаєвський О.Б. досліджував мікропроцесорний регулятор для тепловозних дизелів [36]. Ведуться дослідження із застосування крокового двигуна в якості ВМ на тракторному дизелі [37].

В НТУ розроблено і випробувано експериментальний дворежимний мікропроцесорний регулятор для автотранспортного дизеля 4ЧН12/14 [33, 37-41].

За діапазоном роботи регулятора значна кількість автотракторних дизелів потребує всережимного алгоритму регулювання [18, 42-45], проте дослідженнями П.І. Андрусенка, К.Є. Долганова, Ю.Ф. Гутаревича, А.Г. Говоруна, А.Ф. Головчука, А.С. Жернового, І.Є. Каньковського, В.І. Мельниченка, В.І. Захарчука, В.Г. Лясковського [16, 47-53] та інших встановлено, що використання всережимних регуляторів в випадках транспортного режиму роботи автотранспортного засобу призводить до підвищеної витрати палива в порівнянні з дворежимним регулюванням.

Це пов'язано з тим, що під час перехідних процесів за всережимного регулювання рейка паливного насоса контролювано виходить в крайнє положення, дизель працює за зовнішньою швидкісною характеристикою, тобто в циліндри подається підвищена кількість палива.

Питання поведінки органа управління подачею палива в залежності від способу регулювання частоти обертання автомобільного дизеля досліджував Є.І. Блаженів. Було встановлено, що рейка ПНВТ при всережимному регулюванні в 5...6 разів більше виходить на зовнішню швидкісну характеристику, ніж при дворежимному [54].

Вплив способів регулювання частоти обертання автомобільного дизеля ЯМЗ – 236 на паливну економічність досліджував В.І. Шестухін [55].

Перехідні процеси, що виникають в системі регулювання визначаються підбором механічних складових. Сили попереднього натягу пружин, ваги відцентрових тягарців, довжини важеля та ін. Під час роботи перерегулювання цих елементів системи неможливо, тож одним з напрямів вирішення цієї задачі – розробка комбінованих систем регулювання з підвищеною кількістю регулюючих

механічних елементів. І.Є. Каньковським проведені дослідження гранично-всережимного регулятора для тракторного дизеля [49]. В цьому ж напрямку проводили дослідження Говорун А.Г. та Куций О.А. [56]. Гранично-всережимний регулятор зі зміною налаштування зовнішньої коректорної характеристики, при відповідному виборі принципової схеми регулятора, дозволяє реалізовувати як однорежимний так і всережимний алгоритм регулювання. Використання регулятора такого типу забезпечує зниження амплітуди коливань рейки ПНВТ при коливаннях кутової швидкості дизеля, і, таким чином, знижує витрати палива за умов неусталених режимів. В НПО НАТИ були проведені дослідження із всережимно-дворежимним регулятором на базі тракторів МТЗ-82, МТЗ-100, Т-150К. Проведені дослідження трирежимних регуляторів. Проведені вище дослідження стосуються механічних регуляторів прямої дії. Електронні системи регулювання з всережимним алгоритмом регулювання досліджені мало.

Гнучкий закон регулювання, що є перевагою електронних систем регулювання дозволяє компенсувати недоліки властиві механічним всережимним регуляторам. Використання електронного регулятора означає введення непрямой схеми регулювання. Це усуває залежність кута нахилу регуляторної гілки від частоти обертання колінчастого вала. Висока нестабільність роботи дизеля на низьких частотах обертання та закиди рейки ПНВТ до зовнішньої обмежувальної швидкісної характеристики компенсуються введенням корегуючи сигналів за похідною та інтегральними складовими від регульованого параметру.

Проведений аналіз автоматичних систем регулювання дизеля показав необхідність використання електронних регуляторів на автотракторних дизелях.

Встановлено такі переваги електронних регуляторів в порівнянні з механічними, гідравлічними та пневматичними регуляторами: електронні регулятори є регуляторами непрямой дії, що дозволяє уникнути нерівномірності кута нахилу регуляторної гілки в залежності від швидкісного режиму. Відсутність прямої залежності корегуючої сили від частоти обертання двигуна покращує стабільність роботи дизеля на низьких частотах обертання колінчастого вала.

Електронні регулятори дозволяють введення інтегральної та диференціальної складової в закон регулювання без конструктивних складнощів.

ПІД-регулятори добре зарекомендували себе в дизель-генераторах та автомобільних дизелях завдяки широкому діапазону змін параметрів налаштування.

В електронних регуляторах мало дослідженими залишилися наступні напрями: вплив параметрів виконуючого механізму на параметри пропорційного, інтегрального та диференціального (ПІД) регулювання. Вибір оптимальних ПІД-параметрів на даний час описується узагальненими емпіричними залежностями. Незважаючи на те, що розробки в цьому напрямі проводилися багатьма іноземними комерційними структурами, результати досліджень в напрямі особливостей конструкції та налаштувань ВМ та електронної частини з програмним забезпеченням є закритою інформацією.

1.3. Аналіз складових електронної системи регулювання дизеля

Роботи присвячені дослідженню та вдосконаленню електронних регуляторів можна розділити на три напрями: створення алгоритмів управління, що реалізуються електронними регуляторами, покращення існуючих виконуючих механізмів, створення дешевих та надійних датчиків.

В праці Костиці С.В. [57] до використання на двигунах внутрішнього згоряння обґрунтовано використання імпульсних датчиків (наприклад датчики Холла). На даний час світова автомобільна промисловість представляє широкий спектр датчиків прийнятних у використанні з електронними регуляторами.

В якості об'єкта досліджень обрано дизель обладнаний рядним ПНВТ. В НТУУ «КПІ» дослідження, що проводилися Поповичем Н.Г. [58], Литвиновим В.А. [59], рекомендують в якості виконуючого механізму для рядного ПНВТ електромагнітний привід. Це підтверджується результатами праці [60].

Методи, що використовуються при покращення алгоритму роботи регулятора визначаються експлуатаційним призначенням дизеля та відповідними режимами роботи.

Розроблено узагальнену функціональну схему сучасного електронного регулятора дизеля з ПНВТ (рис. 1.7).

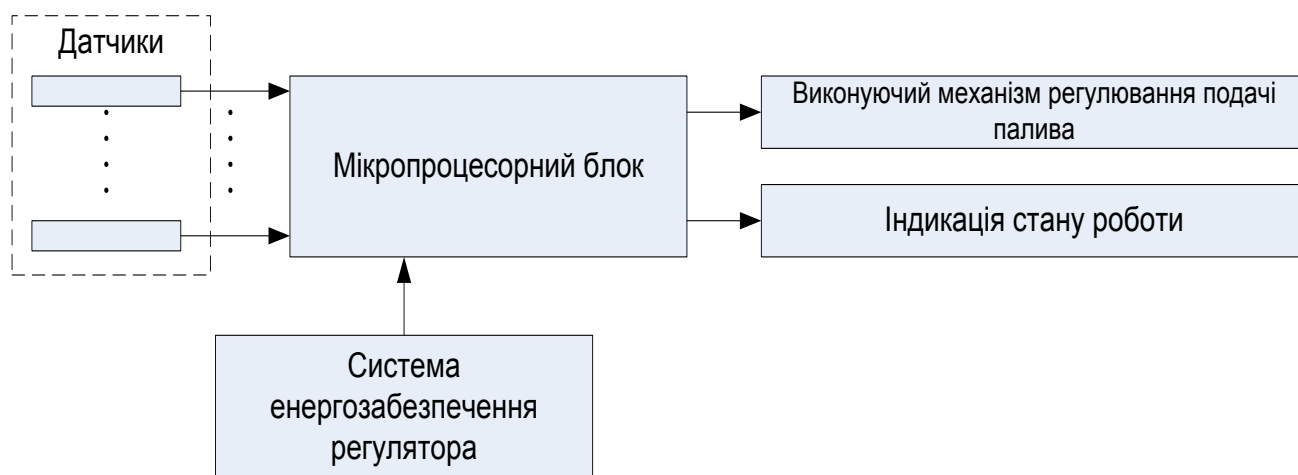


Рисунок 1.7 – Узагальнена функціональна схема електронного регулятора дизеля з ПНВТ

Електронний регулятор складається з мікропроцесорного блоку, датчиків, виконуючого механізму подачі палива, індикаторів стану роботи, системи живлення регулятора.

До функцій мікропроцесорного блоку входить обчислення необхідних значень положення виконуючих механізмів, виходячи з інформації отриманої з датчиків; комутація вхідних аналогових сигналів в цифровий вид; генерація сигналів індикації стану роботи; самодіагностика.

Розроблено узагальнену структурну схему мікропроцесорного блоку (рис. 1.8.). Мікропроцесорний блок складається з цифрового процесора, оперативного запам'ятовуючого пристрою (ОЗП), постійного запам'ятовуючого пристрою (ПЗП), аналого-цифрових (АЦП) та цифро-аналогових (ЦАП) перетворювачів, портів вводу та виводу сигналів, джерела напруги з запобіжниками.

В залежності від розробленого алгоритму роботи регулятори різняться кількістю та значенням вхідних сигналів мікропроцесорного блоку. Ряд датчиків мають за свою вихідну координату зміну величин сили струму, навантаження, зміну опору. Для можливості оброблювати вхідні сигнали з аналогових датчиків мікропроцесорний блок обладнаний аналого-цифровими перетворювачами. Вхідними координатами ряду виконуючих електромагнітних механізмів є сила струму. Задля управління подібними пристроями блок управління обладнаний цифро-аналоговими перетворювачами.

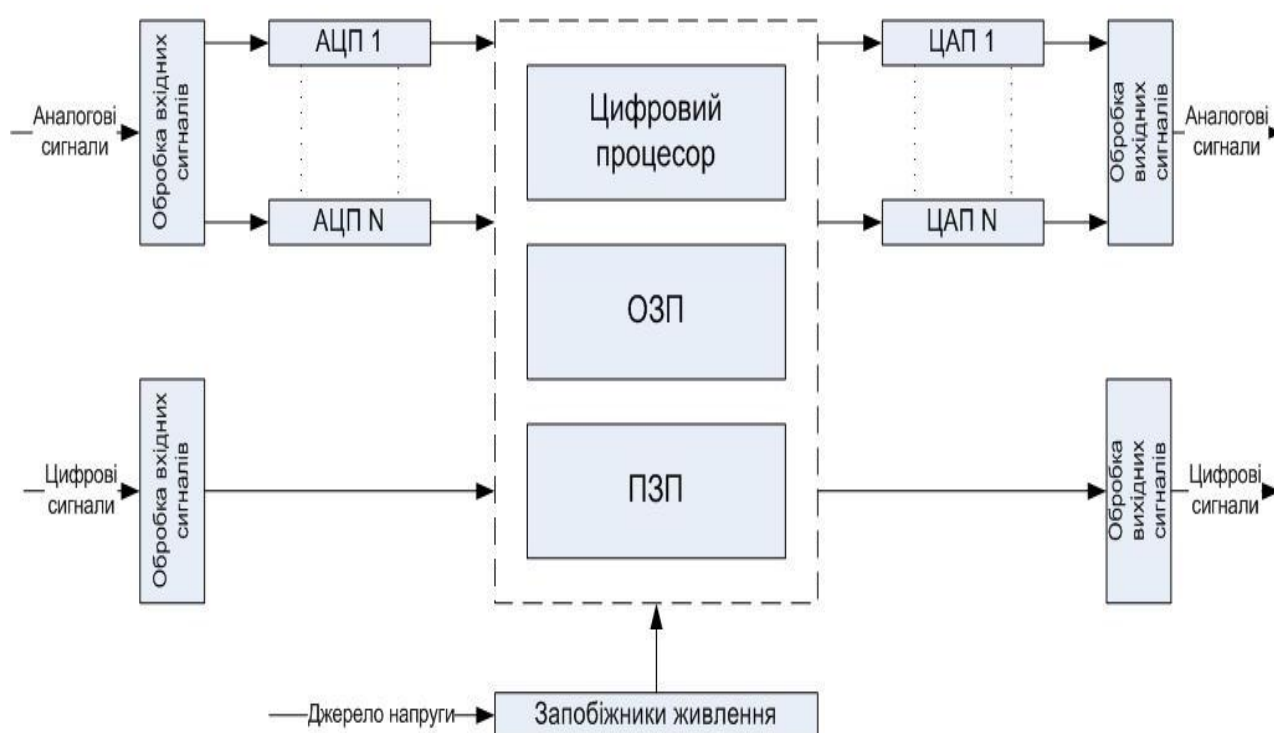


Рисунок 1.8 – Структура мікропроцесорного блоку

Кількість АЦП та ЦАП визначається виходячи з кількості задач, що має розв'язати система регулювання. Вважаємо, що мінімальна кількість АЦП для системи регулювання САРЧ дизеля становить 4.

АЦП використовуються для конвертації сигналів з аналогових датчиків в цифрову форму, ЦАП – для генерації керуючих сигналів для виконуючих механізмів та сигналів стану роботи (індикації).

За результатами дослідження [61] проаналізовано наявність мінімальної необхідної кількості датчиків, що використані в сучасних МР.

Датчиками забезпечується обробка МР наступних сигналів: від педалі управління паливоподачею (цифрова педаль); частоти обертання колінчастого вала; зворотного зв'язку за положенням виконуючого механізму подачі палива; сигнал вмикання стартера; зупинки двигуна; температури охолоджуючої рідини; температури навколишнього повітря; температури оливи, тиску оливи; тиску наддуву. Загальна кількість зовнішніх сигналів – 10.

В залежності від вимог, що постають перед виробниками транспортного засобу індикація стану роботи може суттєво відрізнятися одна від одної [62]. Відповідно до цього змінюються і вимоги до системи регулювання щодо генерації сигналів індикації стану роботи. Одним з універсальних засобів діагностики роботи системи регулювання на етапі випробувань є розробка програмного діагностичного комплексу, встановленого на персональний комп'ютер. Виходячи з сучасних тенденцій розвитку комп'ютерної техніки найбільш зручними для підключення мікропроцесорного блоку до діагностичного комп'ютера є інтерфейси USB та RS-232 [63]. Під час експлуатації системи регулювання необхідно визначати справність мікропроцесорного блоку без використання спеціальних діагностичних комплексів [64]. Індикація справності базових алгоритмів роботи реалізовано за допомогою світлодіодних індикаторів встановлених в мікропроцесорному блоці.

Багато сучасних транспортних засобів обладнано бортовими комп'ютерами [65]. Електронна система регулювання стоїть на щабель нижче в ієрархічному рівні за бортовий комп'ютер [66]. Частина вхідних сигналів до електронного регулятора може поступати не безпосередньо з датчиків, а як вихідні сигнали, з бортового комп'ютера. До вимог, що висуваються до мікропроцесорного блоку, виділяються зв'язок з бортовим комп'ютером та наявність цифрових входів та аналогових виходів [67] що будуть забезпечувати автоматизу роботи системи, та слугувати зворотнім зв'язком до бортового комп'ютера.

Система живлення струмом системи регулювання складається зі штатних акумуляторів постійного струму встановлених на транспортному засобі, та з запобіжників що захищають регулятор від перевищення напруги. Для автотракторних дизелів напруга живлення системи регулювання складає 12 В, або 24 В постійного струму [68].

Виконуючі механізми, що використовуються для переміщення рейки паливного насосу, за принципом роботи поділяються на електромагнітні та електрогідравлічні.

В електромагнітних виконуючих механізмах сила, що переміщає рейку ПНВТ створюється електромагнітом. Подібні виконуючі механізми можуть бути виконані або у виді поступального пропорційного електромагніту (вихідний важіль електромагніту підключено до рейки паливного насосу), або у виді обертового пропорційного електромагніту (на вихідний вал електромагніту встановлено важіль, що за допомогою рейки підключено до рейки паливного насосу).

В електрогідравлічних виконуючих механізмах переміщення рейки ПНВТ відбувається за допомогою тиску робочої рідини (паливо, олива). Управління гідравлічною частиною здійснюється за допомогою електрично-керованих перепускних клапанів.

Виконуючі механізми обладнано датчиками зворотного зв'язку за положенням рейки ПНВТ.

Основні результати аналізу систем виконуючих механізмів для електронних регуляторів надруковано в праці [69]. Аналіз показав, що швидкохідні багатополюсні електродвигуни постійного струму у складі сервоприводу можна застосовувати в МР частоти обертання колінчастого вала дизеля.

1.4. Задачі дослідження електронної САРЧ для автомобільного дизеля

Переважає більшість сучасних систем автоматики – це ПІД регулятори. Використання ПІД-регулювання частоти обертання колінчастого вала добре

зарекомендувало себе в дизель-генераторах, газодизельних та газових двигунах з електронними системами регулювання, тракторних двигунах. Проте, незважаючи на широкий досвід використання ПД-регуляторів, відкритим залишається питання налаштування ПД-параметрів регулятора. Особливо актуальним це є для автомобільних і тракторних дизелів, що працюють в широкому швидкісному діапазоні. Виробники систем регулювання обмежуються загальними емпіричними порадами, що стосуються саме їх виробів.

Подальше дослідження САРЧ автомобільних дизелів потребує:

1. Розробки і дослідження функціональних складових електронної САРЧ дизеля для колісного транспортного засобу: ЕБК і ВМ;
2. Уточнення динамічної математичної моделі САРЧ автомобільного дизеля та саме електронного регулятора, перевірки адекватності математичної моделі;
3. Проведення розрахункових досліджень роботи САРЧ дизеля за різних експлуатаційних режимів;
4. Дослідження автомобільного дизеля, обладнаного експериментальною електронною САРЧ для підтвердження отриманих результатів;
5. Розробка рекомендацій з вибору та налаштування електронної всережимної САРЧ автомобільного дизеля з ПД-алгоритмом управління.

За матеріалами розділу опублікована стаття [69].

Висновки до розділу 1

1. Проведений аналіз різних типів автоматичних систем регулювання дизеля показав необхідність використання електронних регуляторів. Встановлено такі переваги електронних регуляторів в порівнянні з механічними, гідравлічними та пневматичними регуляторами: електронні регулятори є регуляторами непрямої дії, що дозволяє уникнути зміни кута нахилу регуляторної гілки в залежності від швидкісного режиму. Відсутність прямої залежності корегуючої сили від частоти обертання двигуна покращує стабільність роботи двигуна на низьких частотах обертання колінчастого вала.

Електронні регулятори дозволяють вводити інтегральної та диференціальної складової в закон регулювання без конструктивних складнощів.

2. В якості об'єкта теоретичних і експериментальних досліджень обрано мікропроцесорну систему регулювання, яка відповідає наступним критеріям: система регулювання дизеля забезпечує всережимний алгоритм роботи; реалізує регулювання за ПД-алгоритмом. Система регулювання складається з мікропроцесорного блоку, виконуючого механізму та цифрової педалі управління.

3. Аналіз попередніх досліджень показав, що складові електронної САРЧ повинні відповідати таким вимогам:

- мікропроцесорний блок обладнано необхідною кількістю аналогових та цифрових входів та виходів. (Мінімальна кількість аналогових входів – 5, цифрових входів – 5, аналогових виходів – 1, цифрових виходів – 1);
- виконавчий механізм призначено для управління рейки рядного паливного насосу. Виконуючі механізми обладнано зворотнім зв'язком за положенням рейки;
- педаль управління автотранспортним засобом має за свою вихідну координату електричний аналоговий сигнал;
- система регулювання обладнана цифровими входами та виходами для забезпечення вимог автоматизації процесів роботи автотранспортного засобу;
- система регулювання обладнана інтерфейсом для підключення діагностичних комплексів та індикацією режимів роботи.

4. Основною задачею дослідження є вивчення впливу ПД-параметрів регулювання на роботу автотракторного дизеля, обладнаного електронним всережимним регулятором швидкості. Визначення рекомендованих параметрів налаштування на різних швидкісних і навантажувальних режимах. Визначення оптимальних параметрів налаштування що будуть задовольняти оптимізації роботи двигуна в статичному і динамічному режимах.

РОЗДІЛ 2

РОЗРОБКА ЕЛЕКТРОННОЇ ВСЕРЕЖИМНОЇ САРЧ ДИЗЕЛЯ З ПІД-ЗАКОНОМ УПРАВЛІННЯ

2.1. Розробка структурної схеми

З аналізу узагальненої функціональної схеми електронного регулятора дизеля, наведеної в п.1.3 (рис. 1.1), визначено загальні складові компоненти структурної схеми.

До аналогових сигналів, що обробляються мікропроцесорним блоком було обрано: задатчик частоти обертання колінчастого вала (цифрова педаль управління), датчик частоти обертання колінчастого вала дизеля, датчик зворотного зв'язку за положенням виконуючого механізму, датчик температури двигуна, датчик тиску оливи.

До цифрових сигналів, що оброблюються мікропроцесорним блоком відносяться: сигнал дозволу роботи, сигнал від аварійного датчика температури охолоджуючої рідини, сигнал від аварійного датчика тиску оливи.

Сигнал керування ВМ є аналоговим сигналом на виході з мікропроцесорного блоку.

За узагальненою функціональною схемою (рис. 1.7) розроблено деталізовану структурну схему всережимного електронного регулятора САРЧ дизеля, яку показано на рис. 2.1.

На підставі аналізу рис. 2.1 визначили необхідні складові компоненти системи регулювання. Встановлення електронної системи регулювання на колісному автотранспортному засобі дозволяє використовувати штатні датчики аварійних ситуацій за температурою охолоджуючої рідини та за тиском оливи в двигуні.

В якості джерела живлення електронних компонентів системи регулювання використовуються штатні акумулятори транспортного засобу. Напруга живлення

системи регулювання було 12 В. На випадок інтегрування САРЧ в електронну систему контролю і автоматизації автотранспортного засобу передбачено цифрові сигнали дозволу роботи САРЧ та сигнал індикації стану роботи.

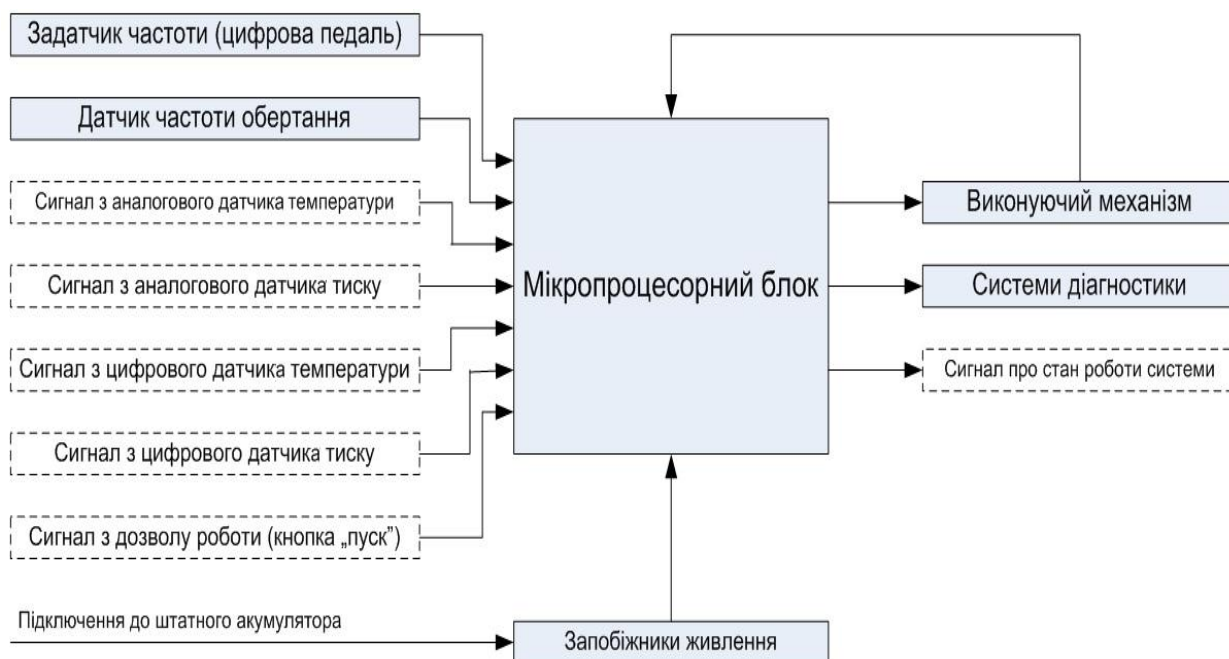


Рисунок 2.1 – Структурна схема електронного всережимного регулятора САРЧ дизеля

До компонентів електронної САРЧ, що встановлюються на автотранспортний засіб відносяться: мікропроцесорний блок, задатчик частоти (електронна педаль), датчик частоти обертання колінчастого вала двигуна, запобіжник живлення системи енергопостачання САРЧ, виконавчий механізм.

2.2. Обґрунтування введення ПІД-закону управління в електронну САРЧ дизеля

З аналізу структурної схеми (рис. 2.1) визначено, що електронна САРЧ є регулятором непрямої дії. Єдиною механічною складовою електронної САРЧ є

ВМ та його механічний зв'язок з ПНВТ. В розділі 1 в якості ВМ обґрунтовано вибір електромагнітного ВМ. Через відсутність попередніх даних про ВМ, на початку дослідження було прийнято, що рух ВМ описується наступним рівнянням першого порядку [70]:

$$T_{\text{ім}} \frac{dh_p}{dt} + h_p = k_{\text{ім}} U_{\text{кер}}, \quad (2.1)$$

де $T_{\text{ім}}$ – електромеханічна стала часу;

h_p - переміщення рейки ПНВТ;

$k_{\text{ім}}$ – коефіцієнт підсилення ВМ;

$U_{\text{кер}}$ – напруга, що керує ВМ.

Нехтуючи затримкою в часі в датчику частоти та мікропроцесорному блоці, з урахуванням ПІД складових рівняння (2.1) приймає вид:

$$T_{\text{ім}} \frac{dh_p}{dt} + h_p = k_{\text{п}} \varphi + k_{\text{д}} \frac{d\varphi}{dt} + k_{\text{і}} \int \varphi dt, \quad (2.2)$$

де $k_{\text{п}}$ – коефіцієнт підсилення пропорційної (П) складової,

$k_{\text{і}}$ – коефіцієнт підсилення інтегральної (І) складової,

$k_{\text{д}}$ – коефіцієнт підсилення диференціальної (Д) складової.

З аналізу рівняння (2.2) визначили, що важливими параметрами САРЧ є значення коефіцієнтів $k_{\text{п}}$, $k_{\text{і}}$, та $k_{\text{д}}$.

Коефіцієнт підсилення пропорційної складової $k_{\text{п}}$ відповідає за протидію відхилення частоти обертання від заданого значення. Високе значення $k_{\text{п}}$ зменшує статичну похибку регулювання, проте при високих значеннях $k_{\text{п}}$ збільшується амплітуда коливань, що виникли внаслідок виникненні затримок в системі регулювання і САРЧ може вийти в режим автоколивань [71].

Інтегральна складова (коефіцієнт підсилення інтегральної складової $k_{\text{і}}$) використовується для зменшення статичної похибки. Якщо система не буде

зазнавати змін навантаженні, то через деякий час частота стабілізується на заданому рівні, сигнал за пропорційною складовою буде дорівнювати нулю, а регулювання буде відбуватися за інтегральною складовою.

Коефіцієнт підсилення диференціальної складової k_D відповідає за протидію відхиленням частоти обертання, що очікуються. В автотракторному засобі диференціальна складова може зменшувати вплив похибки, що виникає внаслідок вібрації. Це потребує підтвердження і буде досліджуватись в ході цієї роботи.

З матеріалів праці [72] запропоновано функціональну схему САРЧ з ПІД-управлінням, яка показана на рис. 2.2.

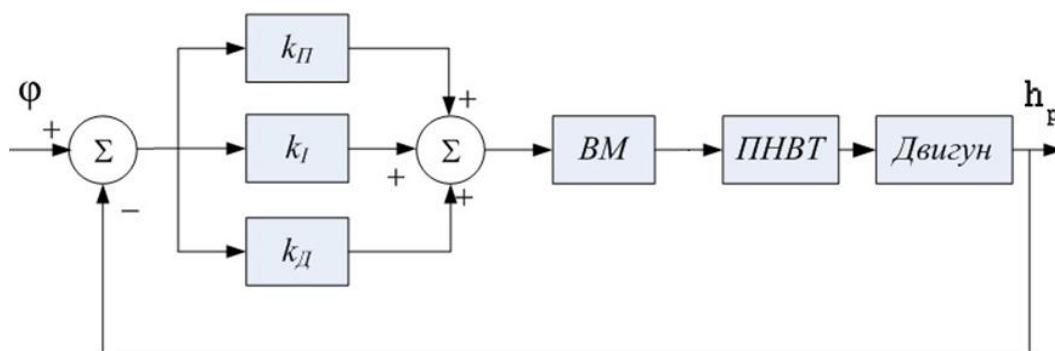


Рисунок 2.2 – Функціональна схема САРЧ з ПІД-управлінням

В дослідженнях електронного регулятора непрямої дії [73], що проводилися на дизелі Д-6 (6ЧН15/18), отримано залежність часу перехідного процесу від коефіцієнта k_P , при різних значеннях k_I (рис. 2.3).

При проведенні досліджень [74] значення k_D дорівнювало 1. З аналізу рис. 2.3 видно кореляцію між параметрами k_I та k_P . Автори досліджень вважають, що при великих значеннях k_P значення k_I несуттєві.

Авторами дослідження обрано значення $k_P = 20$ та $k_I = 0$. Вважаємо, що підвищення значення k_P більше 20 призводить до жорсткої роботи електромагнітного ВМ, підвищення його електричної потужності та росту механічних навантажень на механічні компоненти складових ВМ та ПНВТ.

Вважаємо, що для зменшення часу перехідних процесів доцільно вводити параметри ПД-регулювання вихідного параметра не за частотою колінчастого вала, а за положенням рейки ВМ. Дизель – дуже інерційна ланка САРЧ. Зміни циклової подачі палива призводять до зміни частоти обертання колінчастого вала з затримкою в секунди, в той час коли зміна струму живлення ВМ приводить до змін положення рейки ПНВТ за долі секунди [75]. Тому час відгуку в системі мікропроцесорний блок-ВМ менший за час відгуку в системі ПНВТ-дизель. Це дозволяє вводити високі значення П-складової без ризику виходу системи в режим автоколивань.

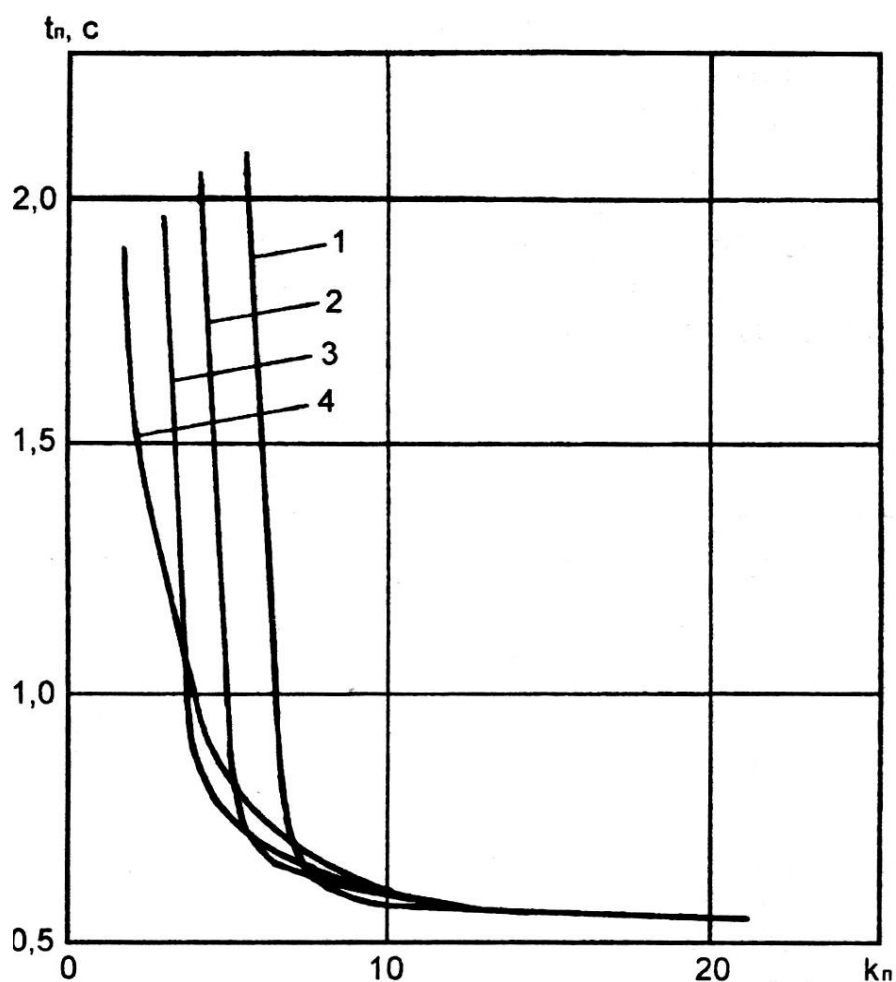


Рисунок 2.3 – Залежність часу перехідного процесу дизеля 6ЧН15/18 від коефіцієнта k_n при:

$$1 - k_I = 0; 2 - k_I = 0,5; 3 - k_I = 1; 4 - k_I = 2.$$

2.3. Виконавчий механізм і зворотній зв'язок

В п.1.3. обґрунтовано вибір електромагнітного ВМ електронної САРЧ.

Значення k_{Π} визначають швидкодію ВМ. Параметром, що обмежує швидкодію ВМ є значення максимальної потужності ВМ. Згідно дослідженням [33] значення потужності електродвигуна ВМ обрано виходячи з необхідності прикладення до рейки ПНВТ зусилля, мінімальне значення якого не менше 0,4 Н на одну секцію ПНВТ.

Обладнання рейки штатного ПНВТ датчиком зворотного зв'язку вважаємо недоцільним. Датчик зворотного зв'язку був встановлений в конструкції ВМ. Це зменшило необхідність внесення конструкційних змін до конструкції паливної апаратури дизелів існуючих транспортних засобів та дозволить проводити діагностичні роботи при неробочому двигуні. Конструкцію ВМ з встановленим датчиком зворотного зв'язку показано на рис. 2.4.

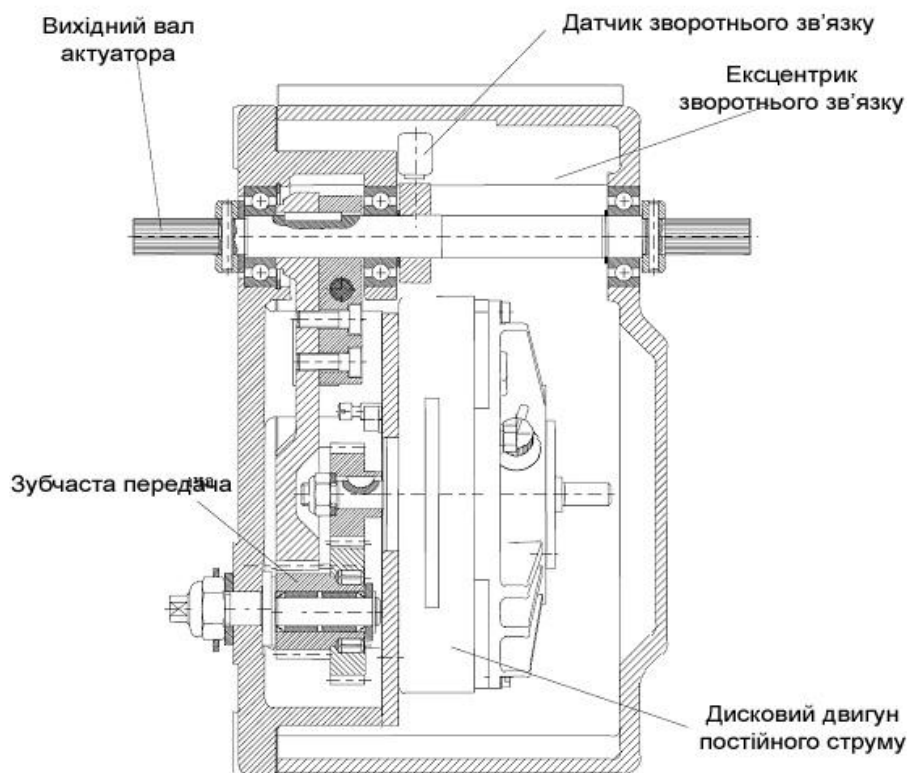


Рисунок 2.4 – Конструкція ВМ з встановленим датчиком зворотного зв'язку [28]

Виконавчий механізм виконано в алюмінієвому брудо- та пилозахисному корпусі. Виконавчий механізм зроблено на базі дискового двигуна постійного струму, що за допомогою знижуючої шестеренної передачі повертає вихідний вал. На вихідному валу закріплено ексцентричну пластину. При обертанні вала відстань між цією пластиною та датчиком зворотного зв'язку змінюється, що призводить до зміни сигналу на виході датчика.

2.4. Технічні параметри та конструкція експериментальної всережимної САРЧ дизеля

Розроблено експериментальний зразок електронної всережимної САРЧ для автомобільного дизеля 4ЧН12/14. Основні структурні елементи експериментального мікропроцесорного регулятора виконані на базі елементів фірми Heinzmann.

Вибір цих елементів зумовлено відповідністю можливостей складових задачам дослідження. Електронні регулятори серії Pandaros фірми Heinzmann є регуляторами частоти обертання. Додатковими функціями регулятора є: налаштування стартової подачі палива, темп зміни частоти обертання, всережимне управління частотою обертання, установка діапазону частоти обертання, захист від перевищення частоти обертання, корекція ПІД-параметрів, обмеження подачі палива в залежності від частоти обертання колінчастого вала, Залежність частоти обертання холостого ходу і обмеження подачі палива від температури охолоджуючої рідини, діагностика і перегляд помилок. Більш детально ці функції описано нижче.

Налаштування стартової подачі палива.

При завданні стартової подачі можливо вибрати як мінімальну, так і максимальну циклові подачі палива. При необхідності, стартова подача була задана залежно від температури двигуна. Доступний режим, за яким стартова подача палива автоматично збільшується протягом запуску дизеля.

Темп зміни частоти обертання.

Для використання на транспортних засобах, коли частота обертання не повинна швидко змінюватися при зміні задаючих значень, можливо задати прискорення частоти обертання. Для запуску може бути забезпечений окремий темп зміни частоти обертання, який забезпечить повільну зміну стартової частоти обертання дизеля.

Всережимне управління частотою обертання із зоною пропорційного регулювання, що налаштовується.

У випадках, коли потрібне регулювання частоти обертання із зоною пропорційного регулювання (ЗПР), при паралельній роботі електрогенераторної установки без пристрою виміру навантаження. Із зоною пропорційного регулювання, налаштованою на 0, отримано астатичну регуляторну характеристику.

Установка діапазону частоти обертання.

Мінімальна і максимальна частоти обертання, задані зовнішнім пристроєм, можуть бути представлені в цифровому вигляді [76].

Захист від перевищення частоти обертання.

Значення частоти обертання представлено в цифровому вигляді і контролюється електронним блоком. При перевищенні значення, МР видає сигнал тривоги, а актуатор переходить в положення останову.

Корекція ПД-параметрів.

Для оптимізації динамічних характеристик дизеля та його перехідних процесів, можна корегувати ПД-параметри для кожної робочої точки залежно від частоти обертання і навантаження [60].

Обмеження подачі палива в залежності від частоти обертання колінчастого вала.

МР підтримує можливість запрограмувати криві обмеження подачі палива залежно від частоти обертання таким чином, що для всього діапазону частоти обертання подача палива може бути змінена залежно від експлуатаційного режиму роботи дизеля.

Залежність частоти обертання холостого ходу і обмеження подачі палива від температури охолоджуючої рідини.

При низьких температурах дизель може бути запущений на вищій частоті обертання холостого ходу. Після прогрівання дизеля частота обертання холостого ходу зменшується до її значення холостого ходу прогрітого двигуна. Криві обмеження подачі палива програмуються залежно від температури охолоджуючої рідини [77].

Діагностика і перегляд помилок.

В разі виходу з ладу датчика або ВМ, здійснюється перехід на аварійний режим роботи, або повна зупинка дизеля. Внутрішні помилки визначаються і зберігаються так само, як і всі інші. Всі помилки можна проглянути за допомогою ручного програматора, додаткового вбудованого програматора, персонального комп'ютера або переносного комп'ютера за наявності комунікаційної програми і комунікаційного кабелю.

Для підключення до систем діагностики і налаштування є два серійні інтерфейсні порти: ISO 9141 і Rs-232.

Для проведення безмоторних досліджень експериментальна САРЧ складалась з датчика частоти вала ПНВТ, мікроконтролера з програмним забезпеченням для реалізації алгоритму управління та електромеханічного ВМ.

В якості мікроконтролера обрано електронний блок Pandaros (рис. 2.5), в якості виконавчого механізму - актуатор StG 2010-01 [78], в якості датчика частоти вала ПНВТ – датчик Холла серії IA 03-102.

Виконавчий механізм експериментального МР створено на основі ВМ типу StG 2010-01. ВМ являє собою електричний двигун постійного струму, встановлений в герметичному корпусі. В конструкції ВМ не було встановлено редуктора. Вал електричного двигуна є валом ВМ. На валу електродвигуна закріплений металева пластина.

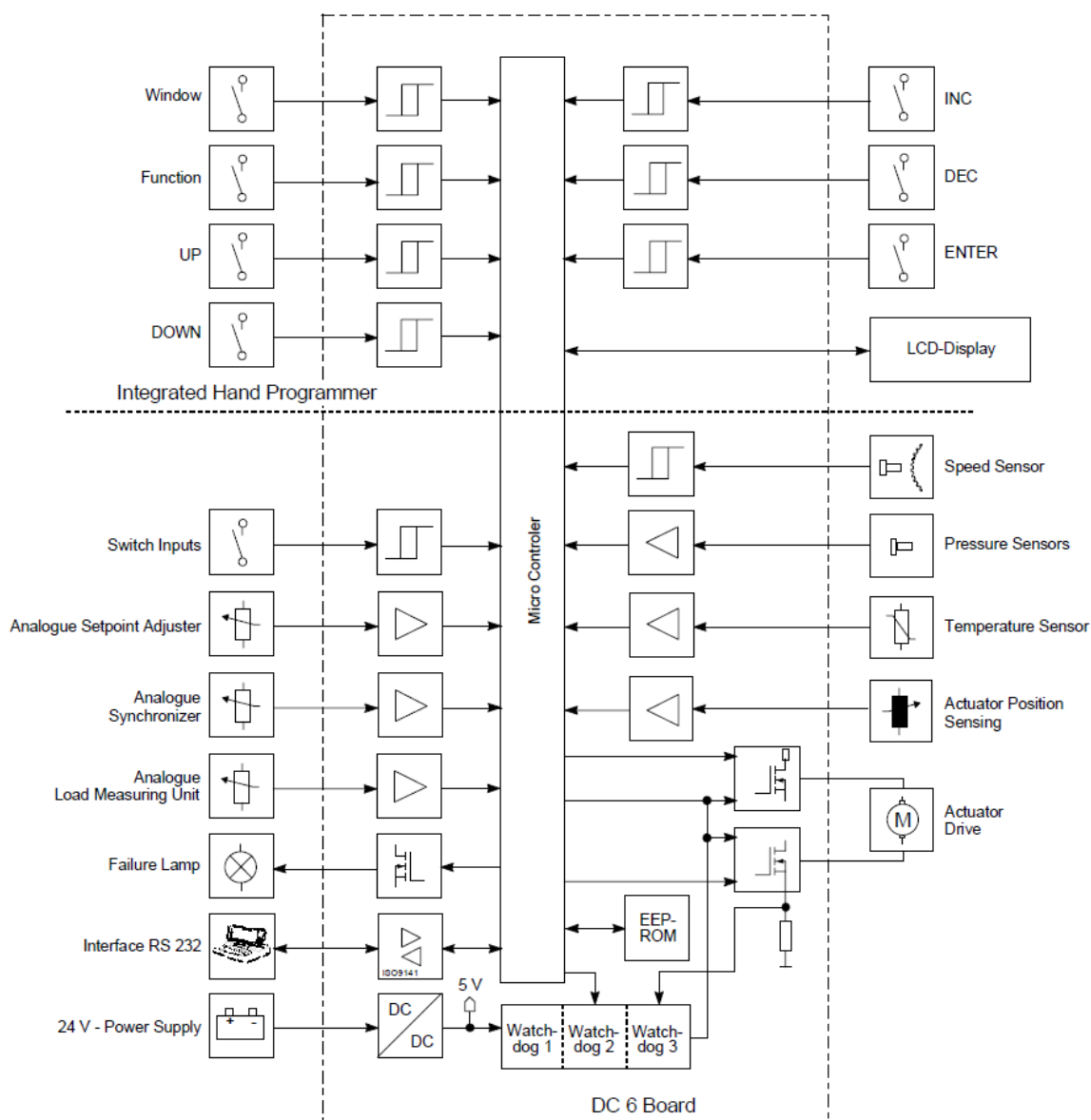


Рисунок 2.5 – Структурна схема електронного блоку керування Pandaros [28]
(Розшифровка написів приведена в додатку А)

На корпусі ВМ встановлено індуктивний датчик, що реагує на відстань до пластини. Форма пластини підібрана таким чином, що при рівномірному обертанні вала ВМ відстань між пластиною та індуктивним датчиком змінюється лінійно. Сигнал індуктивного датчика є сигналом зворотного зв'язку за положенням вала ВМ. Електричний двигун керується за допомогою широтно-імпульсної модуляції струму живлення.

Технічні характеристики структурних елементів мікропроцесорного регулятора наведено в табл. 2.1 – 2.3.

Таблиця 2.1. – Технічні характеристики електронного блоку Pandaros

Параметр	Значення
Напруга живлення, В (пост.)	12 чи 24
Мінімальна напруга, В (пост.)	9
Максимальна напруга, В (пост.)	33
Мінімальна напруга пульсацій	Макс. 10 % на 100 Гц
Споживання струму	Макс. 7 А та макс. 11 А на 60 сек
Допустиме падіння напруги при максимальному струмі споживання	Макс. 10 %
Навколишня температура при роботі, °C	-40...+80
Вологість, % при 55°C	до 98
Динамічна міцність	Макс. 2 мм при частоті від 10 до 20 Гц. Макс. 0,24 м/с при частоті від 21 до 63 Гц. Макс 7 g при частоті від 64 до 2 000 Гц
Удар	50 g, 11 мс від половини синус. хвилі
Опір ізоляції	>1 МОм при 48 В пост. струму
Тип захисту	IP00
Вага, кг	0,5

Таблиця 2.2. – Технічні характеристики виконавчого механізму StG 2010-01

Параметр	Значення
Кут повороту вихідного вала, град.	36
Макс. момент на вихідному валу, Нм	1,4
Утримуючий момент при обмеженні струму, Нм	0,7
Час реакції 0-100 % без навантаження, мс	45
Загальне споживання струму регулятора, А: в усталеному режимі при зміні навантаження макс. струм при обмеженні струму	~1 ~3...4 ~4,5 ~2,5
Навколишня температура при роботі, °C	-25 ... +90
Вологість, % при 55°C	до 100
Тип захисту корпус роз'єми	IP65 IP00/ IP65
Вага, кг	2,2

Таблиця 2.3. – Технічні характеристики датчика частоти ІА 03-102

Параметр	Значення
Метод вимірювання	Індуктивний, активний
Діапазон вимірювання, Гц	50 ... 9000
Діапазон вихідного сигналу, В	0...10 (змінн.)
Опір, Ом	52
Форма сигналу	Синусоїдальний (в залежності від профілю зуба)
Навколишня температура при роботі, °С	-55 ... +120
Тип захисту	IP 55
Вібрації	< 10 g, 10...100 Гц
Удар	< 50 g, 11 мс від половини синус. хвилі

Зовнішній вид електронного блоку Pandaros та виконавчий механізм StG 2010-01 показано на рис. 2.6.



Рисунок 2.6 – Зовнішній вид електронного блоку та виконавчого механізму

САРЧ

Для встановлення ВМ на ПНВТ розроблено монтажну конструкцію, що встановлюється на місце штатного механічного регулятора частоти. Креслення розробленої конструкції наведено в додатку Б.

Зовнішній вид датчика частоти обертання, встановленого на двигуні показано на рис.2.7. Зовнішній вид виконуючого механізму, встановленого на ПНВТ, показано на рис. 2.8



Рисунок 2.7 – Датчик частоти обертання на дизелі



Рисунок 2.8 – Виконуючий механізм, встановлений на ПНВТ в ході безмоторних випробувань

Встановлення блоку керування можливо як в підкапотному просторі, так і в кабіні транспортного засобу [79]. На рис. 2.9. зображено варіант встановлення блоку керування в ході дорожніх випробувань на тракторі Т150-К. Місце встановлення – в кабіні трактора під панеллю керування.

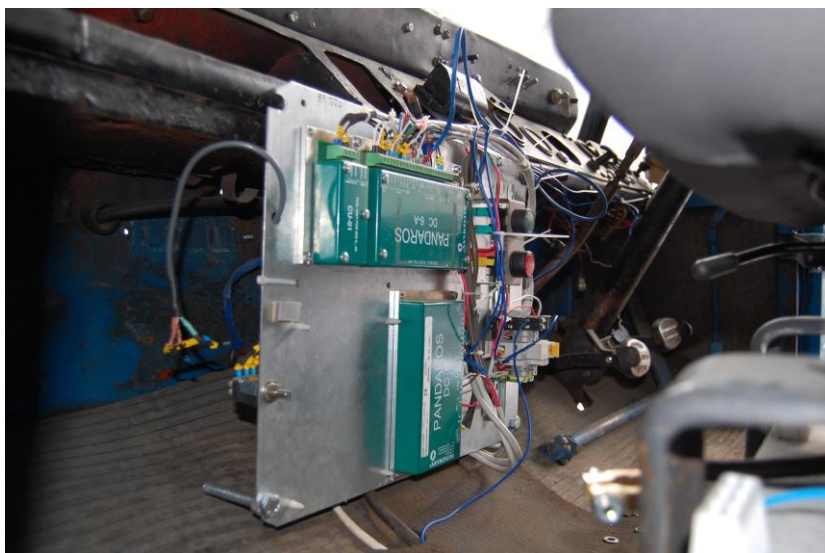


Рисунок 2.9 – Встановлення блоку керування в кабіні транспортного засобу

На рис. 2.10. зображено встановлення блоку керування в ході моторних випробувань дизеля 6Ч13/14.



Рисунок 2.10 – Блок керування в ході моторних випробувань дизеля 6Ч13/14

На рис. 2.11. зображено інтерфейс сервісної програми для налаштування електронного блоку керування. На рис. 2.12. зображено схему встановлення датчика частоти обертання дизеля на маховик колінчастого вала.

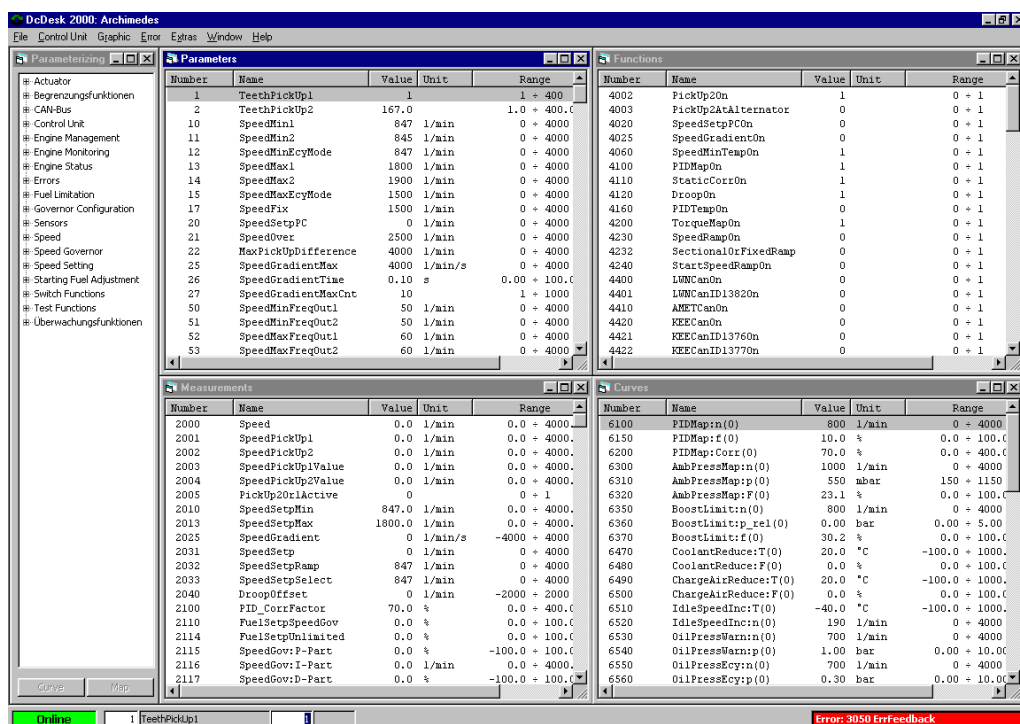


Рисунок 2.11 – Інтерфейс сервісної програми для налаштування електронного блоку керування

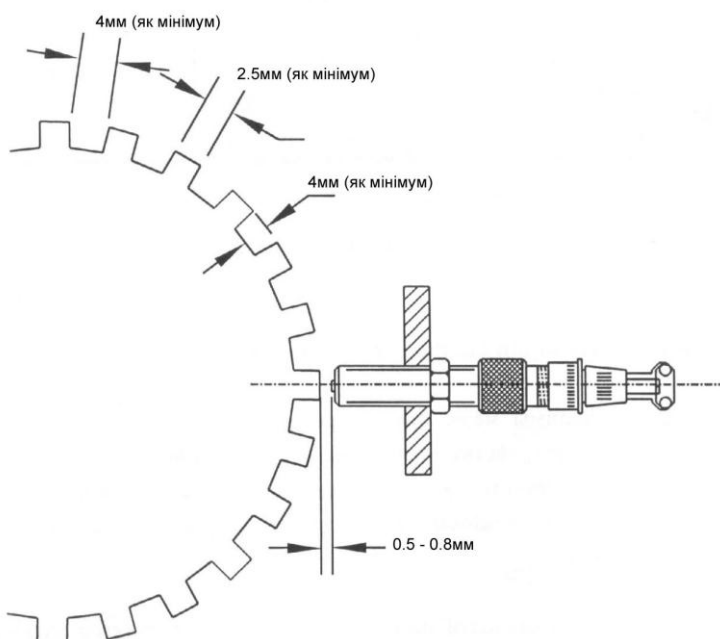


Рисунок 2.12 – Схема встановлення датчика частоти обертів

На рис. 2.13. зображено електричну схему підключення електронного блоку управління до обладнання дизеля.

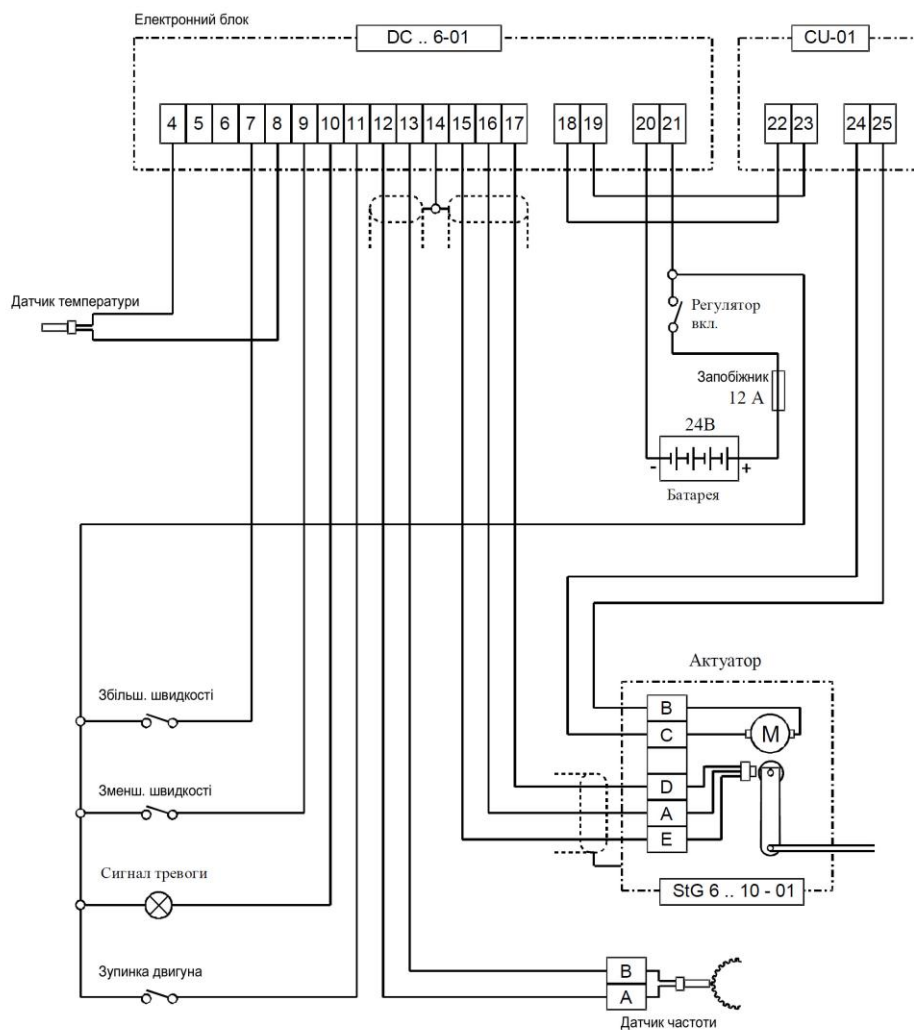


Рисунок 2.13 – Електрична схема підключення електронного блоку управління

За матеріалами розділу опубліковані праці [72, 80-83].

Висновки до розділу 2

1. Розроблено структурну схему експериментального електронного всережимного САРЧ дизеля. Обґрунтовано та визначено необхідні складові компоненти системи регулювання, а саме: електронний блок керування, виконавчий механізм та датчик частоти обертання колінчасового вала. ВМ обрано

на базі електричного двигуна постійного струму без знижуючого редуктора. ВМ обладнано зворотнім зв'язком за положенням вала. Електронний блок обрано з 9 цифровими та 6 аналоговими входами. В якості датчика частоти обертання обрано індуктивний активний датчик, що встановлюється на маховику дизеля.

2. Проведено аналіз впливу складових ПД-регулювання на процес регулювання. За результатами аналізу визначено обрано функціональну схему, що регулює ПД-параметри за частотою обертання колінчастого вала.

3. Визначено, що розроблена електронна САРЧ є регулятором непрямої дії. Єдиною механічною складовою електронної САРЧ є ВМ та його механічний зв'язок з ПНВТ.

4. Значення потужності електродвигуна ВМ обрано виходячи з необхідності прикладення до рейки ПНВТ зусилля, мінімальне значення якого не менше 0,4 Н на одну секцію ПНВТ. Сумарна потужність двигуна ВМ експериментальної САРЧ для чотирициліндрового двигуна 12/14 була обрана 1,4 Н.

5. Розроблено креслення конструкції для кріплення ВМ на ПНВТ.

РОЗДІЛ 3

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ДИЗЕЛЯ З ЕЛЕКТРОННОЮ ВСЕРЕЖИМНОЮ САРЧ З ПІД-РЕГУЛЮВАННЯМ

3.1. Базова модель САРЧ дизеля для дослідження

За основу для розробки електронної САРЧ з всережимним регулятором обрано математичну модель САРЧ дизеля з дворежимним регулятором швидкості обертання колінчастого вала, що було розроблено на кафедрі "Двигуни і теплотехніка" Національного транспортного університету [84].

Програмні обчислення проводили в комплексі MatLab. Загальна модель САРЧ була поділена на наступні структурно-логічні блоки: блок регулятора частоти обертання колінчастого вала, блок ПНВТ, блок наддуву дизеля та блок зовнішнього навантаження. Верхній ієрархічний рівень моделі наведений на рис. 3.1.

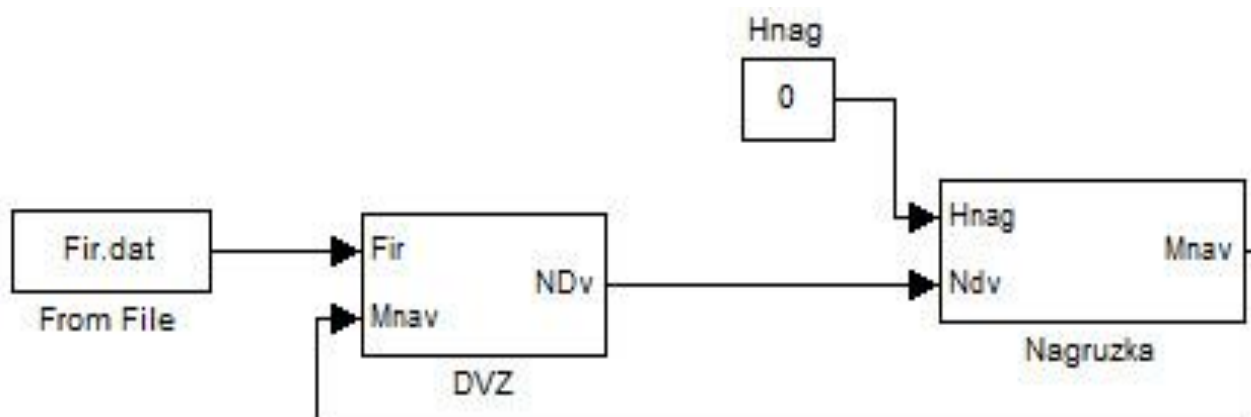


Рисунок 3.1 – Верхній ієрархічний рівень моделі дизеля обладнаного електронною САРЧ, в програмному комплексі MatLab [84]:

Fir - переміщення цифрової педалі газу; ND_v – частота обертання колінчастого вала. ; M_{nav} – момент навантаження на колінчастому валу дизеля; H_{nag} – початкове значення навантаження; DVZ – розрахунковий блок дизеля зі встановленою САРЧ; $Nagruzka$ – розрахунковий блок зовнішнього навантаження.

Блок зовнішнього навантаження, що відтворює роботу гальмівного стенду, було задано рівнянням:

$$M_{\text{нг}} = A_{\text{нг}} \cdot n_{\text{д}} + H_{\text{нг}}, \quad (3.1)$$

де: $M_{\text{нг}}$ – момент зовнішнього навантаження;

$n_{\text{д}}$ - частота обертання колінчастого вала дизеля;

$A_{\text{нг}}$ та $H_{\text{нг}}$ - коефіцієнти апроксимації.

Блок (DVZ) встановленого на двигуні обладнання включає в себе відтворення алгоритмів роботи дизеля, ПНВТ, системи турбонаддуву та електронного регулятора. Математична модель блоку DVZ показано на рис. 3.2.

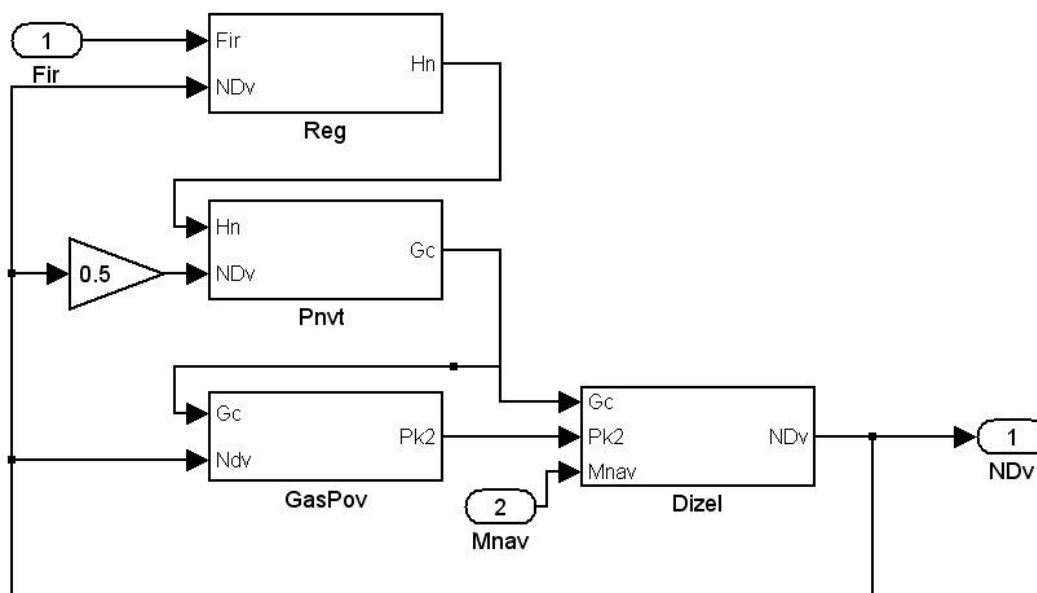


Рисунок 3.2 – Математична модель блоку DVZ [83]:

Reg – блок електронного регулятора; Pnvt – блок ПНВТ; GasPov - блок турбонаддуву; Dizel – блок дизеля; Hn – переміщення рейки ПНВТ; Gc – циклова подача палива, Pk2 – тиск у впускному колекторі.

За основу динамічної математичної моделі дизеля (Dizel) взято диференціальне рівняння руху дизеля за неусталених режимів роботи, яке відповідає принципу д'Аламбера – всі сили врівноважуються силою інерції [83]. Рівняння в нормальній формі має вид

$$\frac{dn_d}{dt} = \frac{30}{\pi \cdot J_{\pi}} [M_i(q_{\pi}, p_{\kappa 2}, n_d) - M_m(n_d) - M_{нг}(n_d)], \quad (3.2)$$

де: J_{π} - приведений до колінчастого вала сумарний момент інерції рухомих мас дизеля;

M_i - індикаторний крутний момент;

q_{π} - циклова подача палива;

$p_{\kappa 2}$ - тиск повітря наддуву після проміжного охолоджувача;

M_m - момент механічних втрат;

$M_{нг}$ - момент зовнішнього навантаження.

Залежність $M_i(q_{\pi}, p_{\kappa 2}, n_d)$ було описано поліномом:

$$M_i = a_{d1} + a_{d2} \cdot q_{\pi} + a_{d3} \cdot p_{\kappa 2} + a_{d4} \cdot n_d + a_{d5} \cdot q_{\pi}^2 + a_{d6} \cdot p_{\kappa 2}^2 + a_{d7} \cdot n_d^2 + a_{d8} \cdot q_{\pi} \cdot p_{\kappa 2} + a_{d9} \cdot q_{\pi} \cdot n_d + a_{d10} \cdot p_{\kappa 2} \cdot n_d, \quad (3.3)$$

де $a_{d1}, a_{d2}, \dots, a_{d10}$ – сталі коефіцієнти апроксимації.

Коефіцієнти апроксимації були визначені за методикою планування багатофакторних експериментів, які описані в працях [98-100].

Значення тиску повітря на вході в дизель описується блоком «GasPov», що моделює роботу інерційних ланок турбокомпресора, впускного трубопроводу, випускного колектора та безінерційної ланки охолоджувача повітря.

Інерційні структурні ланки блоку «GasPov» описано трьома диференціальними рівняннями:

- турбокомпресор

$$\frac{dn_{\text{тк}}}{dt} = (M_{\text{т}} - M_{\text{к}} - M_{\text{мтк}}) \frac{30}{\pi j_{\text{тк}}}, \quad (3.4)$$

де: $n_{\text{тк}}$ - частота обертання ротора турбокомпресора;

$M_{\text{мтк}}$ - момент механічних втрат в турбокомпресорі;

$M_{\text{к}}$ - момент опору колеса компресора;

$M_{\text{т}}$ - крутний момент турбіни;

$j_{\text{тк}}$ - приведений момент інерції турбокомпресора;

- впускний трубопровід (входить в склад блока GasPov)

$$\frac{dp_{\text{к1}}}{dt} = (G_{\text{к}} - G_{\text{д}}) \frac{n_{\text{вп}} \cdot p_{\text{к1}}}{V_{\text{вп}} \cdot \rho_{\text{к1}}}, \quad (3.5)$$

де: $p_{\text{к1}}$ - тиск повітря після компресора;

$G_{\text{к}}$ - маса повітря, що подається компресором у впускний трубопровід;

$G_{\text{д}}$ - маса повітря, що надходить до циліндрів двигуна;

$V_{\text{вп}}$ - об'єм впускного колектора;

$n_{\text{вп}}$ - показник політропи стискання повітря;

$\rho_{\text{к1}}$ - густина повітря після компресора;

- випускний колектор (входить в склад блока GasPov)

$$\frac{dp_{\text{тг}}}{dt} = (G_{\text{г}} - G_{\text{т}}) \frac{n_{\text{вип}} \cdot p_{\text{тг}}}{V_{\text{вип}} \cdot \rho_{\text{тг}}}, \quad (3.6)$$

де: $n_{\text{вип}}$ - показник політропи розширення ВГ;

$V_{\text{вип}}$ - об'єм випускного колектора;

$G_{\text{г}}$ - маса відпрацьованих газів на виході з циліндра дизеля;

$G_{\text{т}}$ - маса відпрацьованих газів на вході в турбіну;

$\rho_{\text{тг}}$ - густина ВГ.

- охолоджувач повітря (безінерційна ланка, входить в склад блока GasPov)

$$T_{\text{к2}} = T_{\text{к1}} - \Delta T_{\text{ох}}, \quad (3.7)$$

де: $T_{\text{к1}}, T_{\text{к2}}$ - температури повітря на вході в радіатор і на виході з нього;

$\Delta T_{\text{ох}}$ - зниження температури повітря наддуву в радіаторі.

В математичній моделі охолодник повітря представили безінерційною структурною ланкою. В моделі прийняли, що

$$p_{\text{к2}} = p_{\text{к1}} - a_{\text{ох}} \cdot G_{\text{д}}^2, \quad (3.8)$$

де: p_{k1}, p_{k2} - тиски наддуву до і після охолоджувача повітря.

$$\Delta T_{ox} = A_T (T_{k1} - T_{пов}), \quad (3.9)$$

де: $A_T = 0,6$ – постійний коефіцієнт;

$T_{пов}$ – температура повітря на вході в компресор.

Виходячи з даних, наведених в праці [89], прийняли, що за номінального режиму перепад тисків дорівнює 10 кПа [90]. За цієї умови підібрали коефіцієнт апроксимації a_{ox} для рівняння тиску.

Рівняння (3.1) – (3.9) складають математичну модель роботи дизельного двигуна з турбонаддувом. Вихідні данні та коефіцієнти апроксимації наведено в додатку В.

При розробці математичної моделі ПНВТ, трубопроводів високого тиску та форсунок виходили з припущення, що процеси, що відбуваються в цій системі є безінерційними. Модель ПНВТ представлена у вигляді тривимірної матриці та буде описна далі.

3.2. Математична модель електронної всережимної САРЧ з ПІД-регулятором

В базову модель внесені зміни до алгоритму роботи регулятора (представлено блоком Reg на рис. 3.2) швидкості з заміною дворежимного регулювання на всережимне. З урахуванням принципової схеми дизеля розроблена принципова схема всережимного регулятора, наведена на рис. 3.3.

Педаль управління в базовій моделі відтворюється параметром Fir, Електронний блок управління та виконавчий механізм описуються в блоці Reg, ПНВТ в блоці Pnvt, а двигун з турбокомпресором в блоках GasPov та Dizel (згідно позначень на рис. 3.2).

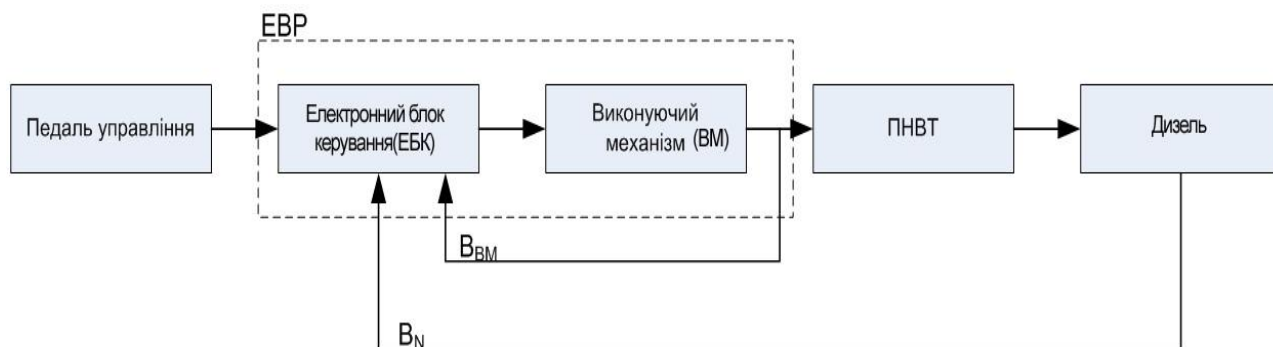


Рисунок 3.3 – Узагальнена схема експериментальної електронної САРЧ дизеля з всережимним алгоритмом регулювання:

V_N – сигнал частоти обертання колінчастого вала дизеля; V_{BM} – сигнал положення вала ВМ.

В розрахунковому блоці регулятор (Reg) розроблено модель електронного блоку керування (ЕБК) для виконання всережимного регулювання.

Окрім цього, описано інший виконавчий механізм і допрацьовані зворотні зв'язки між ЕБК та ВМ.

На основі узагальненої схеми, наведеної на рис 3.3 та вимог до САРЧ, що визначені в главі 2, розроблена детальна функціональна схема експериментальної САРЧ (рис. 3.4). Деталізація полягала в введенні алгоритмів, які враховують:

- корекцію кута нахилу регуляторної гілки;
- принципи фізичної моделі роботи ВМ;
- сили, що діють на рейку ПНВТ.

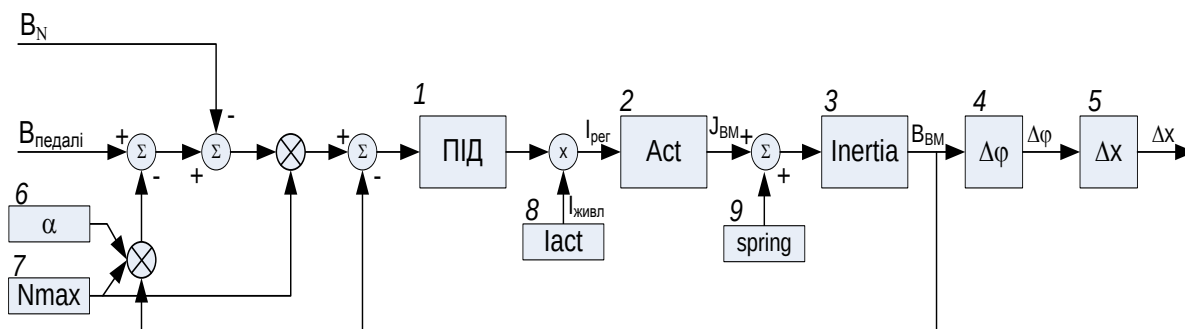


Рисунок 3.4 – Детальна функціональна схема експериментальної САРЧ дизеля з всережимним алгоритмом регулювання:

На рис. 3.4 позначено:

1 – ПІД-регулятор; 2 – електромагнітна частина ВМ (A_{ct}); 3 – вплив сил інерції рухомих частин виконавчого механізму та ПНВТ ($Inertia$); 4 – модуль перетворення зусилля на валу ВМ на зміну кута обертання вала ($\Delta\phi$); 5 – перетворення кута обертання вала ВМ на лінійний рух рейки ПНВТ (Δx). 6 – кут нахилу регульованої гілки (α); 7 – максимальна частота обертання дизеля (N_{max}); 8 – максимальний струм живлення двигуна ВМ (I_{act}); 9 – зусилля зворотної пружини ВМ ($spring$); $V_{\text{педаль}}$ – сигнал з електронної педалі керування; $I_{\text{рег}}$ – струм регулювання ВМ; $I_{\text{живл}}$ – струм живлення ЕБК; $J_{\text{ВМ}}$ – момент навантаження на валу ВМ.

На основі функціональної схеми (рис. 3.4) в програмному комплексі MatLab розроблена модель всережимного електронного регулятора швидкості разом з ПНВТ дизеля, яка показана на рис. 3.5. Всі математичні моделі реалізовані в програмному середовищі Matlab/Simulink.

Розроблена математична модель незалежно від архітектури включення ПІД-параметрів відтворює роботу електронного блоку керування, електронної педалі керування, виконуючого механізму, який переміщує рейку ПНВТ.

Модель дозволяє проводити дослідження впливу зовнішніх збурень (вібрацій двигуна або нерівномірності циклової подачі по циліндрам дизеля). Вхідними координатами математичної моделі є положення електронної педалі ($Fir1$) та частота обертання колінчастого вала дизеля ($NDv1$). Вихідною координатою є циклова подача палива дизеля (Gc).

На рис. 3.5 позначено: A1-A5 – функціональні блоки, що описують роботу блоку Reg, показаного на рис. 3.2; A6 – функціональний блок, що описує роботу блоку PNVT, приведенного на рис. 3.2; f1-f15 – зв'язки між функціональними блоками моделі.

У функціональному блоці A1 реалізовано електронний блок керування з механізмом ПІД-регулювання частоти обертання колінчастого вала дизеля.

Блок A2 моделює роботу виконуючого механізму та кінематичного з'єднання з рейкою ПНВТ. Блок A3 дозволяє змінювати кут нахилу регуляторних

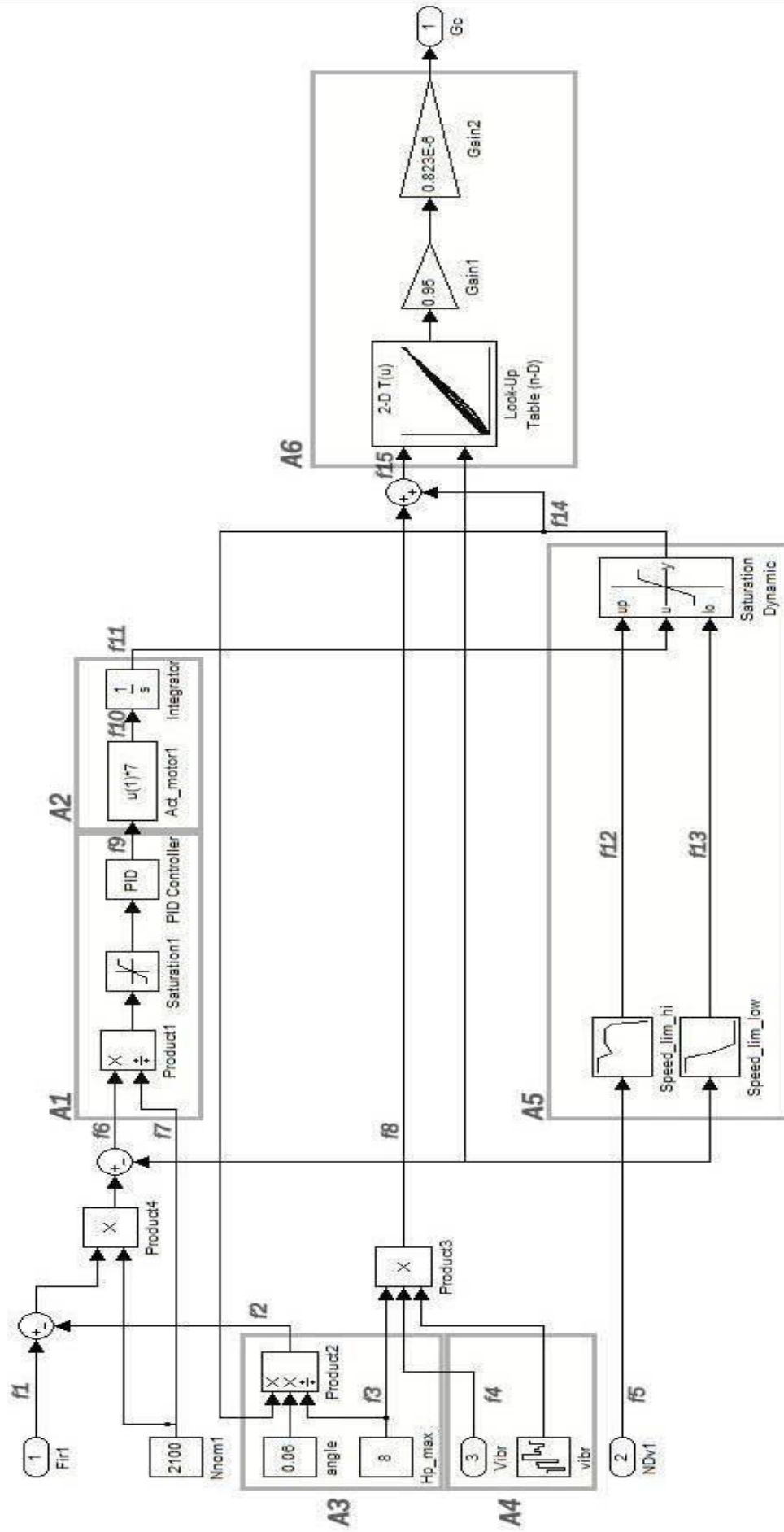


Рисунок 3.5 – Математична модель електронної САРЧ з ПНВТ дизеля

гілок. Функціональний блок А4 введено для імітування передачі вібрацій від дизеля до електронної САРЧ і дизеля. Блок А5 обмежує верхні та нижні граничні значення циклової подачі палива, що відповідає граничним положенням рейки ПНВТ при формуванні зовнішньої швидкісної характеристики конкретного дизеля та характеристики холостого ходу. Блок А6 відтворює роботу безінерційної ланки «PNVT», яка включає: безпосередньо ПНВТ, форсунки, трубопроводи високого тиску.

Характеристики ПНВТ для дизеля задавали графічно-матричним способом за результатами безмоторних випробувань..

Блок PID (PID controller) реалізує алгоритм ПІД-регулювання, що показано на рис. 3.6.

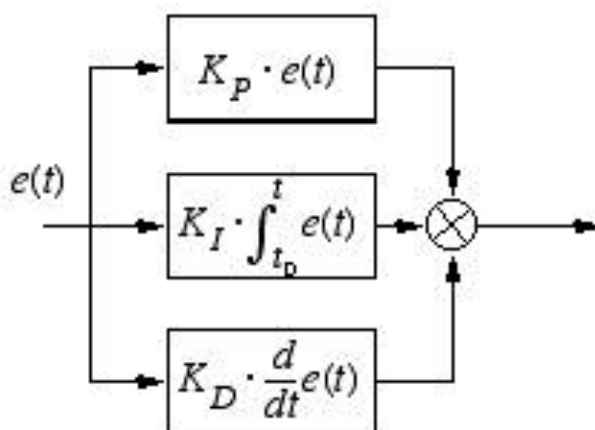


Рисунок 3.6 – Алгоритм ПІД-регулювання [91]:

$e(t)$ – вхідний сигнал блоку, K_p – пропорційний коефіцієнт регулювання, K_I – інтегральний коефіцієнт регулювання, K_D – диференціальний коефіцієнт регулювання.

Значення на вході блоку PID controller представили у виді функції від часу $e(t)$ та отримали наступні рівняння:

- пропорційної корекції

$$e_p(t) = K_p \cdot e(t), \quad (3.10)$$

де $e_p(t)$ – вплив пропорційної корекції в регуляторі;

- інтегральної корекції

$$e_I(t) = K_I \cdot \int_t^{t_0} e(t), \quad (3.11)$$

де $e_I(t)$ – вплив інтегральної корекції в регуляторі.

Вплив диференціальної корекції має вид:

$$e_D(t) = K_D \cdot \frac{de(t)}{dt}, \quad (3.12)$$

де $e_D(t)$ – вплив диференціальної корекції в ПІД-регуляторі.

Таким чином, модель з ПІД-блоком на виході приймає вид:

$$e_{PID}(t) = K_p \cdot e(t) + K_I \cdot \int_t^{t_0} e(t) + K_D \cdot \frac{de(t)}{dt}. \quad (3.13)$$

За малого значення пропорційного коефіцієнта K_p двигун 4ЧН12/14 виходить на усталений режим, але досить повільно. Збільшення пропорційний коефіцієнта приводить до більш швидкої реакції системи. Однак якщо далі збільшувати пропорційний коефіцієнт, то дизель більш швидко досягає заданого значення n_d . Далі можливе перерегулювання (Рис. 3.7).

У випадку перерегулювання система приходить до необхідному положенню швидше, ніж при менших коефіцієнтах, але після досягнення необхідного рівня сигнал продовжує змінюватись за інерцією і це призводить до збільшення амплітуди і кількості коливань в процесі регулювання.

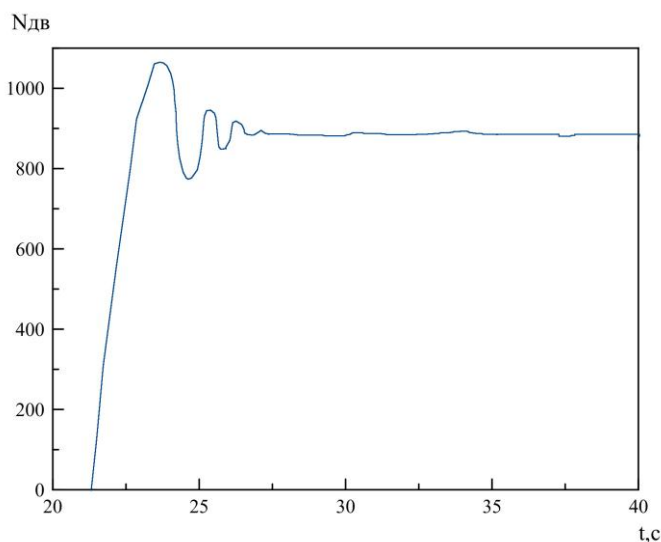


Рисунок 3.7 – Робота дизеля з завищеними значеннями K_p у випадку перерегулювання

Коли продовжити збільшувати коефіцієнт K_p , то досягнемо ситуації, коли система входить в режим автоколивань і стає нестійкою (рис.3.8).

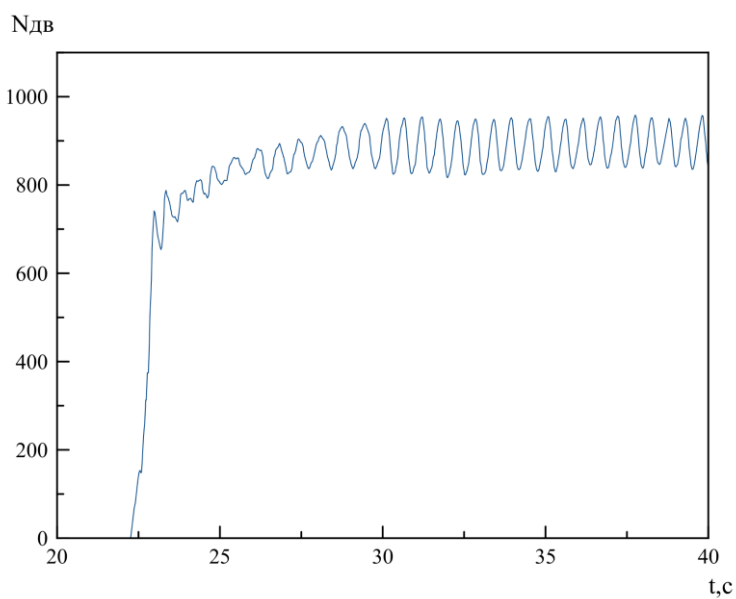


Рисунок 3.8 – Робота дизеля з завищеними значеннями K_p у випадку виникнення автоколивань

За малих значень інтегрального коефіцієнта K_I система взагалі не стабілізується. Амплітуда коливань постійно збільшуватиметься, поки не буде досягнуто фізичного обмеження коливальних процесів.

За надто високих значення K_I в системі буде накопичуватись похибка обчислень і вихідні значення, навіть в усталеному стані будуть відрізнятись від заданого (рис.3.9).

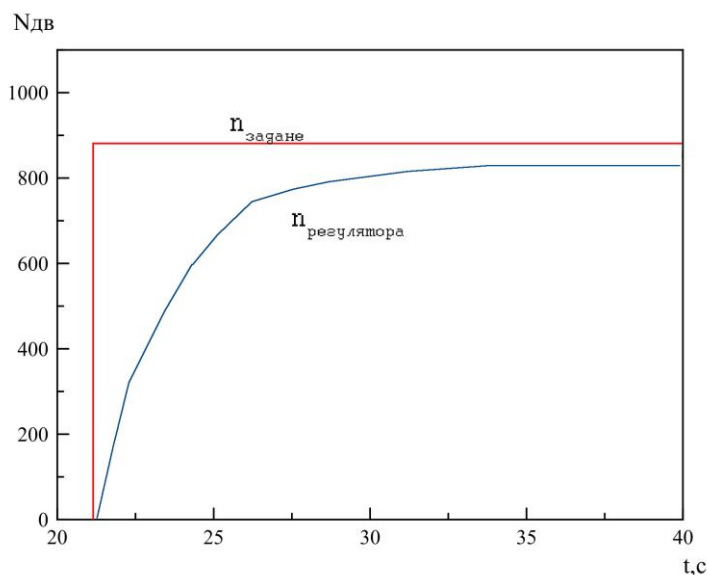


Рисунок 3.9 – Робота дизеля з заниженими значеннями K_I

Диференціальна компонента має суттєвий якісний вплив на перехідні процеси системи, проте для адекватної роботи САРЧ треба забезпечити своєчасне отримання інформації електронним блоком в режимі реального часу. У випадку нерегулярності частоти збору даних, шумів та високочастотні коливання в контурі датчика швидкості точне корегування диференціальної складової втрачає сенс.

Вихід керуючого впливу повинен бути пропорційний зміні вхідної координати поділений на час між ітераціями циклу регулювання. Якщо стан системи змінюється з постійною швидкістю, а час між запуском керуючої ітерації варіюється, буде невірна інформація про n_d . Це приводить до необхідності приймати до уваги шуми, що виникають через вібрації рейки ПНВТ. За високих значень K_d система буде реагувати на помилкові впливи і створювати зайві коливання регулюючих органів (ВМ). За низького значення K_d час виходу на усталений режим системи зростає.

3.3. Моделювання принципу роботи ЕБК

Частота обертання колінчастого вала дизеля вимірюється датчиком Хола, підключеного до електронного блоку керування A1. На рис. 3.5 вхід з датчика частоти позначено «NDv1». Керування режимом роботи дизеля здійснюється за допомогою електронної педалі керування «Fir1».

Електронний блок керування A1 опрацьовує сигнали від електронної педалі керування Fir1, датчика зворотного зв'язку виконавчого механізму fl1 та датчика частоти обертання NDv1 колінчастого вала двигуна. За заданою програмою в блоках A1– A3, з урахуванням обмежувальних вхідних даних блоку A5, розраховується положення виконавчого механізму, яке надходить до блоку A6. Зміна положення виконавчого механізму приводить до переміщення рейки ПНВТ, як наслідок – до зміни величини циклової подачі Gc палива та зміни частоти обертання колінчастого вала двигуна.

Змінена частота обертання колінчастого вала з модуля (математичної моделі в середовищі Matlab/Simulink) повертається в модель електронної САПЧ як сигнал датчика NDv1.

Вхідні координати положення педалі Fir1, коефіцієнту вібрації Vibr є безрозмірними величинами, що змінюється в діапазоні від 0 до 1. Вхідна координата частоти обертання колінчастого вала NDv1 задається в хв^{-1} . Вихідна координата циклової подачі Gc палива дизеля визначається в грамах за цикл.

Для налаштування моделі під різні двигуни та особливості експлуатації КТЗ введено ряд констант. Константа Nnom1 задає максимальне значення частоти обертання дизеля. Константа Angle задає кут нахилу регуляторної гілки. Константа Hp_max задає максимальне переміщення рейки ПНВТ. Блок Look-up table задає характеристику ПНВТ в графічно-матричній формі. Блоками Speed_limit_hi та Speed_limit_low задаються граничні обмеження ходу рейки ПНВТ за швидкісною характеристикою.

В суматорі до значення положення електронної педалі керування fl1

додається поправка на кут нахилу регуляторної гілки f_2 . Поправка f_2 розраховується з поточного та максимального значень положення рейки ПНВТ, має безрозмірне значення. Діапазон корекції для f_2 від 0 до 1. (Значення цих параметрів наведені в додатку В).

Завдяки константі N_{nom1} безрозмірне значення F_{ir1} перераховується в оберти за хвилину та порівнюється з поточним значенням частоти обертання. Різниця частот f_6 з урахуванням опорного значення f_7 частоти обертання перетворюється на безрозмірну величину, що обмежена значеннями від -1 до 1. Цей сигнал поступає в блок А1 ПД-регулятора. Вихідний сигнал f_9 було представлено у виді напруги живлення виконуючого механізму (від -4,5 до +4,5 В).

Блок виконуючого механізму Act_motor1 перетворює значення струму в крутний момент f_{10} на валу ВМ. Значення крутного моменту після інтегрального перетворення визначає переміщення f_{11} рейки ПНВТ. Це значення визначається в міліметрах ходу рейки (робочий діапазон без пускової циклової подачі було прийнято за 7мм) Положення рейки ПНВТ обмежується в залежності від поточної частоти обертання колінчастого вала.

В блоці А5 за допомогою обмежуючих кривих $Speed_limit_hi$ та $Speed_limit_low$ відбувається корекція значення f_5 частоти обертання та перетворення на граничні значення f_{12} та f_{13} відповідно. Визначене в блоці А2 значення f_{11} положення рейки ПНВТ корегується з урахуванням граничних значень f_{12} та f_{13} .

В ході проведення моторних випробувань виявлено значний вплив вібрації рейки ПНВТ на стабільність частоти обертання кінчастого вала при роботі на швидкісних режимах близьких до номінального. Тому в математичну модель введено імітацію вібрацій двигуна за допомогою коефіцієнта вібрацій $Vibr$. Безрозмірне значення f_4 цього коефіцієнта завдяки константі N_{p_max} через зв'язок f_3 перетворюється на коливання рейки ПНВТ. Задані зовнішні збурення через зв'язок f_8 додаються до визначеного положення f_{14} рейки ПНВТ.

Далі в блоці А6 за допомогою графічно-матричної програми Look-up table розраховується циклова подача G_c палива дизеля. Графічна матриця циклової подачі палива наведена на рис 3.10.

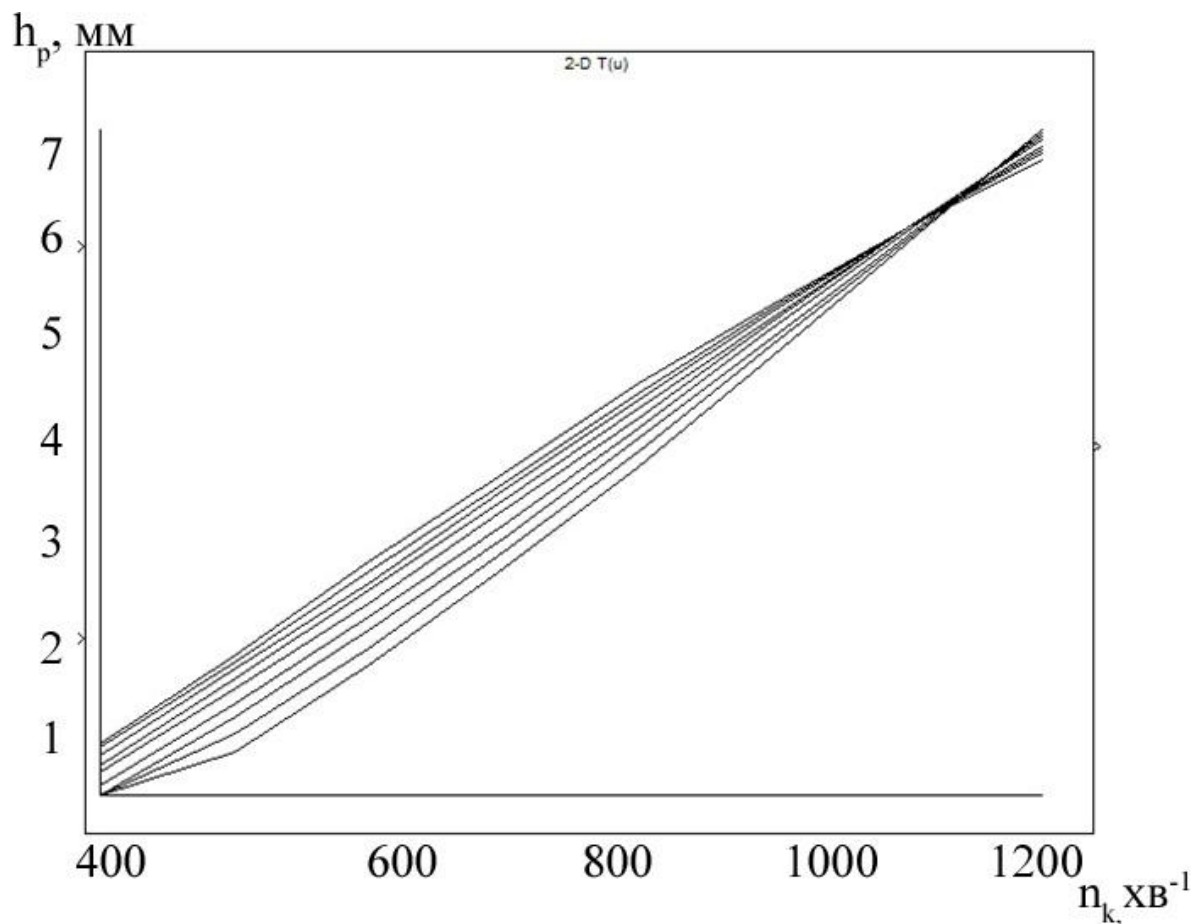


Рисунок 3.10 – Графічна матриця циклової подачі палива

На рис 3.11 наведено графічну інтерпретацію вибору системою положення рейки ПНВТ, тобто ілюстрацію алгоритму розрахунку циклової подачі палива при всережимному регулюванні.

Поточне положення рейки h_{p0} , розраховується блоками А1 та А2, що показані на рис. 3.4. Speed_limit_hi та Speed_limit_low – обмежуючі криві мінімального та максимального положення рейки. Saturation Dynamic – обмеження за максимальною частотою обертання з урахуванням кута нахилу регуляторної гілки. Якщо на валу дизеля збільшується навантаження, значення h_{p0} зростає. З урахуванням корекції кута нахилу регуляторної гілки (блок А3 на

рис. 3.4) робоча точка системи переходить в положення h_{p+} . У випадку зменшення навантаження на валу, значення положення рейки зменшується і система переходить в точку h_{p-} .

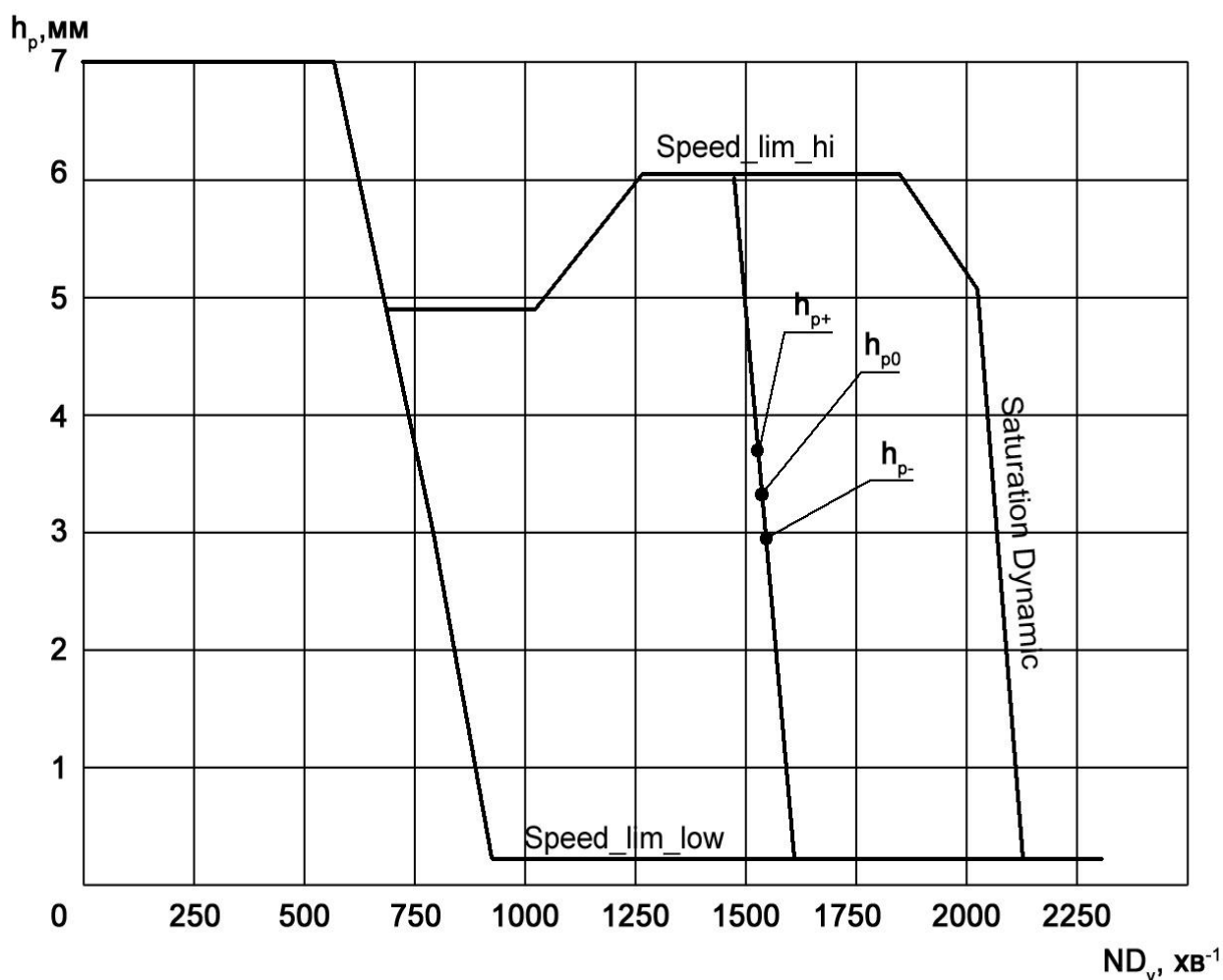


Рисунок 3.11 – Графічна інтерпретація алгоритму вибору системою положення рейки ПНВТ

Зміни положення рейки ПНВТ приводять до зміни циклової подачі палива в дизель, і як наслідок – до зміни частоти обертання вала.

3.4. Математична модель підпрограми електромеханічного виконавчого механізму

Електромеханічний виконавчий механізм описується блоком А2 (рис. 3.5). Завдяки зворотному зв'язку за положенням вала ВМ відсутня необхідність

деталізувати в електронний блок управління математичні моделі виконавчого механізму та системи тяг [92].

Розробка математичної моделі ВМ потрібна для використання в якості математичної моделі нижчого ієрархічного рівня в складі моделі САРЧ дизеля з турбонаддувом.

Сигнал індуктивного датчика є сигналом зворотного зв'язку за положенням вала ВМ. Електричний двигун керується за допомогою зміни струму живлення з діапазоном зміни від 0 до 2,5А.

Функціональна схема математичної моделі ВМ наведена на рис. 3.12.

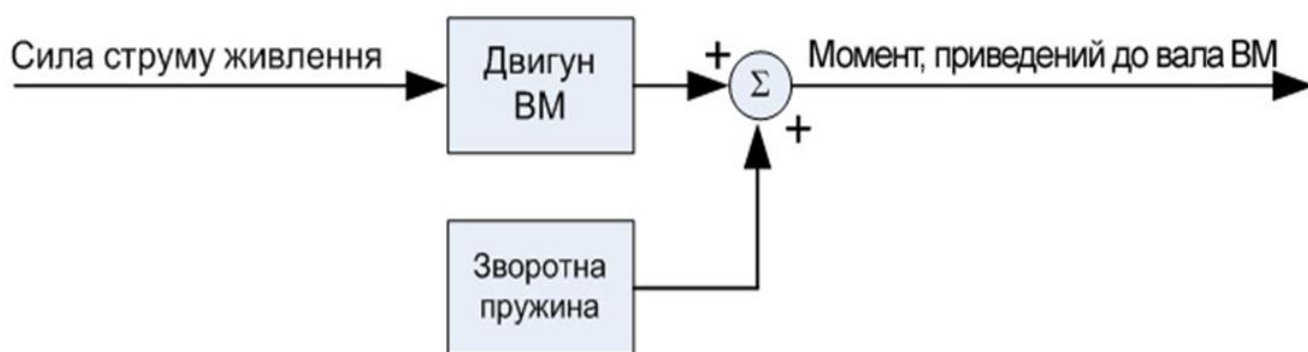


Рисунок 3.12 – Функціональна схема математичної моделі ВМ

Математична модель ВМ включає в себе моделювання перетворення сили струму живлення двигуна ВМ в зусилля на валу ВМ, та перетворення зусилля на валу ВМ в обертальний рух вала ВМ [93].

Залежність моменту, приведенного до вала ВМ від сили струму живлення ВМ визначали дослідним шляхом. Через те, що ВМ обладнано зворотнім зв'язком за положенням вала виникла необхідність створити стенд для проведення вимірювань. На стенді були проведені наступні дослідження: на вихідному валу ВМ було виготовлено і закріплено важіль. До важеля на відстані 75 мм від осі обертання було під'єднано калібровані тягарці. Важіль розташовувався горизонтально. Сила, що створювалася тягарцями діяла перпендикулярно до важеля.

Вимірювання проводили в положенні вала ВМ при значеннях 10 %; 50 % та 90 % від максимального кута повороту в 36° . ЕБК підтримував встановлене положення вала ВМ змінюючи струм, що подавався на обмотки електродвигуна ВМ.

В ході випробувань було визначено силу струму, що споживав виконавчий механізм. На кожному етапі випробування, за допомогою тягарців, змінювали величину навантаження на важелі. Поетапно змінювали положення важеля на валу ВМ для врахування випадків, коли навантаження від тягарців та зворотної пружини ВМ діють в одному (пряме навантаження), або в різних напрямках (зворотне навантаження).

За результатами безмоторних досліджень на експериментальному стенді побудовано графічну залежність сили струму управління ВМ від навантаження на валу, яка показана на рис. 3.13.

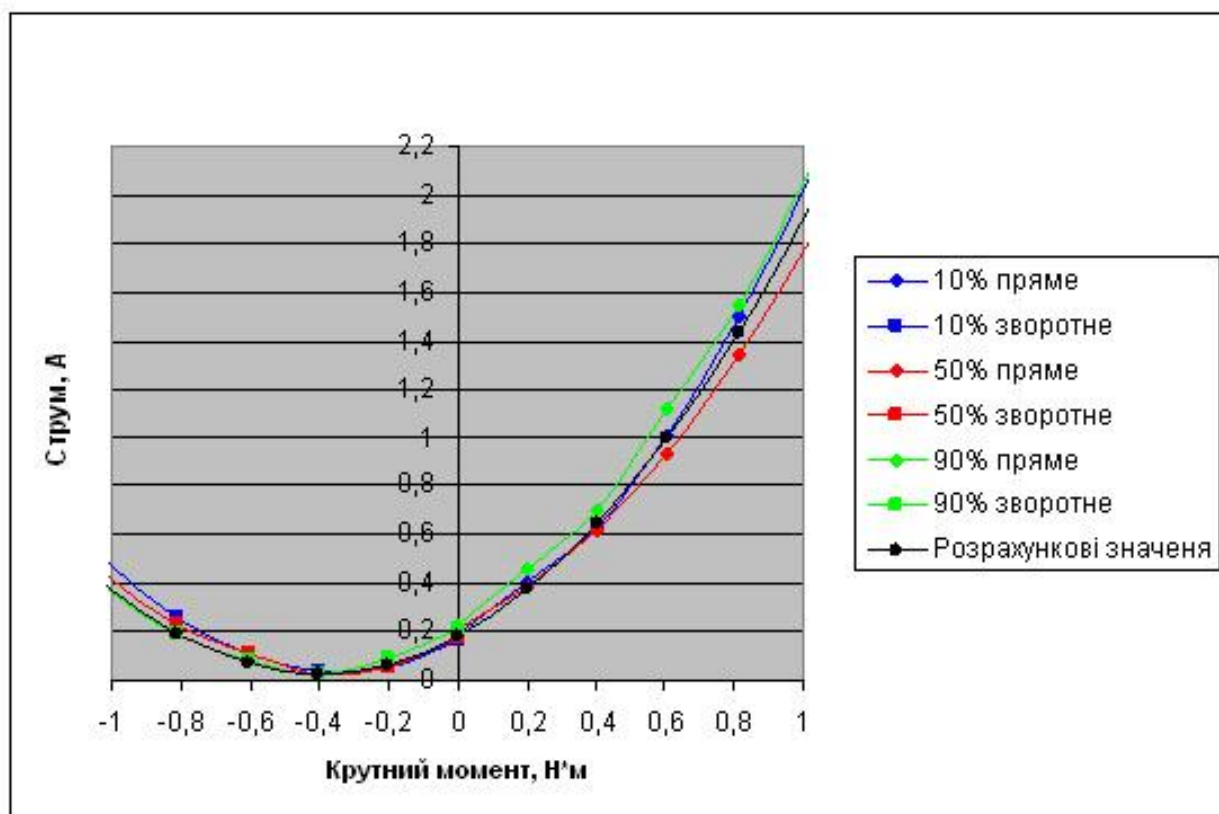


Рисунок 3.13 – Залежність сили струму ВМ від навантаження на валу

За отриманими графіками була визначена математична залежність крутного моменту на валу ВМ від сили струму управління. За основу для апроксимації було взято поліном другого порядку:

$$M_{BM} = a \cdot i_{BM}^2 + b \cdot i_{BM} + c, \quad (3.14)$$

де a, b, c – коефіцієнти апроксимації рівняння;

M_{BM} – навантаження на валу ВМ;

i_{BM} – сила струму ВМ.

З експериментальних даних відомо, що мінімальний струм споживання ВМ складає 0,03 А. З рис. 3.13 визначили, що зусилля (крутний момент) зворотної пружини ВМ складає $M_{\pi} = 0,4 \text{ Н}\cdot\text{м}$.

Для цих вихідних значень визначили:

$$M_{BM} = a \cdot (i_{BM} - 0,4)^2 + 0,03, \quad (3.15)$$

$$M_{BM} = a \cdot i_{BM}^2 - 0,8 \cdot a \cdot i_{BM} + a \cdot 0,16 + 0,03. \quad (3.16)$$

З рівняння (3.16) визначили значення коефіцієнтів b та c :

$$b = -0,8 \cdot a, \quad (3.17)$$

$$c = 0,16 \cdot a + 0,3. \quad (3.18)$$

Поетапно змінювали значення a . Підібрали таке, що найбільш точно відповідає експериментальним даним. Підставили отримані коефіцієнти апроксимації в рівняння (3.14) отримали рівняння зусилля на валу ВМ:

$$M_{BM} = 0,96 \cdot i_{BM}^2 + 0,768 \cdot i_{BM} + 0,184. \quad (3.18)$$

Система ВМ - ПНВТ є жорстко зв'язаною механічною системою. Для створення математичної моделі САРЧ в моделювання моменту інерції ВР включено моменти інерції рухомих частин ПНВТ та системи важелів.

Момент інерції системи визначається рівнянням:

$$J_{BM} = \sum_1^n m_i \cdot r_i^2, \quad (3.19)$$

де m_i – маси рухомих частин системи;

r_i – відстані від осі ВМ до центру мас рухомих частин.

Точність визначення моменту інерції системи впливає не на абсолютне значення вихідної координати ВМ, а на прискорення з яким буде обертатися вал ВМ. Час відгуку системи ВМ - ПНВТ на порядок менший за час реагування дизеля. Виходячи з цього математична модель сил інерції рухомих частин представлена не у вигляді сум окремих складових системи, а обрана одна еквівалентна маса рухомих частин. За величину між валом ВМ та еквівалентним центром мас обрано довжину важеля встановленого на валу ВМ.

З урахуванням цього рівняння (3.19) приймає вид:

$$J_{BM} = m_E r_B^2. \quad (3.20)$$

де m_E – еквівалентна маса рухомих частин системи

r_B – довжина важеля на осі ВМ.

Момент сили протидії інерційних частин системи становить:

$$M_i = J_{BM} \times \alpha. \quad (3.21)$$

де α – кутове прискорення вала ВМ.

Момент сили протидії інерційних частин системи є протидією різниці сил двигуна ВМ (M_{BM}) та сили зворотної пружини (M_{PP}):

$$M_i = M_{BM} - M_{PP}. \quad (3.22)$$

Приймаючи до уваги рівняння (3.18), (3.19) та (3.21) результуюче рівняння ВМ приймає вид

$$\Delta\varphi = \frac{0,96 \cdot i_{BM}^2 + 0,768 \cdot i_{BM} + 0,184 - M_{PP}}{m_E r_B^2}. \quad (3.23)$$

В математичній модель електронної САРЧ (рис.3.5.) Блок ВМ описується рівнянням

$$M_{BM} = 0,96 \cdot i_{BM}^2 + 0,768 \cdot i_{BM} + 0,184. \quad (3.24)$$

Отримане значення моменту навантаження на валу ВМ інтегрується для отримання куту обертання ($\Delta\varphi$) вала ВМ.

За матеріалами розділу опубліковані праці [80, 94, 95].

Висновки до розділу 3

1. Розроблено узагальнену та функціональну схему автотракторного дизеля обладнаного експериментальною електронною САРЧ дизеля з всережимним регулюванням, де деталізовано зворотні зв'язки за частотою обертання колінчастого вала та за положенням ВМ.
2. Розроблено алгоритм розрахунку циклової подачі палива при всережимному регулюванні для математичної моделі електронної САРЧ дизеля з всережимним регулюванням, який визначає витрату палива в

залежності від частоти обертання та навантаження на колінчастий вал дизеля. Новизна моделі полягає у введенні впливу вібрації на роботу дизеля.

3. Розроблено математичну модель ВМ, що включає в себе моделювання перетворення сили струму живлення двигуна ВМ на обертальний рух вала ВМ.
4. Розроблено детальну математичну модель всережимного електронного регулятора частоти обертання дизеля з реалізацією алгоритму ПД-регулювання, підтриманням кута нахилу регуляторної гілки незалежного від частоти обертання колінчастого вала дизеля та відтворенням впливу вібрацій дизеля на роботу системи. Пріоритет моделі підтверджено свідоцтвом про реєстрацію авторського права на твір №58166 (Моделювання всережимного електронного регулятора швидкості дизеля) (додаток Г).
5. Динамічну математичну модель електромеханічного виконуючого механізму об'єднано з моделлю приводу руху рейки ПНВТ, яка розраховує переміщення рейки ПНВТ в залежності від сили струму живлення ВМ. Блок ПНВТ задано графічною матрицею.

РОЗДІЛ 4

ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ НАЛАШТУВАННЯ ПІД-РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ АВТОТРАКТОРНОГО ДИЗЕЛЯ

4.1. Обґрунтування необхідності вибору раціональних параметрів. Програма досліджень

Встановлення електронних систем регулювання на двигуни з різними конструкційними особливостями та застосування дизелів в різних експлуатаційних умовах унеможливорює використання одних і тих самих ПІД-параметрів закону управління. На вибір ПІД-параметрів впливають механічні складові системи автоматичного регулювання частоти обертання колінчастого вала дизеля, механічні складові присутні у виконавчому механізмі, перехідному вузлі між ВМ та рейкою ПНВТ. Механічні складові мають певну величину інерційності, сухого та в'язкого тертя, реагують на зовнішні збурення з певною чутливістю. Також різняться і гідравлічний опір елементів паливної системи дизеля. Суттєвий вплив в динаміку САРЧ вносять рухомі частини двигуна, тобто інерційність дизеля як об'єкта регулювання. Впливає нерівномірність крутного моменту.

ПІД-регулятори добре зарекомендували себе в якості систем регулювання частоти обертання колінчастого вала дизельних електростанцій. Особливість роботи електростанцій полягає в необхідності підтримувати постійне значення частоти обертання в умовах зміни навантаження на двигун. На відміну від колісних транспортних засобів, швидкісний режим постійний і суттєво не змінюється на протязі роботи.

Для налаштування ПІД-параметрів в дизель-електростанції в цьому випадку використовували [33] наступний варіант налаштування: дизель працює за номінального швидкісного режиму (1500 хв^{-1} для електростанцій з чотиріполюсними генераторами), проводили серії випробувань за різних значень навантажень (5-7 точок, згідно з [96]). В кожному режимі визначали значення

ПІД-параметрів, що забезпечує 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 швидкісних режимів (від 800 до 3000 хв⁻¹) та забезпечити якісні перехідні процеси для цього швидкісного діапазону, враховувати зміну швидкісного режиму. Ця задача вимагає додаткових досліджень.

До цього часу налаштування ПІД-параметрів виконувалось «в ручному» режимі [97].

Одна з задач науково-практичного дослідження – розробка універсальних рекомендацій для налаштування ПІД-параметрів електронного регулятора частоти обертання колінчастого вала автотракторного дизеля.

Для досягнення цієї мети розроблена наступна програма досліджень:

1. Обґрунтування і визначення впливу ПІД-параметрів на зв'язок ВМ-ПНВТ в процесі безмоторних випробувань та на дизелі;
2. Перевірка адекватності математичної моделі САРЧ дизеля;
3. Проведення теоретичних досліджень на математичній моделі для визначення впливу ПІД-параметрів на роботу дизеля за різних швидкісних та навантажувальних режимів;
4. Визначення впливу ПІД-параметрів в усталеному швидкісному режимі і перехідних процесах автотракторного дизеля.

В якості об'єкта експериментальних досліджень обрано мікропроцесорна система регулювання автомобільного дизеля. Дизель обладнано газотурбінним наддувом. Паливна система обладнана рядним ПНВТ. Для дослідної бази роботи було обрано дизель 4ЧН12/14.

Для виконання першого етапу програми досліджень було створено експериментальну установку на базі безмоторного стенду NC-108 для перевірки паливної апаратури. На ПНВТ типу ЛСТН-410012 був встановлений МР. Зовнішній вид дослідної установки показано на рис. 2.7.

При створенні експериментальної установки з ПНВТ було демонтовано серійний механічний регулятор частоти. Рейку паливного насоса за допомогою важеля та тяги під'єднали до вісі виконуючого механізму.

Технічні характеристики елементів мікропроцесорного регулятора наведено в табл.4.1-4.3.

Таблиця 4.1 – Технічні характеристик елементів МР при безмоторних дослідженнях

Параметр	Значення
Напруга живлення, В пост.	12
Мінімальна напруга, В пост.	10,7
Мінімальна напруга пульсацій	Макс. 10 % при 100 Гц
Споживання струму, А	5,7
Допустиме падіння напруги при максимальному струмі споживання	до 10 %
Запобіжник регулятора	12 А
Навколишня температура при роботі, °С	+14...+24

Таблиця 4.2 – Технічні характеристики виконуючого механізму StG 2010-01 при безмоторних дослідженнях

Параметр	Значення
Кут повороту вихідного вала, град.	2...26
Макс. момент на вихідному валу, Нм	1,4 ±5 %
Утримуючий момент при обмеженні струму, Нм	0,7
Час зміни положення вала 0-100 % без навантаження, мсек	45
Навколишня температура при роботі, °С	+14...+24

Таблиця 4.3 – Характеристики датчика частоти ІА 03-102 при безмоторних дослідженнях

Параметр	Значення
Метод вимірювання	Індуктивний, активний
Діапазон вимірювання, Гц	50 ... 9 000
Діапазон вихідного сигналу, В	0...10 змінний
Опір, Ом	52
Форма сигналу	Синусоподібна
Навколишня температура при роботі, °С	+14...+24
Тип захисту	IP 55

4.2. Методика і результати досліджень МР на ПНВТ

У ході безмоторних досліджень визначили раціональні ПД-параметри закону управління ВМ. При з'єднанні з рейкою ПНВТ і, відповідно паливоподачею за різних вихідних умов це дало можливість отримати данні про перехідні процеси, що виникають при переміщенні рейки ПНВТ. Значення сили струму живлення ВМ дозволило визначити зусилля, що виникають при роботі ВМ з ПНВТ. Отриманні значення налаштування ПД-параметрів на цьому етапі досліджень полегшили подальше налаштування САРЧ при роботі дизеля.

В процесі безмоторних досліджень змінювали:

- масу важеля на вихідному валу ВМ без під'єднання до ПНВТ;
- масу деталей з'єднання вала ВМ з рейкою ПНВТ;
- опір при переміщенні рейки.

Серії безмоторних випробувань включали цифрові записи 3...4 перехідних процесів з різними значеннями ПД-параметрів. Вимірювання проводили при зупиненому електродвигуні стенда та з частотою обертання 800 хв^{-1} , при різних положеннях важеля цифрової педалі управління.

Використаний в дослідженні електронний регулятор становить замкнену систему автоматичного управління. В якості параметрів регулювання розглядали пропорційну, інтегральну та диференціальну складові. Значення складових змінювали і записували у відносних величинах від 0 до 100 %.

Виконавчий механізм обладнано датчиками зворотного зв'язку за положенням вихідного вала ВМ і за силою струму управління ВМ, що дозволило визначати перехідні процеси САРЧ з великою точністю. Приклад цифрового запису перехідних процесів показано на рис. 4.1.

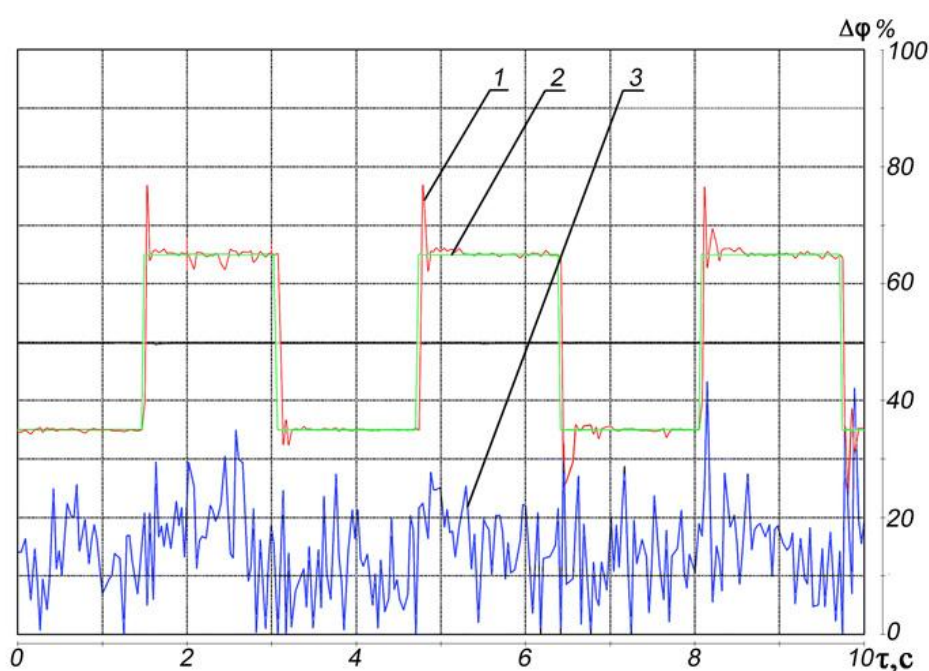


Рисунок 4.1. – Цифровий запис перехідних процесів при:

$$П = 3,0 \% ; I = 20,0 \% ; Д = 4,0 \%$$

1-положення вихідного вала ВМ; 2 – тестовий сигнал; 3 – струм управління ВМ.

Вибір раціональних ПД-параметрів здійснювали в такій послідовності: задавали швидкісний режим ПНВТ в діапазоні від 400 до 1100 хв⁻¹, з кроком 100 хв⁻¹. В систему регулювання МР подавали тестовий електричний сигнал, що змінював значення циклової подачі палива. Тестовий сигнал – прямокутний імпульс періодом в 1,5 с (рис. 4.2).

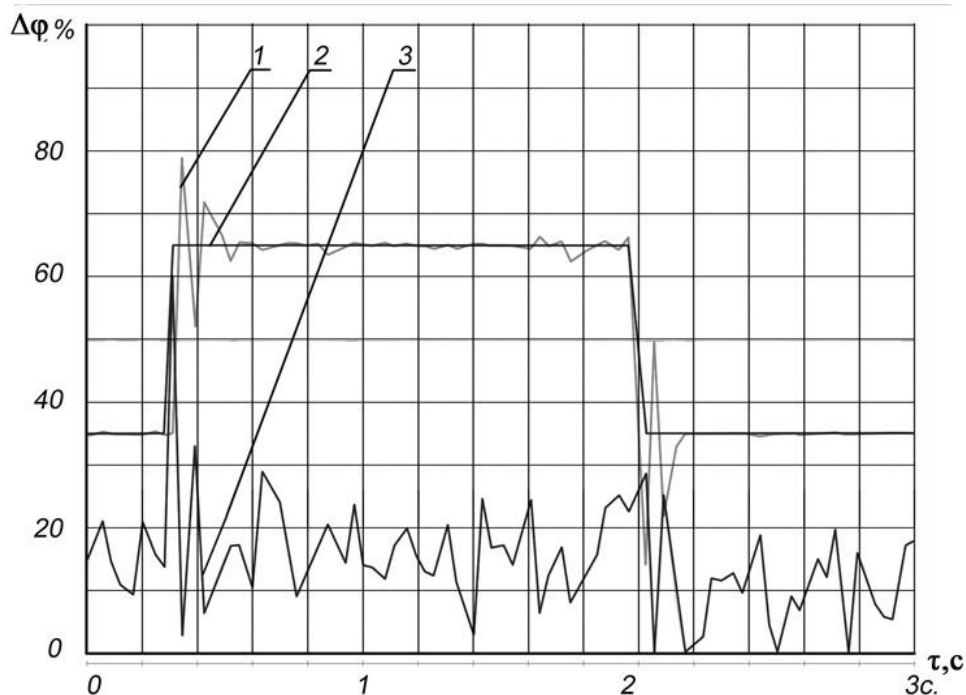


Рисунок 4.2 – Перехідний процес ВМ ПНВТ при подачі тестового електричного сигналу у вигляді прямокутного імпульсу:

1-положення вихідного вала ВМ; 2 – тестовий сигнал; 3 – струм управління ВМ.

Значення циклової подачі змінювалися в діапазоні 35...65 %. Такий діапазон коливань вибрано виходячі з амплітуд в коливаннях подачі палива, отриманих в результаті попередніх досліджень. В кожному з встановлених режимів почергово змінювали пропорційну (П), інтегральну (І) та диференціальну (Д) складові. Результати випробовувань автоматично записували в текстовий файл та опрацьовували на екрані персонального комп'ютера в режимі реального часу.

При визначенні раціональних ПІД-параметрів регулювання брали до уваги якісні показники перехідних процесів: час перехідного процесу, максимальне відхилення в перехідний період та навантаження на виконавчий механізм (коливання струму управління).

Після серії вимірювань з П – складовою обирали значення, що відповідало найкращим якісним показникам перехідних процесів. Вимірювання І – складової проводили з раціональним значенням П – складової, і визначали найкраще

значення інтегральної складової за показниками перехідних процесів. Аналогічним шляхом вибирали значення диференціальної складової.

Результатами випробувань з ВМ під'єднаному до рейки ПНВТ при швидкості обертання вала ПНВТ = 800 хв⁻¹ наведено в табл. 4.4.

Отримані дані свідчать – потужність ВМ відповідає зусиллю, що потребується на пересування рейки ПНВТ. Про це свідчать незначна різниця в значеннях П та Д складових.

Таблиця 4.4. – Результати вимірювань якості перехідних процесів при ВМ підключеному до ПНВТ та за частоти обертання вала ПНВТ = 800 хв⁻¹

Значення ПД параметрів, %	Максимальна амплітуда відхилення, %	Час перехідних процесів, с
П – змінна, І та Д - постійні		
П=2; І=10; Д=4	7,69	1,5
П=3; І=10; Д=4	11,53	3,0
П=4; І=10; Д=4	12,69	1,8
П=5; І=10; Д=4	13,84	0,7
П=6; І=10; Д=4	18,46	0,6
П=7; І=10; Д=4	23,07	0,5
І – змінна, П та Д - постійні		
П=5; І=5; Д=4	6,92	1,5
П=5; І=10; Д=4	13,84	0,7
П=5; І=20; Д=4	26,15	0,4
П=5; І=40; Д=4	33,84	0,3
П=5; І=80; Д=4	30,76	0,5
Д – змінна, І та П - постійні		
П=5; І=10; Д=0,5	20,05	6,0
П=5; І=10; Д=2	18,46	0,3
П=5; І=10; Д=4	13,84	0,7
П=5; І=10; Д=6	18,46	0,5
П=5; І=10; Д=8	3,84	1,2
П=5; І=10; Д=12	5,38	0,6

Результати вимірювань свідчать, що найбільш чутливою до якості перехідних процесів є П-складова. Зміни в цій складовій впливали на форму перехідного процесу на всьому діапазоні вимірювань. І та Д складові в свою чергу

суттєво впливали на якість перехідних процесів тільки коли виходили за критичні межі.

За раціональне значення П складової було обрано середнє значення діапазону в якому максимальна амплітуда вимірювання та час перехідних процесів відповідали раціональним значенням.

Аналіз отриманих результатів показав:

- раціональні значення ПД-параметрів при ВМ від'єднаному від ПНВТ:
П – складова = 3,0 %; I – складова = 10 %; Д – складова = 3 %;
 - раціональні значення ПД-параметрів при ВМ підключеному до ПНВТ:
П – складова = 4,0%; I – складова = 15 %; Д – складова = 4 %;
 - раціональні значення ПД-параметрів при ВМ підключеному до ПНВТ та при швидкості обертання валу ПНВТ = 800 хв⁻¹:
П – складова = 5,0 %; I – складова = 10 %; Д – складова = 4 %.
- Для подальших досліджень за робочі значення приймаємо П – складова = 5,0 %; I – складова = 20 %; Д – складова = 4 %.

4.3. Методика визначення і значення вихідних параметрів для математичної моделі електронної САРЧ

Для уточнених вихідних параметрів для математичної моделі (визначення впливу ПД-параметрів в усталеному швидкісному режимі) проведено серію випробувань на дизель-електричному агрегаті за наведеною раніше методикою в п.4.1).

Моторні дослідження проводили на дизелі ЯМЗ-238М2. Двигун входив до складу дизель-електричного агрегату. На рис. 4.3 показано дизельну електростанцію АГП-100С-Т400-1Р з дизелем ЯМЗ-238М2. На двигуні була встановлена дослідна система МР.

В ході досліджень вимірювали значення параметрів регулювання в усталених режимах роботи дизеля за різних швидкісних та навантажувальних режимів.

При проведенні моторних випробувань на дизель-генераторі було застосовано ту ж саму методику почергового вибору П, І та Д, що і при безмоторних дослідженнях (п. 4.2.).

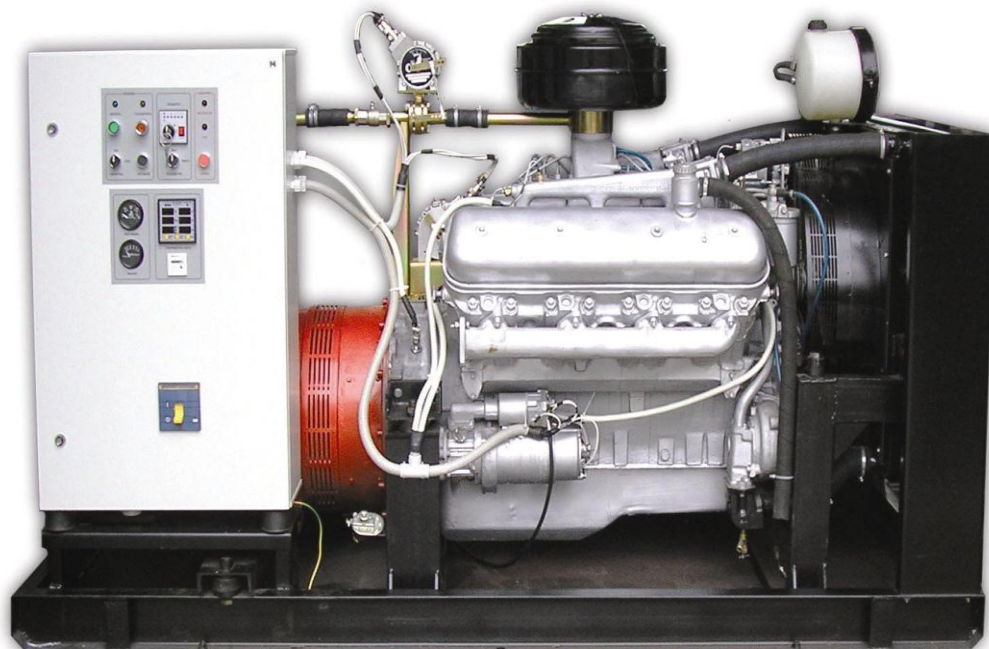


Рисунок 4.3. – Експериментальна установка на базі дизельної електростанції АГП-100С-Т400-1Р

Технічні характеристики дизеля ЯМЗ-238М2, встановленого на електростанції наведено в табл. 4.5.

Таблиця 4.5. - Технічні характеристики дизеля ЯМЗ-238М2, встановленого на електростанції АГП-100С-Т400-1Р

Кількість і положення циліндрів	8, V-подібне
Діаметр циліндрів, мм	130
Хід поршня, мм	140
Робочий об'єм всіх циліндрів, л	14,86
Ступінь стискання	16,5
Номінальна потужність, кВт	100

Продовження табл.4.5

Частота обертання вала при номінальній потужності, хв^{-1}	1500
Максимальний крутний момент, Н.м. (кгс·м)	883 (90)
Частота обертання при максимальному крутному моменті, хв^{-1}	1250-1450

В процесі встановлення відрегульованого в ході безмоторних випробувань МР на двигун ЯМЗ-238М2 при роботі під навантаженням було виявлено недостатню потужність виконавчого механізму. ВМ переміщував рейку 8-секційного паливного насосу, але при збільшенні навантаження на двигун швидкість перехідних процесів суттєво зменшувалася, що робило роботу регулятора незадовільною у складі дизель-електричного агрегата. Це підтвердило необхідність індивідуального підбору ВМ і ПД-параметрів для кожного типу двигунів та врахування їх експлуатаційного призначення.

Виконавчий механізм марки StG 2010-01 було замінено на StG 2020 більшої потужності і продовжено моторні дослідження з вибору раціональних ПД-параметрів МР за різними зовнішніми навантаженнями та різними значеннями частоти обертання.

Дослідження проводили за наступною програмою.

Проводили вибір ПД-параметрів для:

- зупиненого дизеля;
- дизеля, що працює в режимі холостого ходу;
- дизеля, що працює за номінальної частоти обертання колінчастого вала;
- серії вимірювань (3-4) на частотах, що знаходилися між холостим ходом та номінальною частотою.

На кожному з режимів вимірювання проводили за умов різних навантажень. Навантаження змінювали від 0 до 100 % з кроком в 25 %. МР забезпечував всережимне регулювання частоти обертання колінчастого вала дизеля.

Нахил регуляторної гілки становив 0 % (астатична характеристика).

В результаті моторних досліджень на дизелі ЯМЗ-238М2 було встановлено залежність зміни ПД-параметрів від навантажувального режиму при $n=1500 \text{ хв}^{-1}$. При зміні П - складової прямо пропорційно змінювалися і дві інші складові, і навпаки. Це дозволило визначити ПД-параметри для роботи при номінальному навантаженні при $n=1500 \text{ хв}^{-1}$, та пропорційно змінювати їх складові за допомогою змінної, що назвали комплексним корегуючим коефіцієнтом K_{Σ} .

В результаті аналізу результатів дослідження розраховано 3-вимірний масив значень комплексного корегуючого коефіцієнта в залежності від частоти обертання колінчастого вала та навантаження на двигун [98]. Результати випробувань, за якими побудовано 3-вимірний масив наведено в табл. 4.6. Візуальне відображення масиву показано на рис. 4.4.

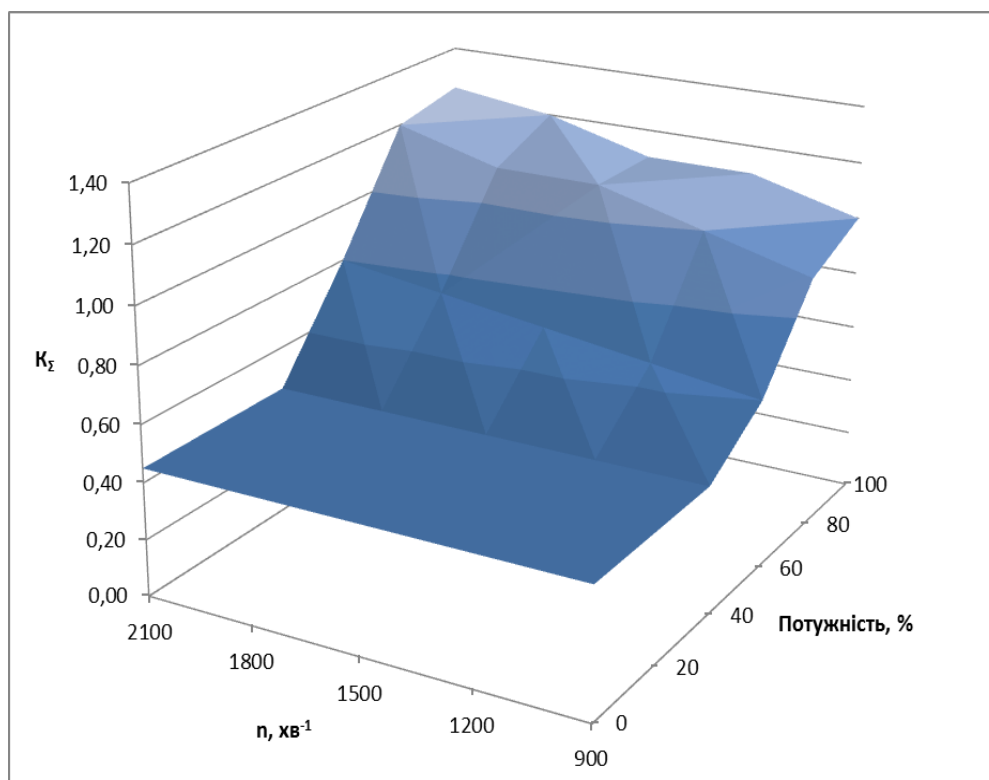


Рисунок 4.4. – Масив значень комплексного корегуючого коефіцієнта K_{Σ}

Таблиця 4.6. – Значення комплексного коригуючого коефіцієнта при різних швидкісних та навантажувальних режимах

		Частота обертання колінчастого вала, хв. ⁻¹				
		900	1200	1500	1800	2100
Потужність, %		0,45	0,45	0,45	0,45	0,45
	20	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45
	40	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45
	60	0,6	0,65	0,7	0,75	0,8
	80	0,9	1,0	1,1	1,1	1,2
	100	1,0	1,1	1,1	1,2	1,25

Для третього етапу програми досліджень (вибір вихідних даних для створення математичної моделі двигуна з ЕВР, що підтримує алгоритм ПД-регулювання) проведено серію випробувань на двигуні 4ЧН12/14 (СМД-23.07), в лабораторії Національного транспортного університету.

4.4. Уточнення вихідних даних для математичної моделі дизеля 4ЧН12/14

В ході досліджень перевіряли правильність попередньо обраних базових ПД-параметрів за таблицею 4.6., та оцінювалася стабільність роботи двигуна при змінах режиму роботи.

Для налаштування регулятора при зміні дизеля привода електростанції ЯМЗ-238М2 на автомобільний дизель СМД-23.07 провели серію випробувань, в яких визначали значення ПД-параметрів за основних експлуатаційних режимів.

На рис. 4.6 та 4.7 наведено запуск та зупинка двигуна з базовими значеннями ПД параметрів, що були отримані при випробуванні на дизель-генераторі. Початкові данні ПД-параметрів становили: $P = 5,0 \%$; $I = 10,0 \%$; $D = 4,0 \%$.

На рис. 4.9 – 4.11 наведено роботу двигуна за низьких частот обертання з різними значеннями ПД-параметрів. Цифровий запис роботи САРЧ наведено в додатку Д.

Як видно з наведених рисунків, зі зменшенням П-складової поліпшується стабільність роботи на низьких частотах ($600 \dots 1000 \text{ хв}^{-1}$). Це пояснюється тим, що зі збільшенням П-складової збільшуються зусилля, що приводить в рух важіль ВМ. Коливання в 20 % положення вала ВМ призводять до коливань в 4 мм хода рейки ПНВТ.

За низьких частот обертання при відсутності навантаження витрата палива достатньо мала і таке значення суттєво впливає на частоту обертання і вводить систему в стан автоколивань. При збільшенні частоти збільшуються і вібрації двигуна. Це потребує збільшення зусиль ВМ, і відповідно збільшення П-складової.

Окрім цього, збільшення П-складової позитивно впливає на зменшення часу перехідних процесів.

На рис. 4.6 – 4.11 позначено: φ_p – положення важеля ВМ, що задається ЕВР; φ_p^1 – положення важеля ВМ за результатами вимірювань. n – частота обертання колінчастого вала.

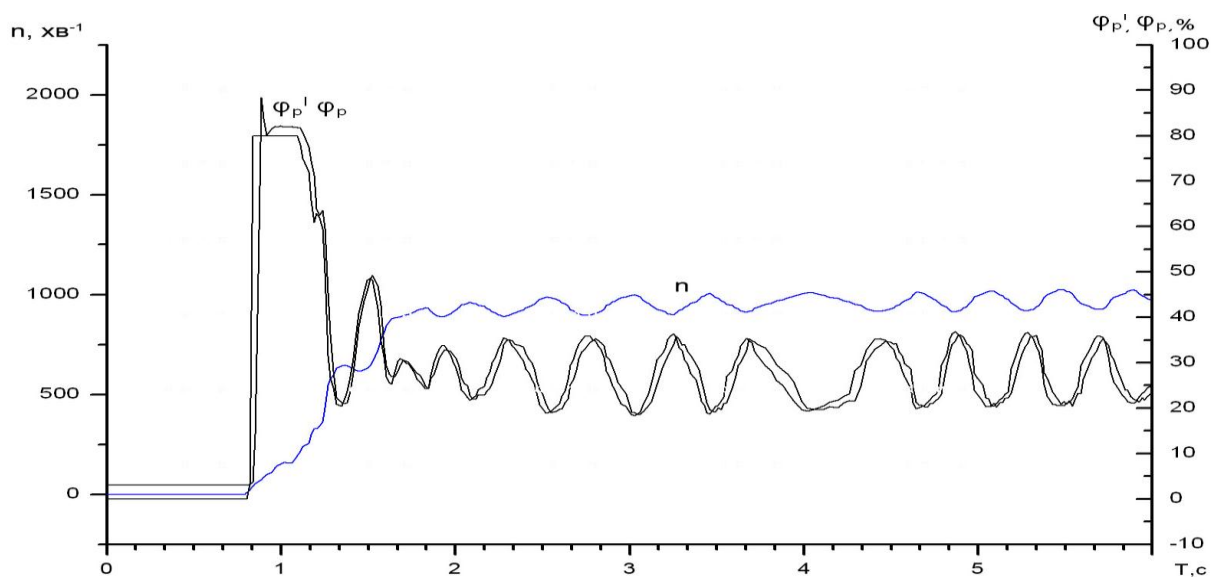


Рисунок 4.6 – Запуск дизеля при:

$\Pi = 5,0 \%$; $I = 10,0 \%$; $D = 12,0 \%$.

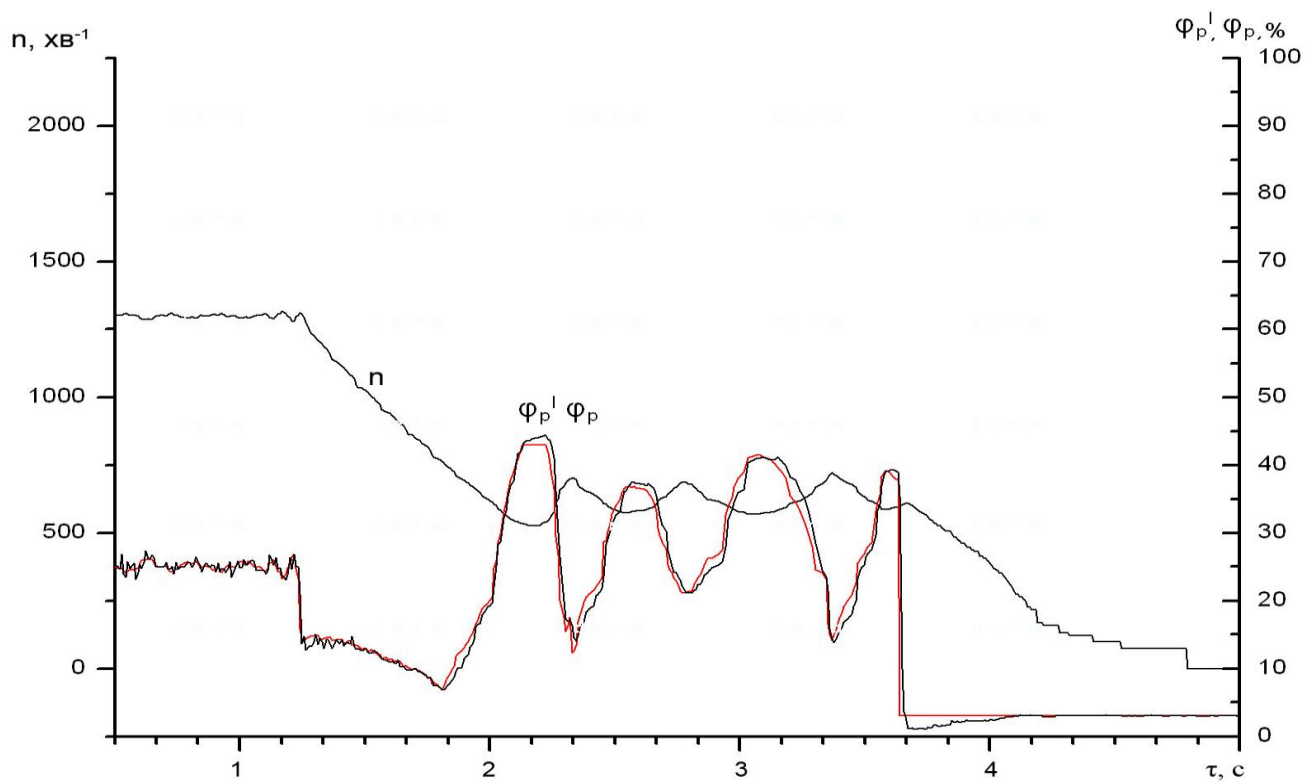


Рисунок 4.7. – Зупинка дизеля при:

$\Pi = 5,0 \%$; $I = 10,0 \%$; $D = 12,0 \%$.

На рис. 4.8 наведено роботу двигуна за частоти обертання 1500 хв^{-1} .

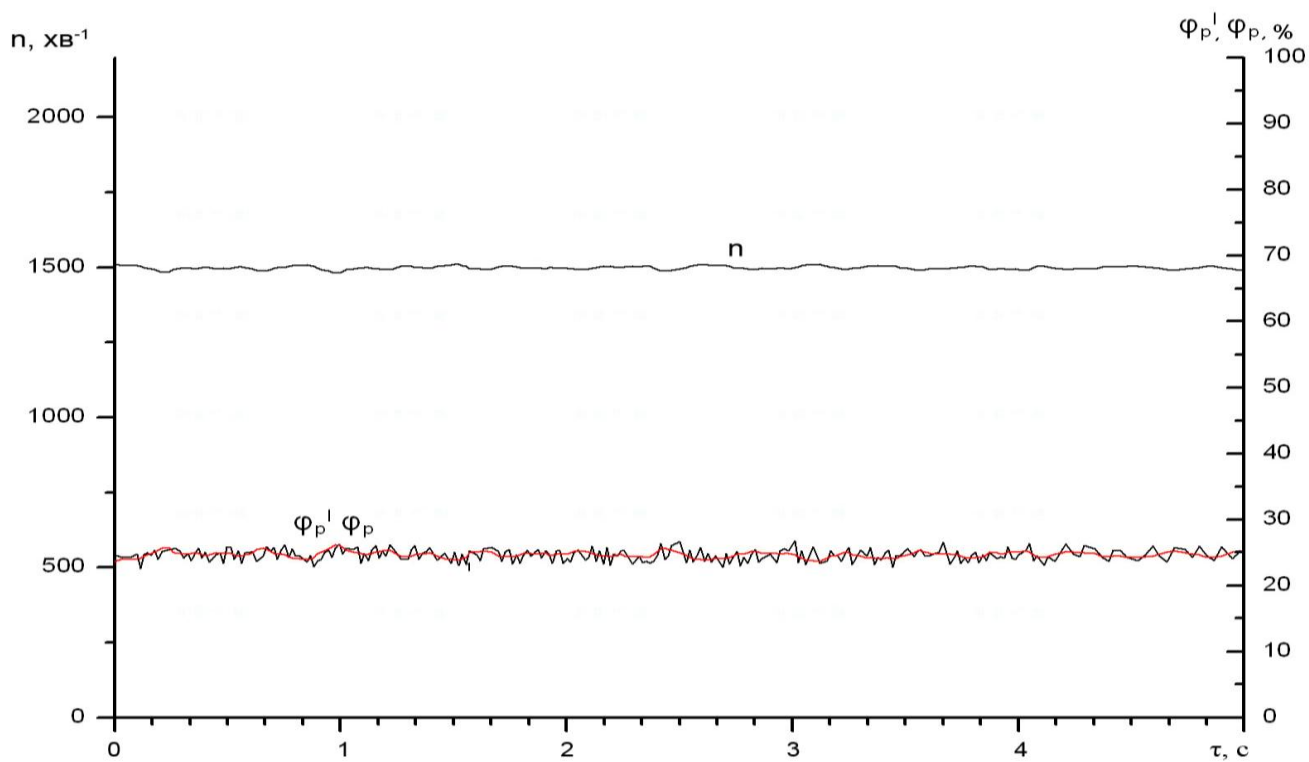


Рисунок 4.8 – Робота дизеля при:

$\Pi = 5,0 \%$; $I = 10,0 \%$; $D = 12,0 \%$.

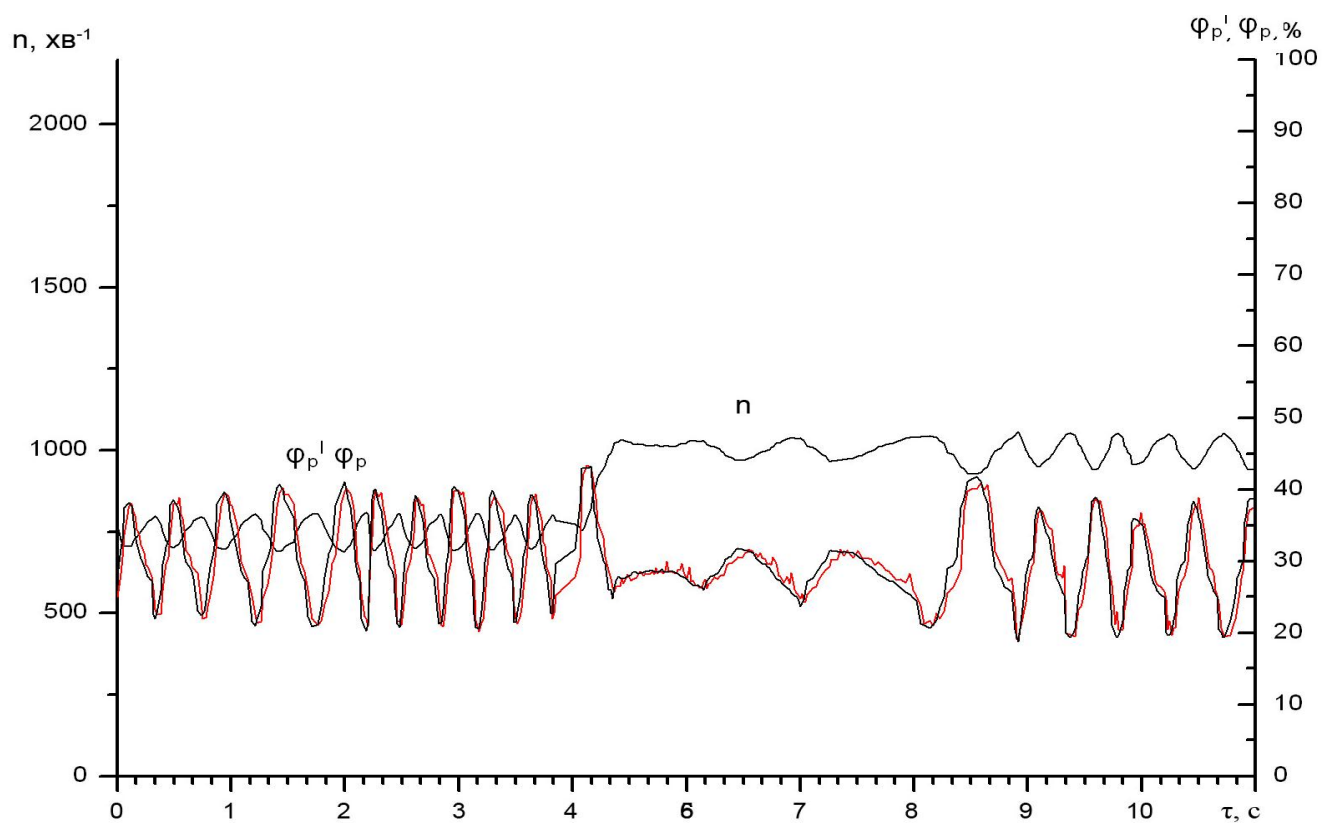


Рисунок 4.9 – Работа дизеля при:
 $\Pi = 13,0 \%$; $I = 10,0 \%$; $D = 12,0 \%$.

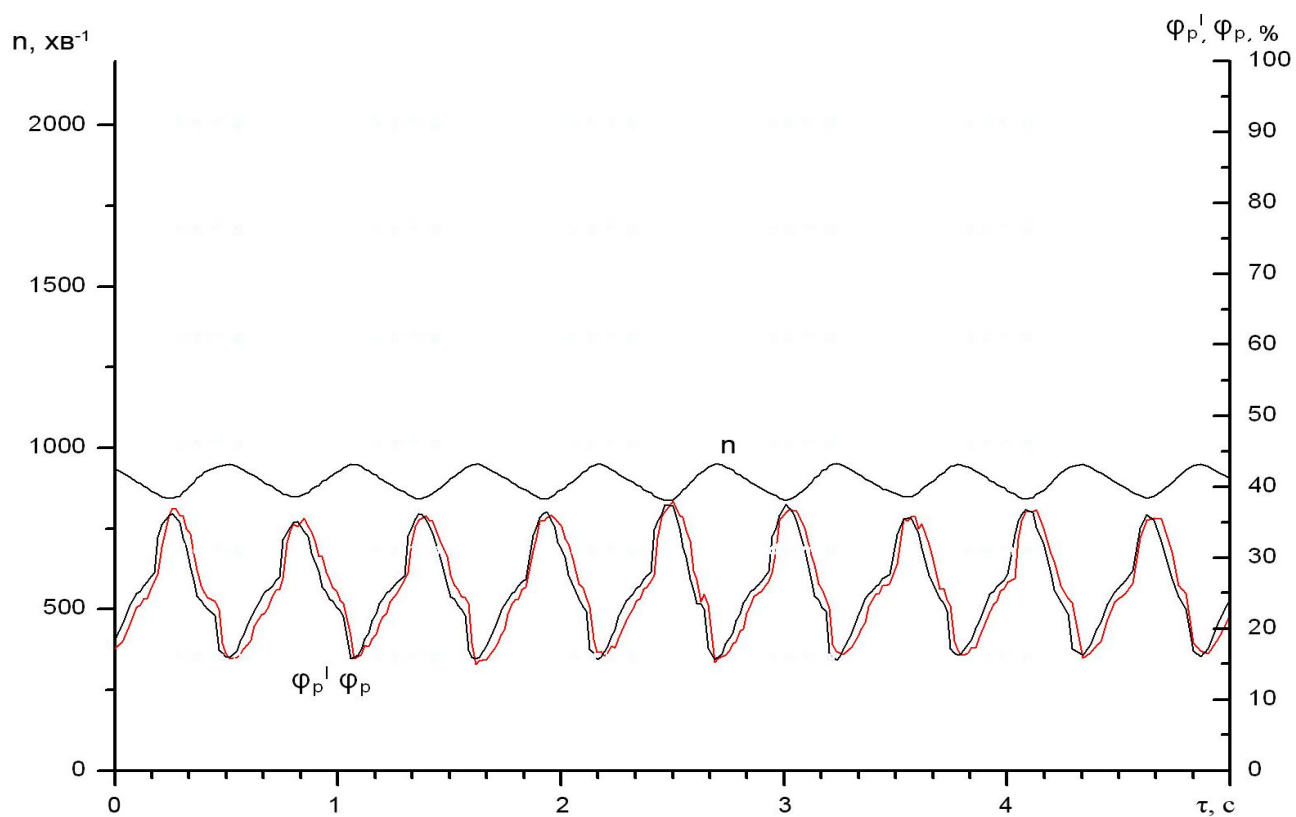


Рисунок 4.10 – Работа дизеля при:
 $\Pi = 5,0 \%$; $I = 10,0 \%$; $D = 12,0 \%$.

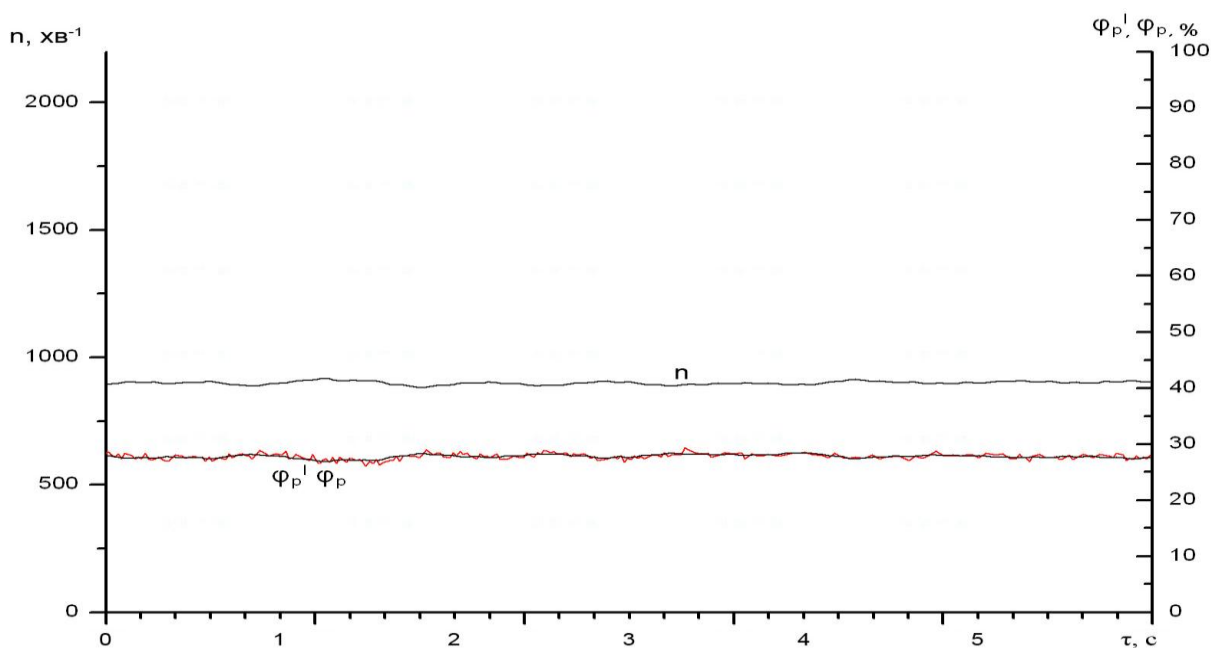


Рисунок 4.11 – Робота дизеля при:

$\Pi = 2,0 \%$; $I = 10,0 \%$; $D = 12,0 \%$.

З проведених досліджень встановили значення ПД-складових $\Pi = 5,0 \%$; $I = 10,0 \%$; $D = 12,0 \%$ для роботи на номінальній частоті обертання та $\Pi = 2,0 \%$; $I = 10,0 \%$; $D = 12,0 \%$ для пуску дизеля та роботи в режимі холостого ходу.

4.5. Перевірка адекватності математичної моделі

На рис. 4.12 побудована розрахункова зовнішня швидкісна характеристика дизеля 4ЧН12/14 з регуляторною гілкою, на яку нанесені (квадратиками) експериментальні точки.

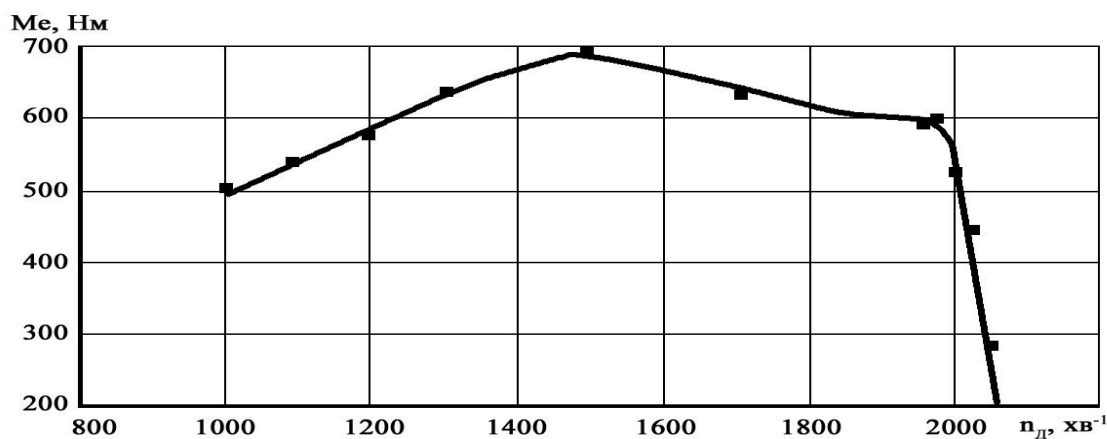
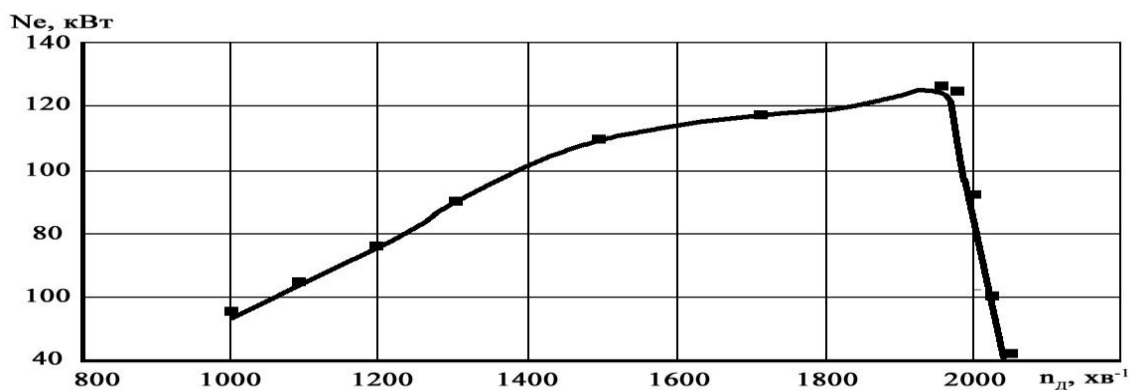
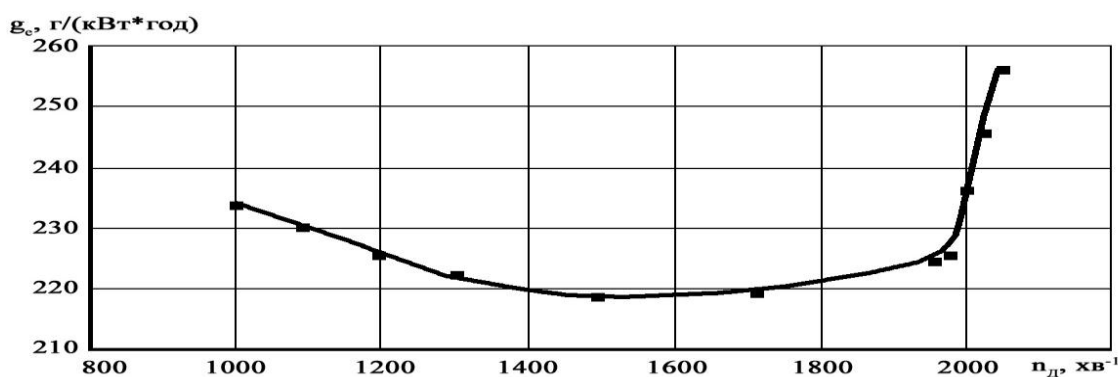


Рисунок 4.12 а)



б)



в)

Рисунок 4.12 – Розрахункова зовнішня швидкісна характеристика дизеля 4ЧН12/14 з нанесеними експериментальними точками

Таблиця 4.7 – Результати статистичної обробки [98 - 100] експериментальних зовнішніх швидкісних характеристик

	Параметри швидкісних характеристик		
	Me	Ne	ge
Середньоквадратичне відхилення Sg, %	20,15	4,21	9,2

Отримані показники середньоквадратичних відхилень Sg підтвердили адекватність розрахункових і експериментальних зовнішніх швидкісних характеристик дизеля 4ЧН12/14.

Ці дані доводять адекватність математичної моделі в статичці.

Для перевірки адекватності математичної моделі в динаміці проведено розрахунки параметрів роботи дизеля 4ЧН12/14 при розгоні з холостого ходу до

значення частоти обертання колінчастого вала в 1500 хв^{-1} . Під час моделювання задавали зміну положення цифрової педалі (FIR) зі значення 0,3 до значення 1. При моделюванні визначили значення навантаження на колінчастий вал дизеля (M_{nav}), положення рейки ПНВТ (h_p), частоту обертання колінчастого вала (n_d) та витрату палива під час розгону ($G_{\text{пал}}$). Розрахунок проводили з урахуванням зовнішніх коливань (вібрації) корпусу двигуна в 0,8 мм. Амплітуду 0,8 мм було вибрано, виходячі з середньої амплітуди коливань під час моторних досліджень. Отримані результати порівняли з даними отриманими при випробуванні двигуна СМД-23.07 (рис. 4.13).

Отримано добрий збіг експериментальних та розрахункових даних частоти обертання колінчастого вала.

За 12 секунд перехідного процесу двигун віртуально витратив 48 грамів палива.

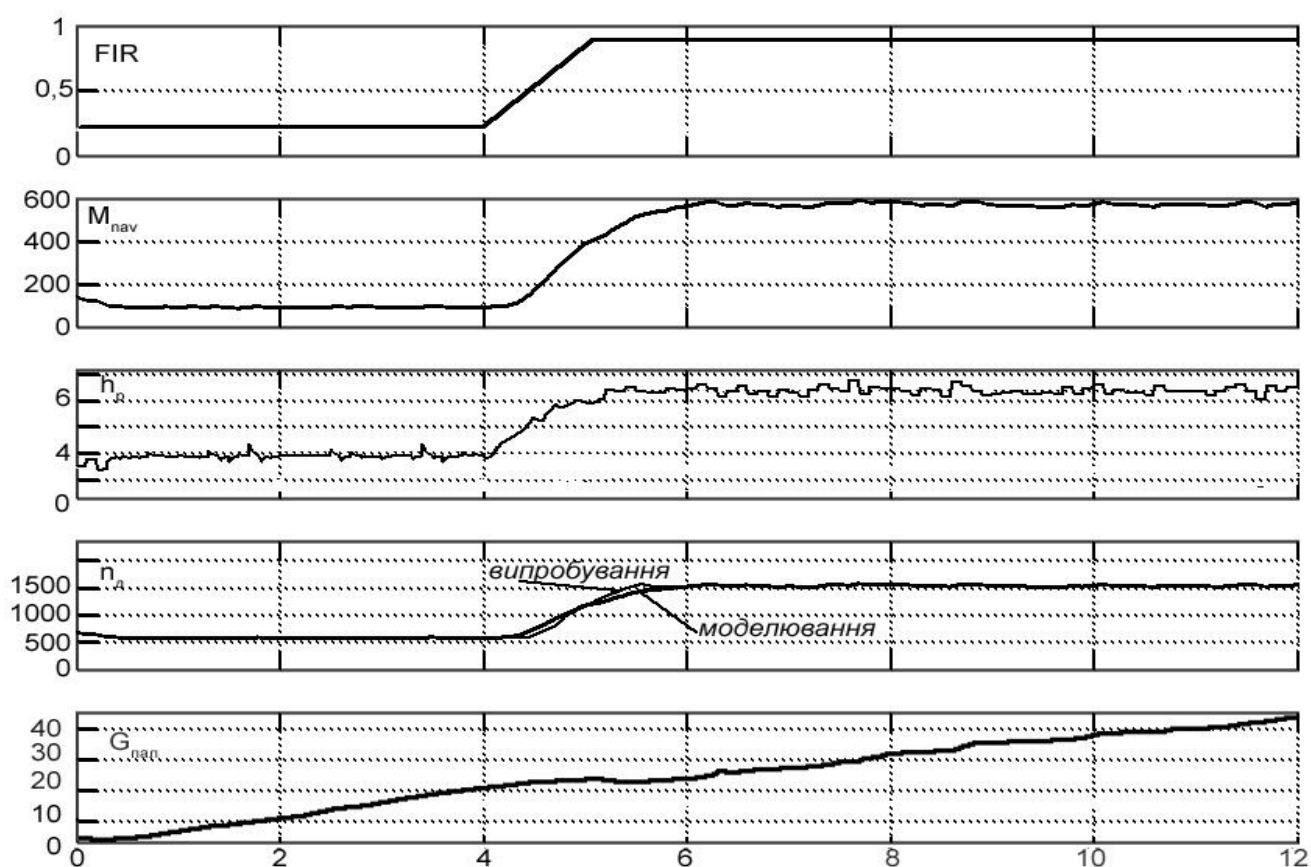


Рисунок 4.13. – Результати перевірки адекватності математичної моделі дизеля в динаміці:

FIR – задатчик частоти обертання колінчастого вала (відносно величини максимальної частоти обертання), M_e – ефективний крутний момент, h_p – переміщення рейки ПНВТ, n_d – частота обертання колінчастого вала, $G_{\text{пал}}$ – витрата палива під час випробування, p_k – тиск турбонаддуву, K_Σ – сумарний корегуючий коефіцієнт.

4.6. Дослідження ПД-параметрів ЕВР на вплив вібрацій двигуна

Під час проведення моторних досліджень (п. 4.4.) було виявлено зростання коливань вала ВМ, що вказувало на некероване коливання рейки ПНВТ.

Збільшення амплітуди коливань пов'язано з збільшенням вібрацій корпусу дизеля внаслідок підвищення швидкісного режиму. При збільшенні частоти обертання колінчастого вала з холостого ходу до значень близьких до номінальних амплітуда коливань рейки ПНВТ збільшилася в 6...8 раз.

Збільшення амплітуди коливань може бути ознакою недостатньої потужності електродвигуна ВМ, проте для оцінки допустимого значення коливань рейки ПНВТ та для визначення їх впливу на раціональні ПД-параметри розроблена наступна програма досліджень на математичній моделі:

1. Провести оцінювання абсолютного значення коливань вала ВМ під час моторних випробувань за різних режимів роботи дизеля;
2. Робота дизеля за номінальної частоти обертання з вібраціями, що спостерігали під час моторних випробувань. Визначити вплив значень ПД-параметрів регулятора на витрату палива.
3. Змодельовати роботу дизеля під час збільшення частоти обертання з холостого ходу до номінального. Визначити витрати палива за різних значень ПД-параметрів регулятора та різних значень вібрацій.
4. Проаналізувати результати досліджень.

Для виконання першого пункту програми досліджень значення коливань рейки ПНВТ визначили наступним чином:

Під час проведення стендових випробувань на дизель-електричному агрегаті (двигун ЯМЗ-238М2) та СМД-23.07 вимірювалося значення кута повороту вала ВМ, що дає змогу визначити переміщення рейки ПНВТ під час випробувань. На рис. 4.14 показано коливання рейки ПНВТ під час проведення стендових випробувань.

З рис. 4.14 визначено, що амплітуда коливань рейки ПНВТ за частоти обертання близької до номінальної досягала 1 мм. Це значення збільшувалося при збільшенні навантаження та частоти обертання і досягало 2 мм за номінальної частоти обертання та навантаження двигуна в 60 % від номіналу (це значення максимального навантаження дизельної електростанції). Виходячи з цього, для проведення досліджень на математичній моделі обрано значення коливань рейки в 0 мм, 1 мм, 2 мм та 3 мм.

Дослідження за значення амплітуди коливань в 3 мм додано для визначення загальних тенденцій впливу ПД-параметрів у випадках неоптимально відрегульованих дизелів та коли невірно обрано значення потужності ВМ.

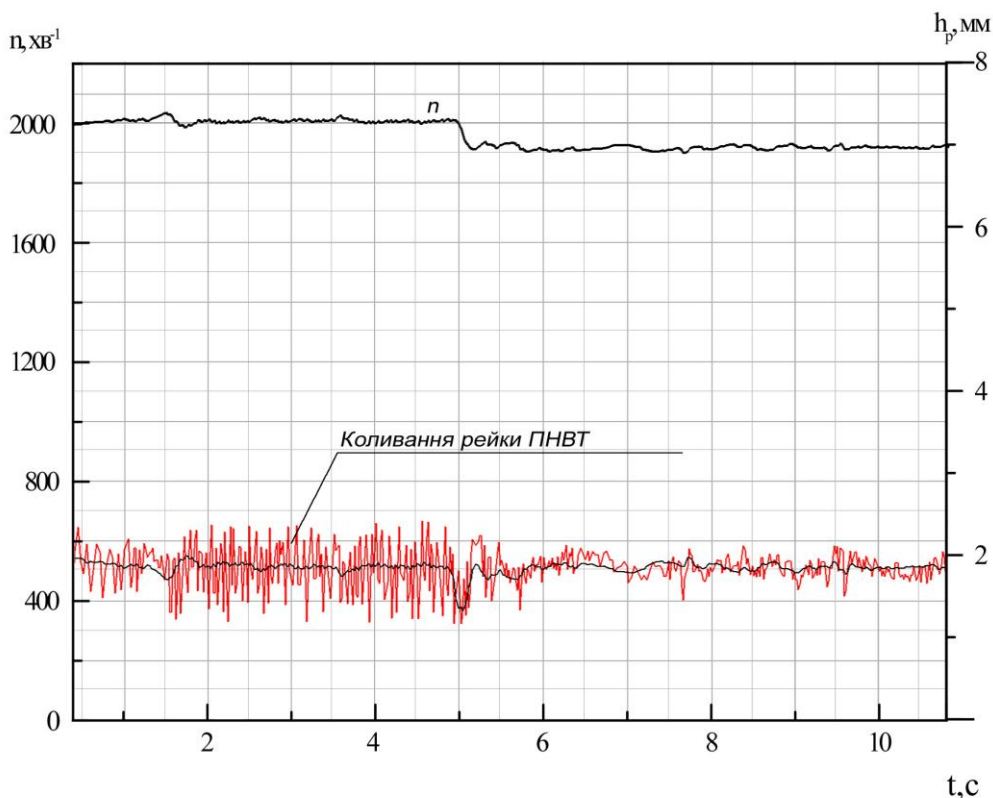


Рисунок 4.14 – Коливання рейки ПНВТ під час проведення стендових випробувань

Значення вібрацій двигуна задавали змінами константи в блоці f4, що був наведений на рис. 3.5.

Під час першого етапу почергово змінювалися значення П, І та Д складових в діапазоні, що забезпечував стабільну роботу дизеля. Для П-складової це були значення: 2, 5 та 13, для І-складової: 2, 10, 20, та для Д-складової відповідно: 2, 12, 5. Це дозволило визначити вплив індивідуальних складових на вплив вібрацій на роботу двигуна. Вимірювання проводилося при максимальному значенні вібрацій – 3 мм.

Для виконання другого етапу досліджень провели серію випробувань на математичній моделі. Випробування проводилися за значення частоти обертання 1850 хв^{-1} , час вимірювання витрат палива – 12 с. Вимірювання проводилися за значення ПД-параметрів, що було обрано як раціональні під час моторних випробувань. (П-складова дорівнювала – 5, І-складова – 10, Д-складова - 12). Це значення обрали за еталонне.

Під час другого етапу досліджень всі три значення ПД параметрів змінювались одночасно. Вимірювання проводилися за трьох значень: Перше: $P = 1\%$, $I = 2,5\%$ та $D = 3\%$. Друге: $P = 5\%$, $I = 10\%$ та $D = 12\%$. Третє: $P = 10\%$, $I = 20\%$ та $D = 25\%$. Це дозволило визначити вплив сумарного корегуючого коефіцієнта підсилення на роботу дизеля за наявності вібрацій.

В табл. 4.8. наведено значення, що були отримані під час цих випробувань.

Таблиця 4.8. – Результати досліджень впливу ПД-параметрів на роботу дизеля за наявності вібрацій при частоті обертання в 1850 хв^{-1}

Значення ПД-параметрів	Витрати палива під час випробувань, г	Відхилення у витратах палива від еталонного випробування, %
$P=5, I=10, D=12$ (еталонне)	44,1	0
$P=2, I=10, D=12$	44,1	0

Продовження табл.4.8

П=13, I=10, Д=12	44,13	0,07
П=5, I=2, Д=12	44,73	1,43
П=5, I=20, Д=12	45,04	1,44
П=5, I=10, Д=2	44,16	0,14
П=5, I=10, Д=12	44,13	0,07
П=1, I=2,5, Д=3	44,1	0
П=10, I=20, Д=25	44,07	-0,07

З результатів, наведених в табл. 4.8, видно, що вплив налаштування ПД-параметрів на різницю у витраті палива дизелем – незначний. Зміни сумарного корегуючого коефіцієнта підсилення суттєво не впливають на економію палива. Найбільший вплив на збільшення витрат палива може бути спричиненим неправильними налаштуваннями І-складової.

Наступним етапом дослідження було визначення впливу ПД-налаштування на витрату палива за різних значень вібрацій двигуна при різкому збільшенні частоти обертання з величини холостого ходу до значення 1850 хв^{-1} .

4.7. Вплив раціональних параметрів ПД-регулятора на витрату палива дизеля

На математичній моделі проведено дослідження розгону двигуна. Час вимірювання витрати палива склав 12 с. Вимірювання проводили при максимальному значенні вібрацій – 3 мм. Значення ПД-параметрів були такими самими, як і в попередніх випробуваннях (П = 5, I = 10, Д = 12).

Приклад графічного відображення результату моделювання наведено на рис. 4.15.

Результати обробки розрахункового перехідного процесу наведено в табл. 4.9.

Отримані значення відхилень витрат палива відрізняються від аналогічних значень отриманих за уставленої частоти обертання. Це пояснюється тим, що частину часу вимірювання дизель працював з одним положенням рейки ПНВТ, а частину з іншим. Якби залежність циклової подачі палива від положення рейки ПНВТ була лінійна, вібрації рейки в сторону збільшення та зменшення подачі компенсували б одна одну. Однак ця залежність нелінійна і призводить до зміни витрат палива, і, як наслідок – зміни впливу ПД-параметрів.

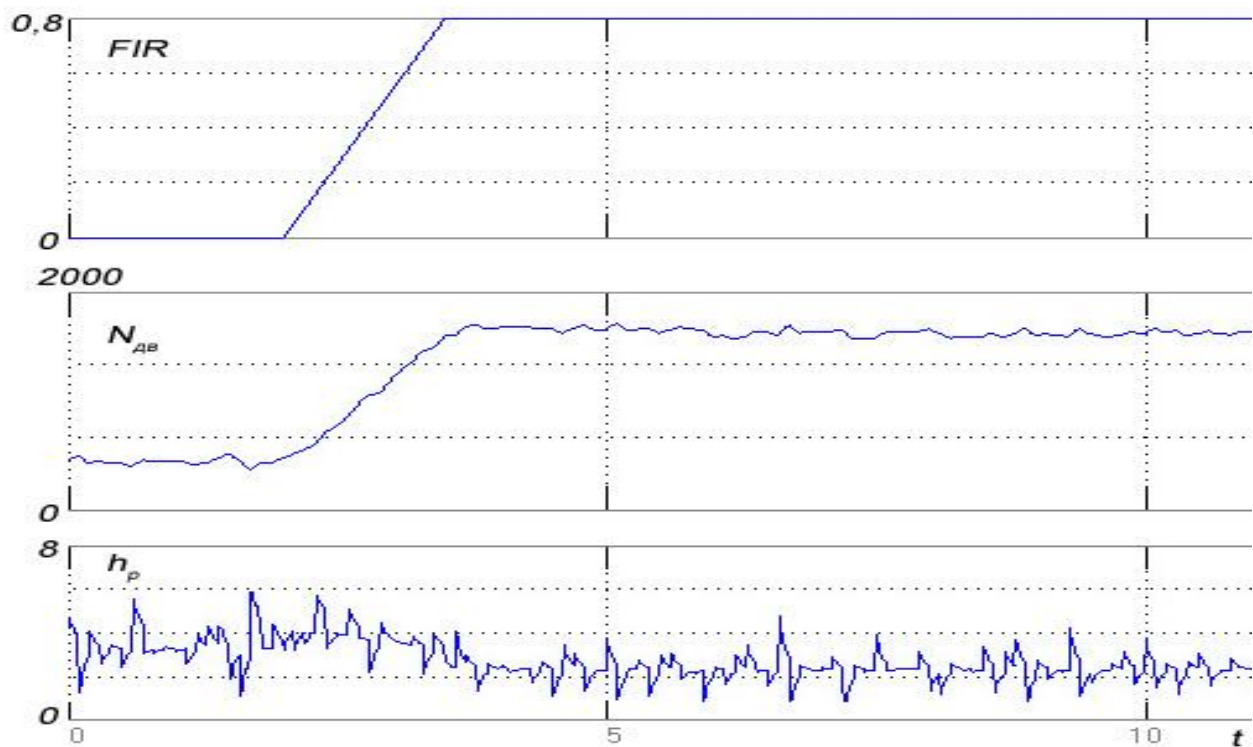


Рисунок 4.15 – Результати моделювання роботи дизеля під час накидання частоти зі значенням вібрації 3 мм

Таблиця 4.9 – Результати досліджень впливу ПД-параметрів на витрату палива дизеля при розгоні до 1850 хв^{-1}

Значення ПД-параметрів	Витрати палива під час випробувань, г	Відхилення у витратах палива від еталонного випробування, %
П=5, І=10, Д=12 (еталонне)	42,936	0

Продовження табл.4.9		
П=2, I=10, Д=12	42,948	0,03
П=13, I=10, Д=12	42,954	0,04
П=5, I=2, Д=12	43,272	0,78
П=5, I=20, Д=12	42,882	-0,13
П=5, I=10, Д=2	43,578	1,5
П=5, I=10, Д=25	42,894	-0,1
П=1, I=2,5, Д=3	43,858	1,5
П=10, I=20, Д=25	42,972	0,08

Для визначення різниці у витратах палива за різних значень амплітуди вібрації дизеля проведено ряд вимірювань на математичній моделі. Дослідження проводилися за тих самих значень ПІД-параметрів як і в попередніх випадках. Результати втрат палива за різних значень амплітуди вібрацій наведено в табл. 4.10.

Таблиця 4.10 – Результати витрати палива за різних значень амплітуди вібрацій (vibr) і різних налаштувань ПІД-регулятора за витримки в часі в 12 с

	I=10, Д=12			П=5, Д=12		П=5, I=10			
Значення вібрацій, мм	П=5	П=2	П=13	I=2	I=20	Д=2	Д=25	П=1, I=2,5, Д=3	П=10, I=20, Д=25
0	41,58	41,58	41,64	42,21	41,58	41,61	41,64	41,85	41,58
1	41,64	41,64	41,7	42,21	41,58	41,64	41,67	42,63	41,65
2	42,93	42,84	43,11	42,48	42,84	43,38	43,11	43,71	42,96
3	44,22	43,92	44,11	44,4	43,95	43,68	44,22	44,28	43,86

Графічні інтерпретації даних, наведених в табл.4.10. показані на рис.4.16 – 4.24.

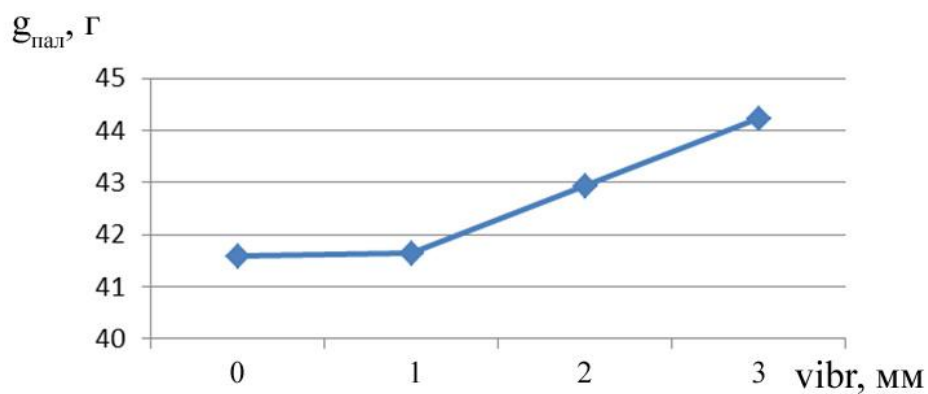


Рисунок 4.16 – Витрати палива в залежності від рівня вібрацій
при $P=5$, $I=10$, $D=12$

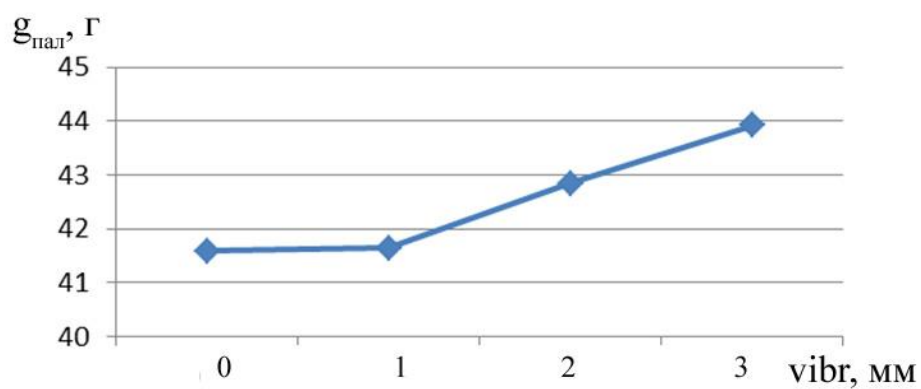


Рисунок 4.17 – Витрати палива в залежності від рівня вібрацій
при $P=2$, $I=10$, $D=12$

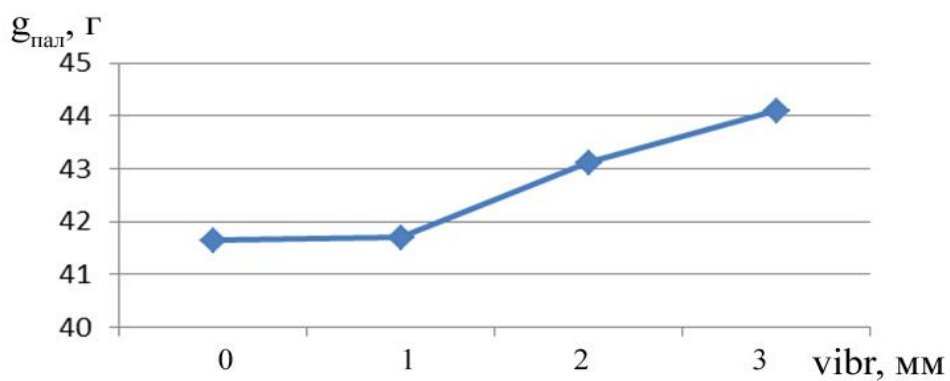


Рисунок 4.18 – Витрати палива в залежності від рівня вібрацій
при $P=13$, $I=10$, $D=12$

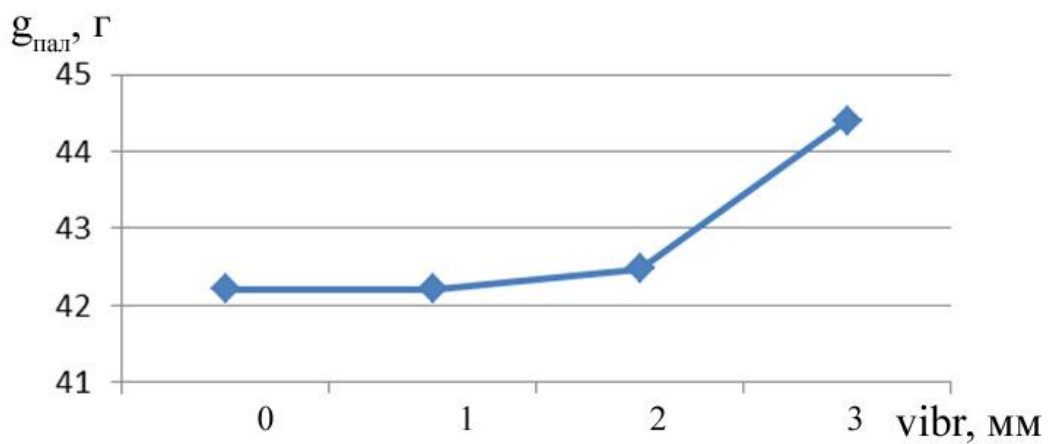


Рисунок 4.19 – Витрати палива в залежності від рівня вібрацій
при $\Pi=5$, $I=2$, $D=12$

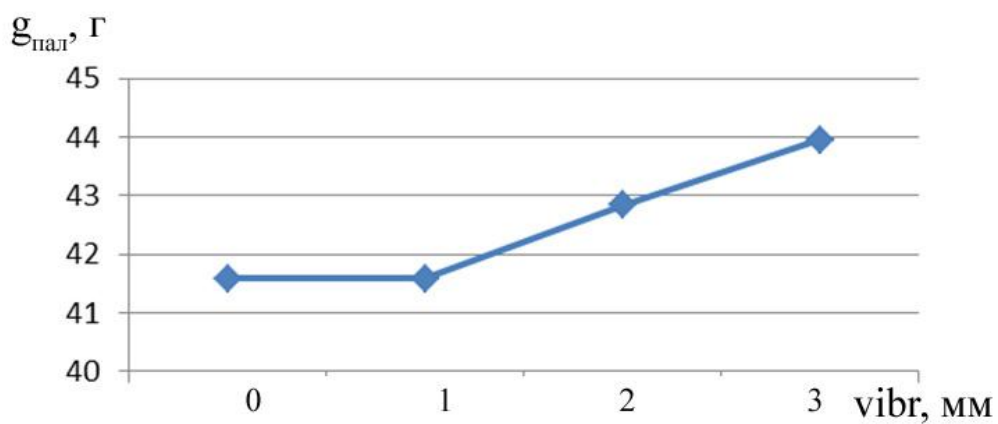


Рисунок 4.20 – Витрати палива в залежності від рівня вібрацій
при $\Pi=5$, $I=20$, $D=12$

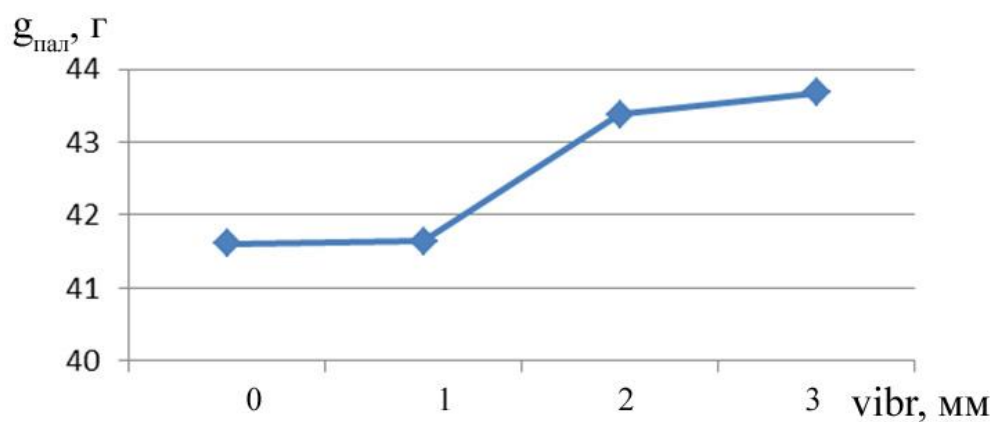


Рисунок 4.21 – Витрати палива в залежності від рівня вібрацій
при $\Pi=5$, $I=10$, $D=2$

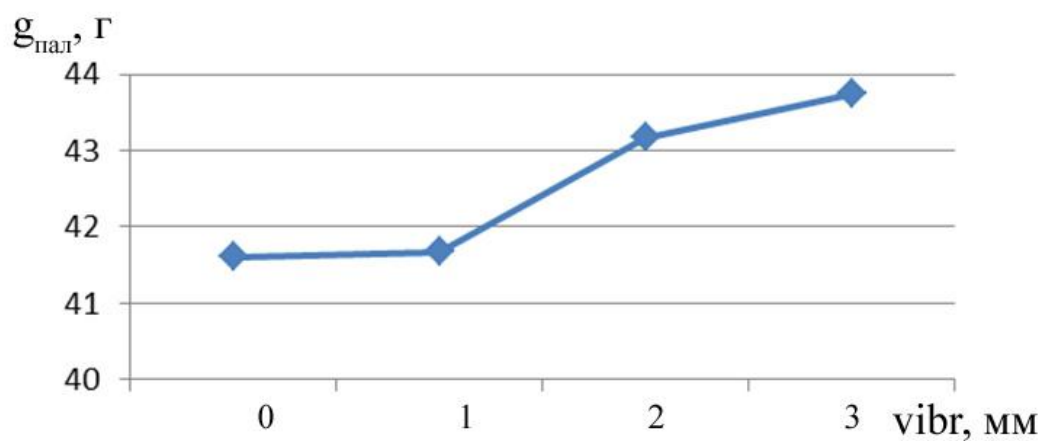


Рисунок 4.22 – Витрати палива в залежності від рівня вібрацій при $\Pi=5$, $I=10$,
 $D=25$

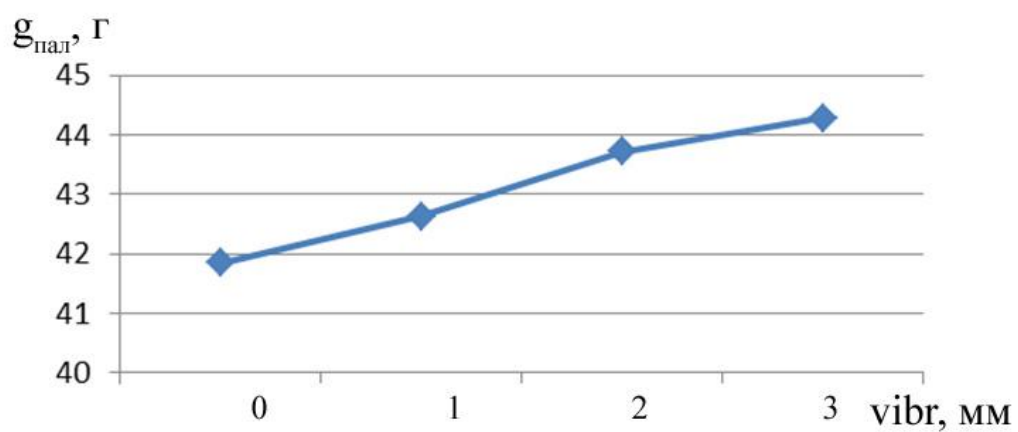


Рисунок 4.23 – Витрати палива в залежності від рівня вібрацій при $\Pi=1$, $I=2,5$,
 $D=3$

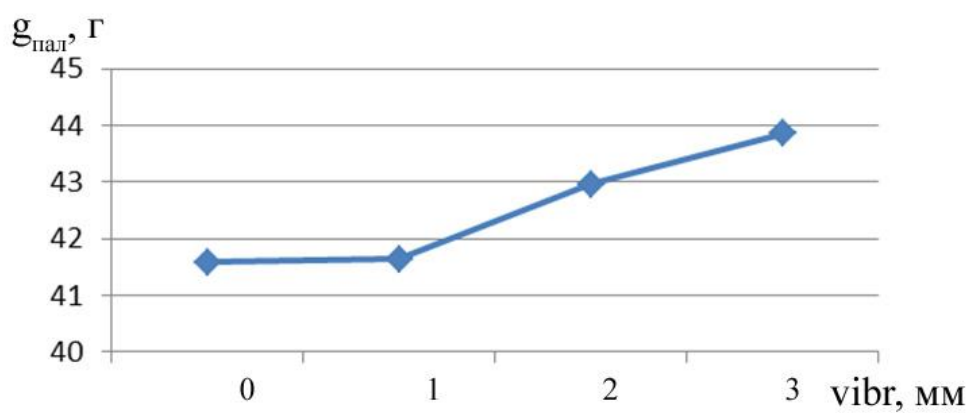


Рисунок 4.24 – Витрати палива в залежності від рівня вібрацій при $\Pi=10$, $I=20$,
 $D=25$

З рис. 4.16 – 4.24 видно, що зростання витрат палива зі збільшенням вібрацій – нелінійне.

З рівнем вібрацій до 1 мм (включно) перевитрат палива немає.

На рис. 4.19 – 4.21 показано вплив І-складової на витрату палива за різних рівнів вібрації. За малих (до 1 мм) та великих (більше 3 мм) рівнів вібрації зміна І-складової не впливає на витрату палива, проте за вібрації в межах 1...3 мм зменшення І-складової приводить до зменшення витрат палива. За результатами моделювання отримана економія палива в 2,25 %.

Зменшення витрати палива отримано в результаті того, що зменшуються коливання вала ВМ, і відповідно – зменшуються коливання рейки ПНВТ.

Залежність між положенням рейки ПНВТ та цикловою подачею палива нелінійна. В наслідок цього відхилення рейки під час горизонтальних коливань в бік збільшення подачі призводить до більшої перевитрати палива. Відхилення рейки в бік зменшення подачі – приводить до зменшення витрати палива. За симетричних коливань рейки ПНВТ зменшення амплітуди коливань приводить до економії палива.

За матеріалами розділу опубліковані праці [96, 101-103].

Висновки до розділу 4

1. Для дизелів КТЗ визначено необхідність встановлення значень ПД-параметрів в широких межах швидкісних режимів (від 800 до 3000 хв^{-1}) та забезпечення якісних перехідних процесів для цього швидкісного діапазону. Для виконання цієї задачі розроблена методика досліджень для визначення необхідних ПД-параметрів в усьому швидкісному та навантажувальному діапазоні.

2. Запропоновано комплексний корегуючий коефіцієнт ПД-параметрів k_{Σ} , що пропорційно змінює П, І та Д-складові. Отримано 3-вимірний масив значень комплексного корегуючого коефіцієнта в залежності від частоти обертання колінчастого вала та навантаження на дизель.

3. Встановлено необхідність індивідуального підбору ВМ і ПД-параметрів для кожного типу двигунів та врахування їх експлуатаційного призначення.

4. Отримано вихідні данні для створення математичної моделі дизеля обладнаного ЕВР та проведена перевірка адекватності отриманої моделі в статичі і динаміці.

5. Встановлено, що збільшення амплітуди коливань може бути ознакою недостатньої потужності двигуна ВМ, проте для оцінки допустимого значення коливань рейки ПНВТ та для визначення їх впливу на раціональні ПД-параметри розроблена методика і програма досліджень на математичній моделі:

6. В результаті моторних випробувань отримано підтвердження зростання вібрацій дизеля на частотах обертання близьких до номінальних (для дизеля 4ЧН12/14 це 1850 хв^{-1} і більше). Отримані данні підтверджують необхідність дослідити вплив зовнішніх вібрацій на роботу САРЧ. Залежність циклової подачі палива від положення рейки ПНВТ - нелінійна, вібрації рейки в сторону збільшення та зменшення подачі не компенсують одна одну. Це призводить до зміни витрат палива.

7. Визначено, що зростання витрат палива зі збільшенням зовнішніх вібрацій – нелінійне. З рівнем вібрацій до 1 мм (включно) перевитрат палива немає. Встановлено, що вплив налаштування ПД-параметрів на витрату палива дизелем за усталених режимів – незначний.

8. Визначено, що за малих (до 1 мм) та великих (більше 3 мм) рівнів вібрації зміна І-складової не впливає на витрату палива, проте за вібрації в межах 1...3 мм зменшення І-складової приводить до зменшення витрат палива. За результатами моделювання перехідних процесів встановлена економія палива в 2,25 %.

РОЗДІЛ 5

ВИКОРИСТАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ПІД-МОДЕЛЮВАННЯ В МОТОРНИХ І ДОРОЖНІХ ВИПРОБУВАННЯХ

5.1. Додаткове уточнення процесів запуску і зупинки на дизелі

На рис. 5.1 – 5.2 показано цифровий запис пуску, роботи в режимі мінімального холостого ходу та зупинки дизеля з показниками ПД-параметрів, налаштованих для режиму холостого ходу. Значення П-складової в 2 % забезпечує стабільну роботу в режимі холостого ходу та відсутність перерегулювання під час пуску дизеля.

Стабільність процесу пуску та зупинки дизеля підтверджують правильність вибраних показників ПД-параметрів. Правильний вибір значення П-складової підтверджується малим відхиленням значення положення рейки ПНВТ, що встановлював регулятор від реального значення положення рейки (рис. 5.3).

Перевірка пуску і зупинки повинна бути обов'язковою при налаштуванні МР, так як в математичній моделі цих режимів не було.

В ході стендових випробувань, незважаючи на те, що дизель СМД вдало завівся показував задовільну роботу на середніх та високих частотах, на низьких частотах спостерігали входження системи в режим автоколивань. Величина амплітуди коливань досягала 20 %. Це підтверджує необхідність введення комплексного корегуючого коефіцієнту, значення якого було визначено попередніми дослідженнями на математичній моделі.

Для уточнення значень комплексного корегуючого коефіцієнту K_{Σ} були проведені серії вимірювань на мінімальних, робочих та перехідних частотах колінчастого вала. Підбирали значення ПД-параметрів, що задовольняють мінімальним та максимальним значенням частоти обертання.

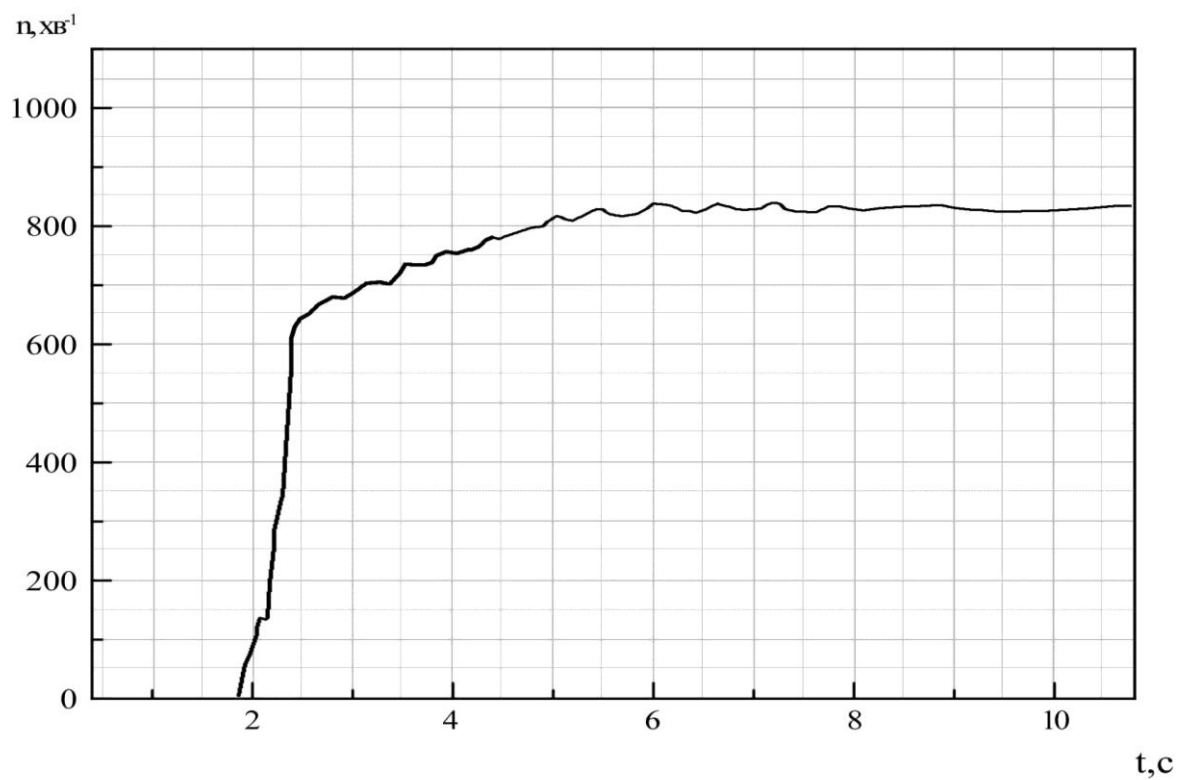


Рисунок 5.1 – Пуск дизеля при: $\Pi=2,0\%$; $I=10,0\%$; $D=12,0\%$.

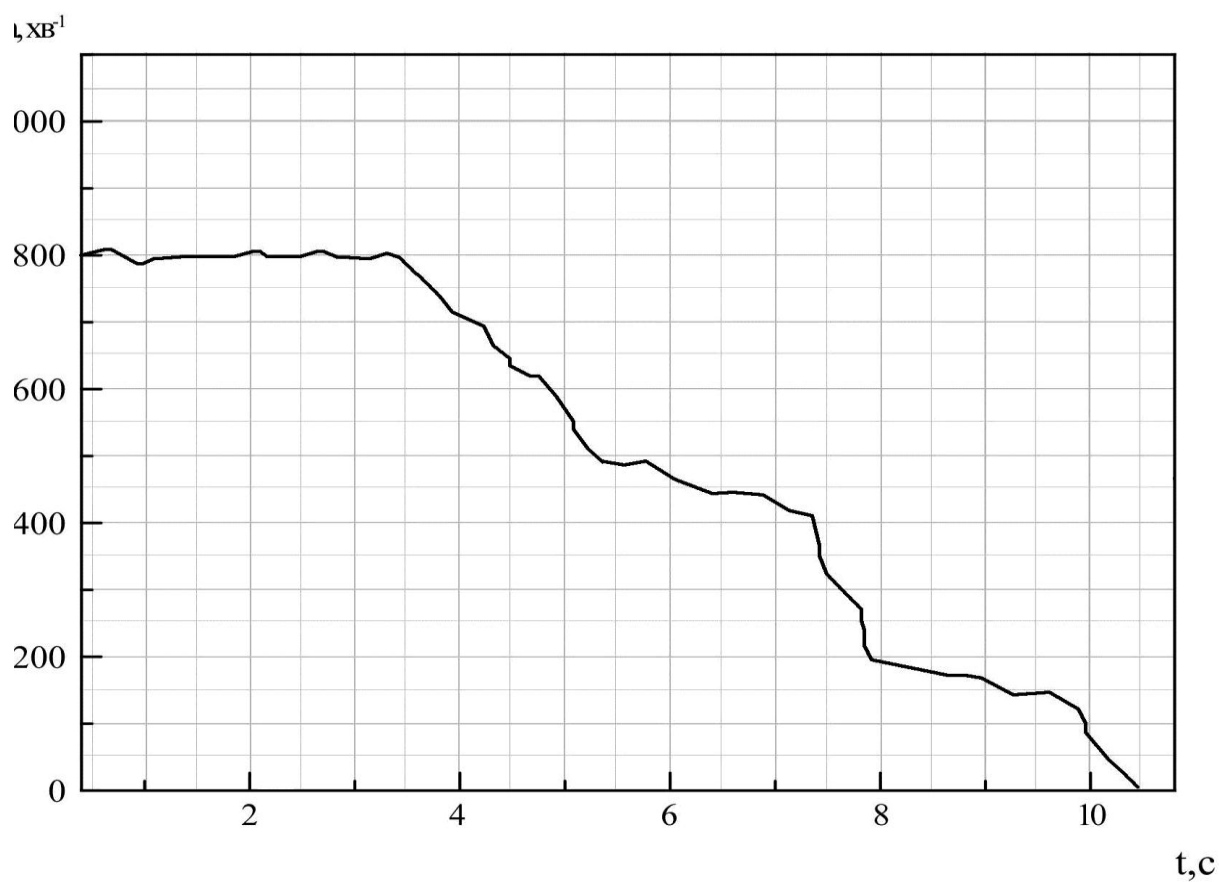


Рисунок 5.2 – Зупинка дизеля при: $\Pi=2,0\%$; $I=10,0\%$; $D=12,0\%$.

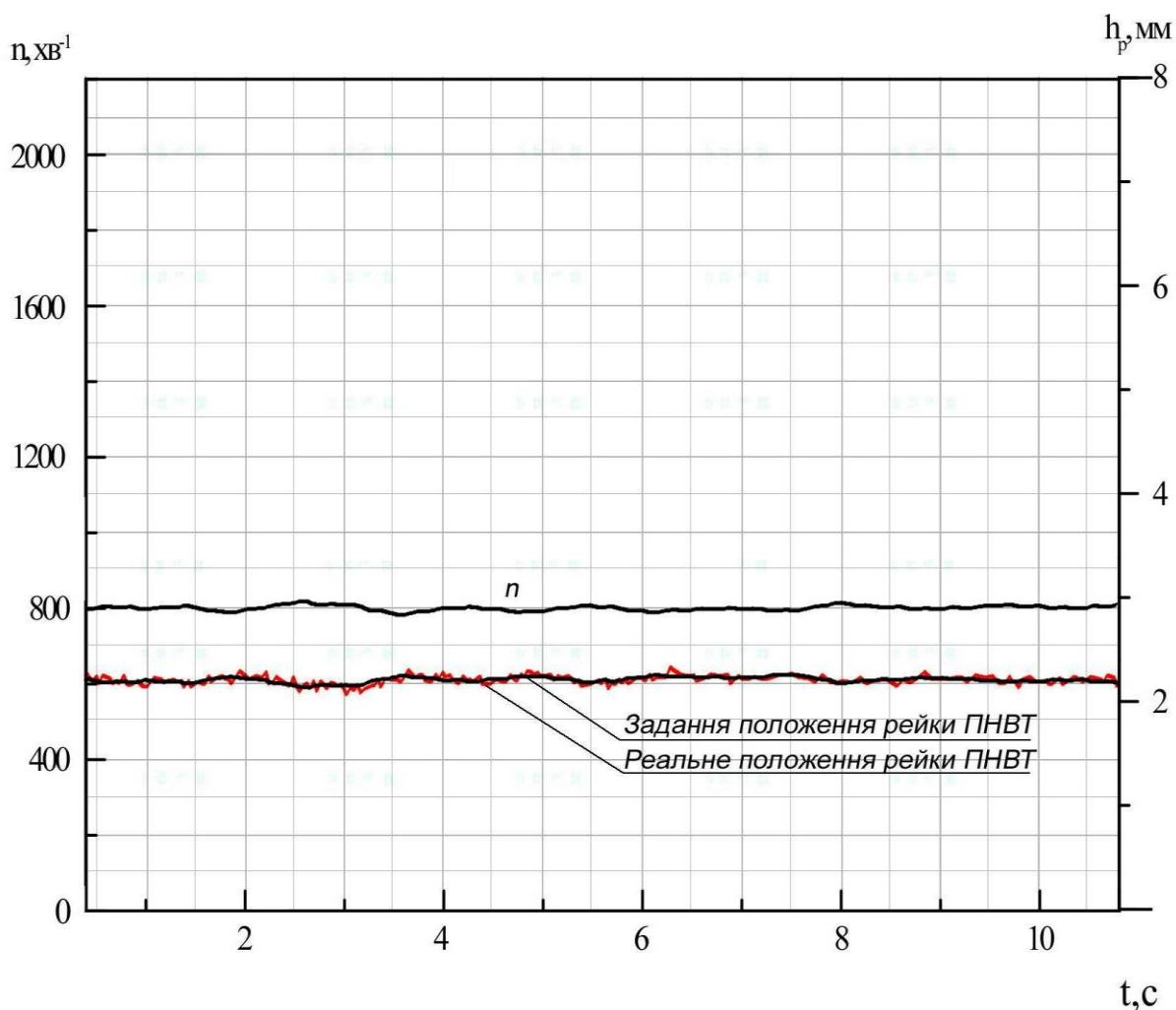


Рисунок 5.3 – Робота дизеля в режимі мінімального холостого ходу: $P=2,0\%$;
 $I=10,0\%$; $D=12,0\%$.

5.2. Перевірка раціональних налаштувань ПД-параметрів дизеля при зміні швидкісних режимів

На рис. 5.4 показана робота дизеля налаштованого для режиму холостого ходу ($P = 2,0\%$; $I = 10,0\%$; $D = 12,0\%$) в номінальному швидкісному режимі. Низьке вибране значення P -складової не може підтримувати стабільну роботу дизеля.

Після налаштування ПД-параметрів для роботи на холостому ходу, провели налаштування роботи дизеля за номінального швидкісного режиму (рис. 5.5). Стабільної роботи дизеля вдалося досягнути завдяки підвищенню P -складової з 2% до $13,5\%$.

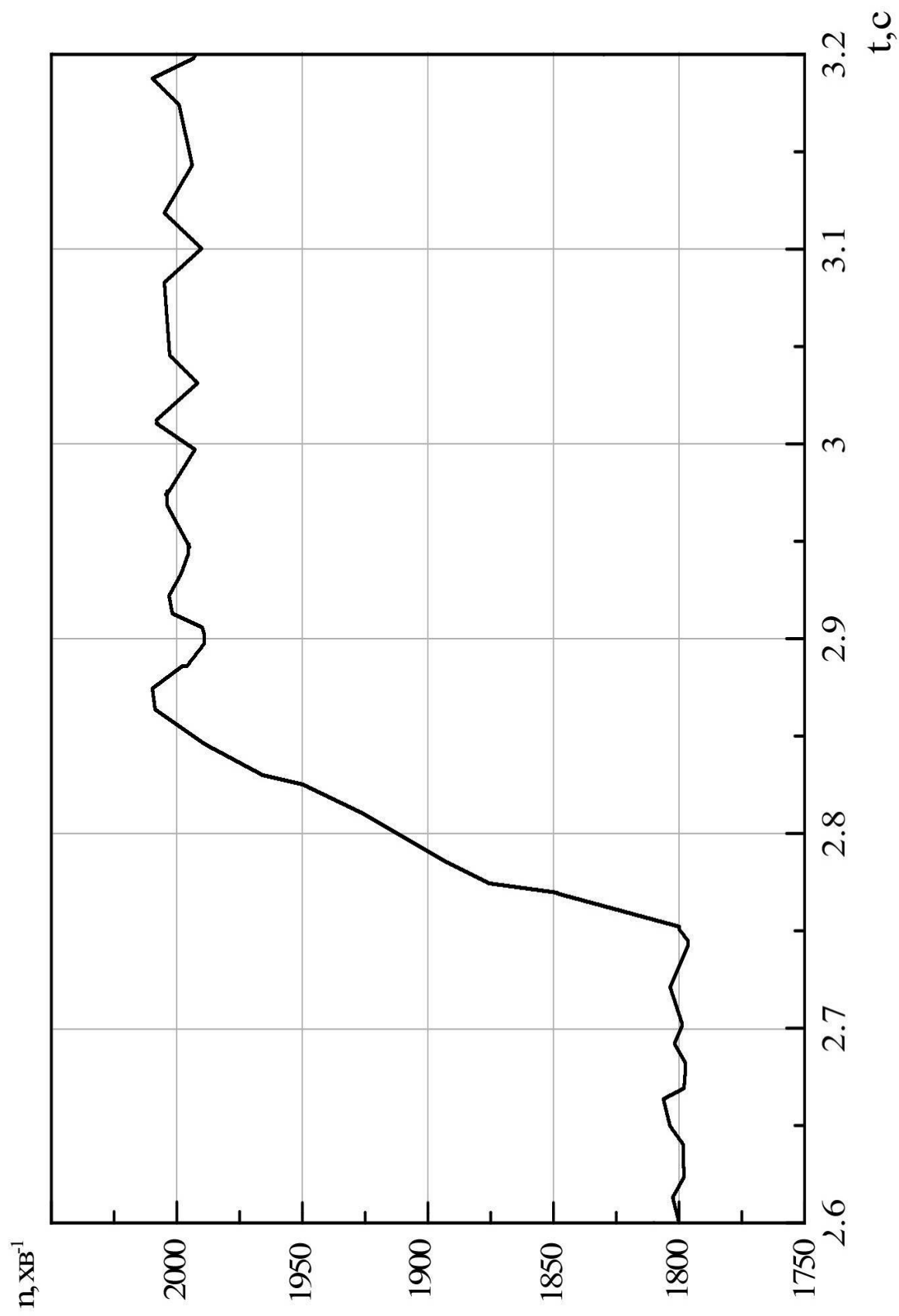


Рисунок 5.4 – Перехідний процес і робота дизеля за частоти обертання 2000xB^{-1} : $\Pi=2,0\%$; $I=10,0\%$; $D=12,0\%$

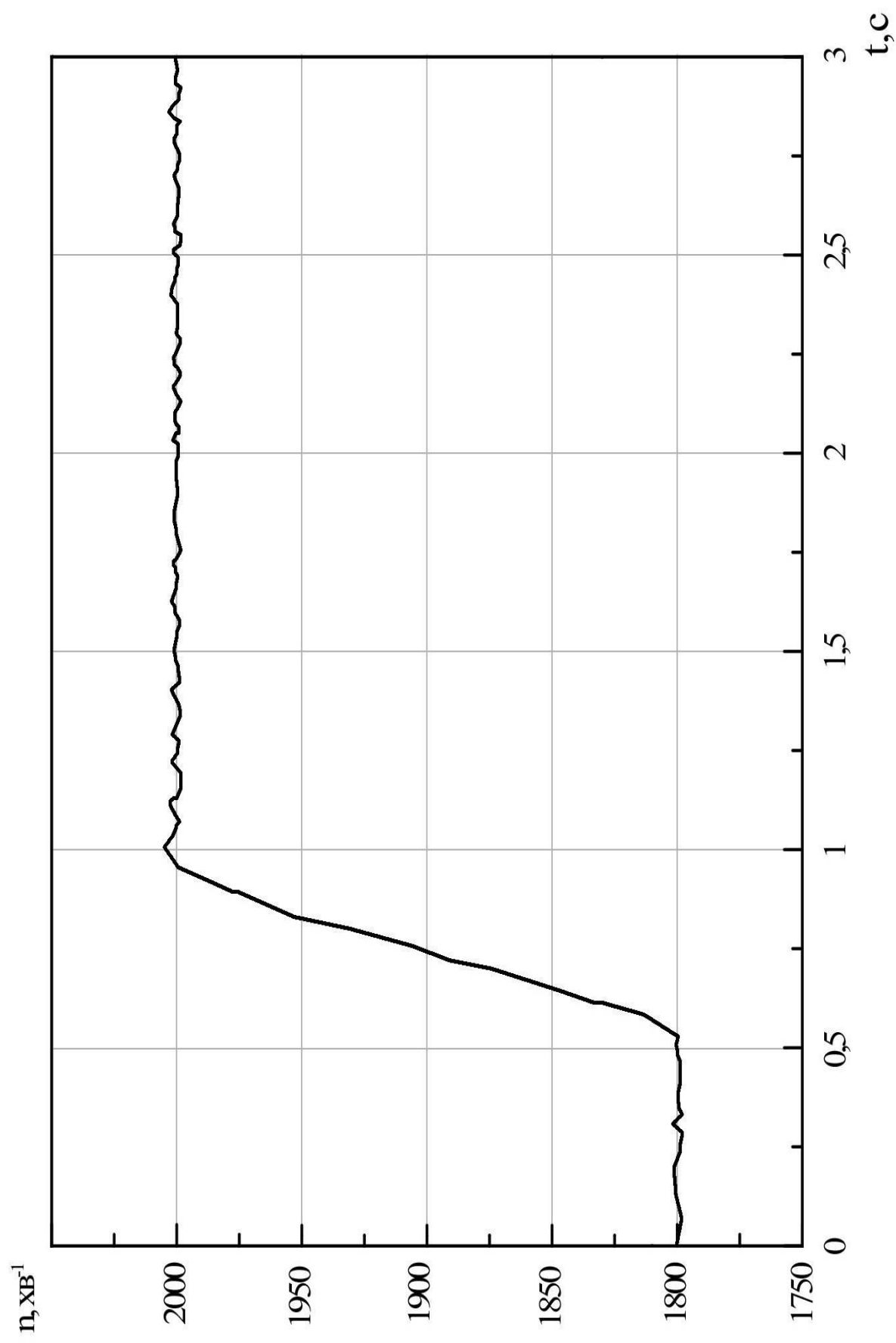


Рисунок 3.3 – перехідний процес і робота дизеля за частоти обертання 2000хв . II–12,5%, I–10,0%, II–12,0%

Проте, за значення П-складової в 13,5 % робота дизеля в режимі холостого ходу погіршилася (рис. 5.6).

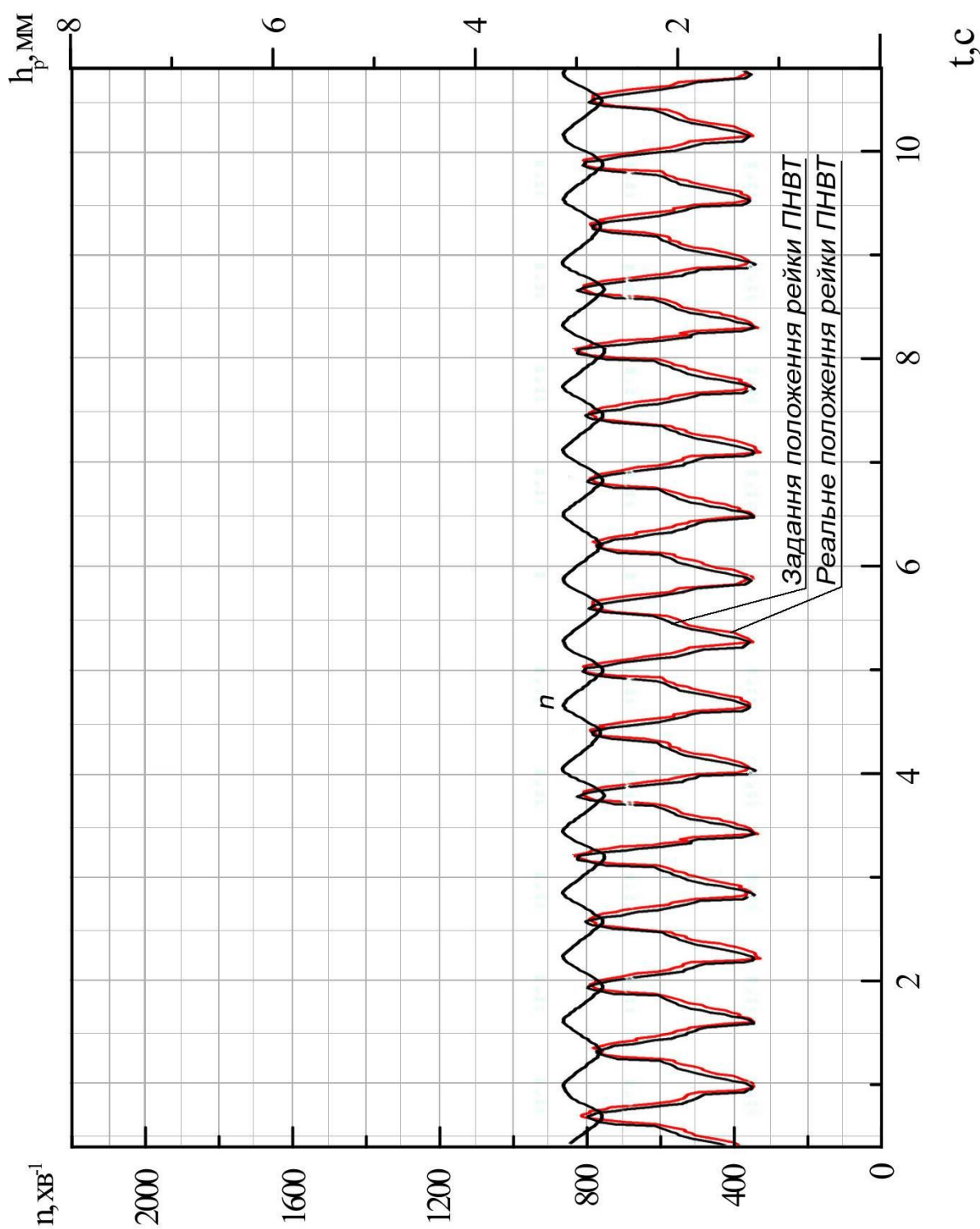


Рисунок 5.6 – Робота дизеля в режимі мінімального холостого ходу: $II=13,5\%$; $I=10,0\%$;

$D=12,0\%$

Отримані результати підтверджують необхідність переналаштування ПД-параметрів при зміні режиму роботи дизеля.

В блок ЕБК було внесено комплексний коригуючий коефіцієнт K_{Σ} ПД-параметрів в залежності від швидкісного режиму дизеля та проведено серію випробувань, де досліджували перехідні процеси при накиданнях частоти обертання від холостого ходу до номінального режиму з кроком 200 хв^{-1} . На рис. 5.7- 5.12 наведено результати вимірювань отриманих в процесі дослідження.

Результати отриманих перехідних процесів показують, що перерегулювання не перебільшувало $2,5 \%$, час перехідних процесів не перебільшував $0,5 \text{ с}$, та кількість коливань в процесі регулювання не перебільшувало 2.

При роботі за номінального швидкісного режиму підвищувалися вібрації корпусу дизеля, що призводило до вібрацій рейки ПНВТ, що погіршувало стабільність роботи дизеля.

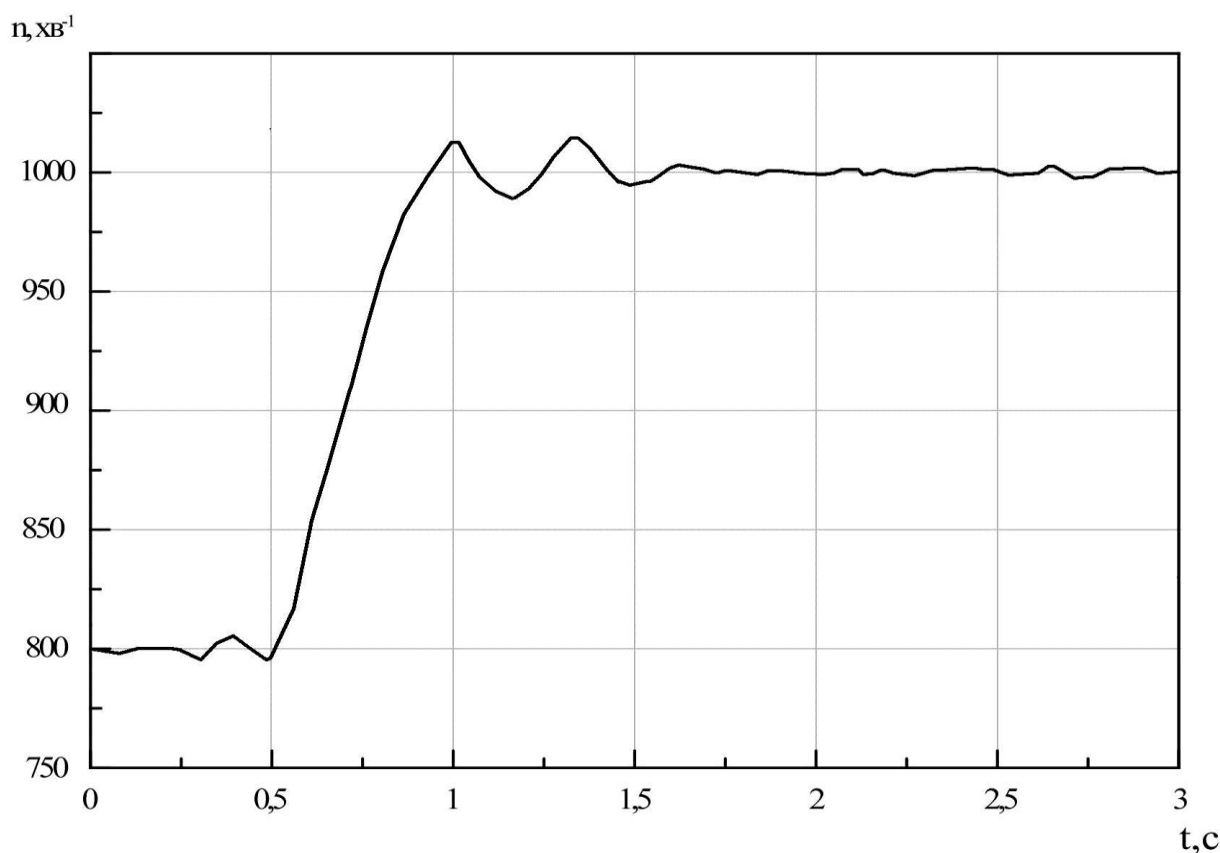


Рисунок 5.7 – Перехідні процеси та робота дизеля при збільшенні частоти обертання з 800 до 1000 хв^{-1}

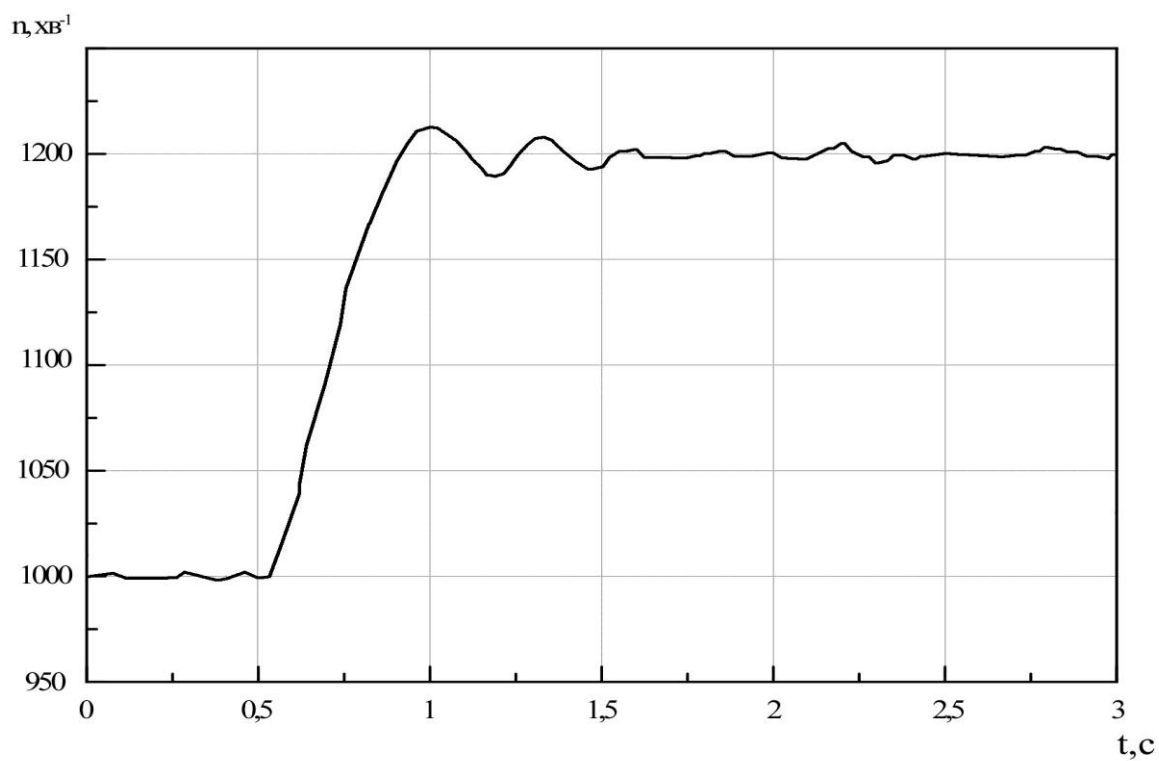


Рисунок 5.8 – Перехідні процеси та робота дизеля при збільшенні частоти обертання з 1000 до 1200 xv^{-1}

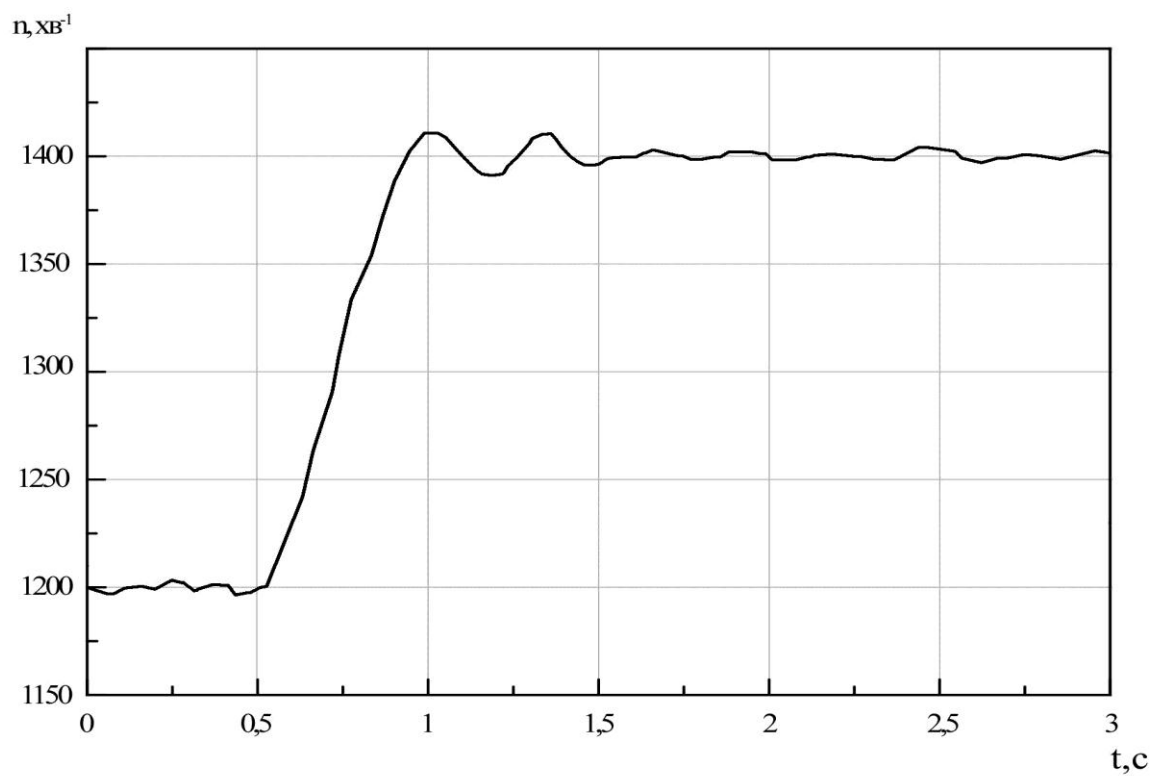


Рисунок 5.9 – Перехідні процеси та робота дизеля при збільшенні частоти обертання з 1200 до 1400 xv^{-1}

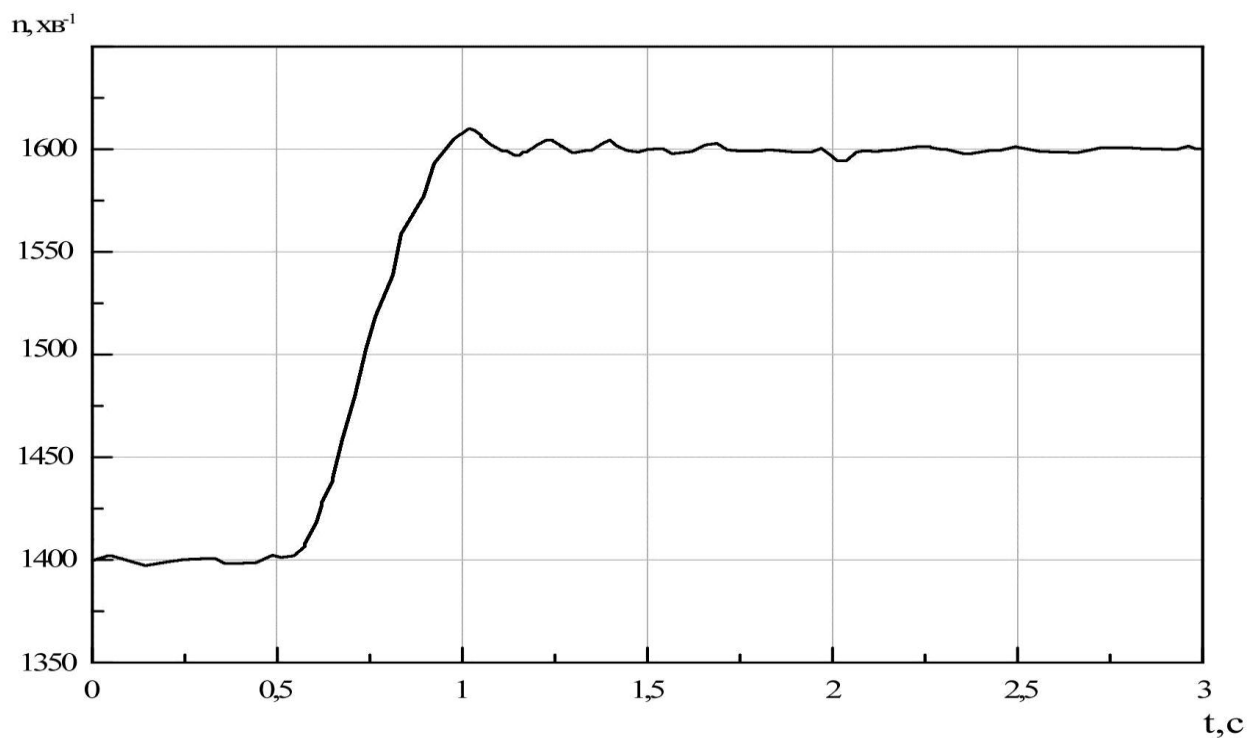


Рисунок 5.10. – Перехідні процеси та робота дизеля при збільшенні частоти обертання з 1400 до 1600 xv^{-1}

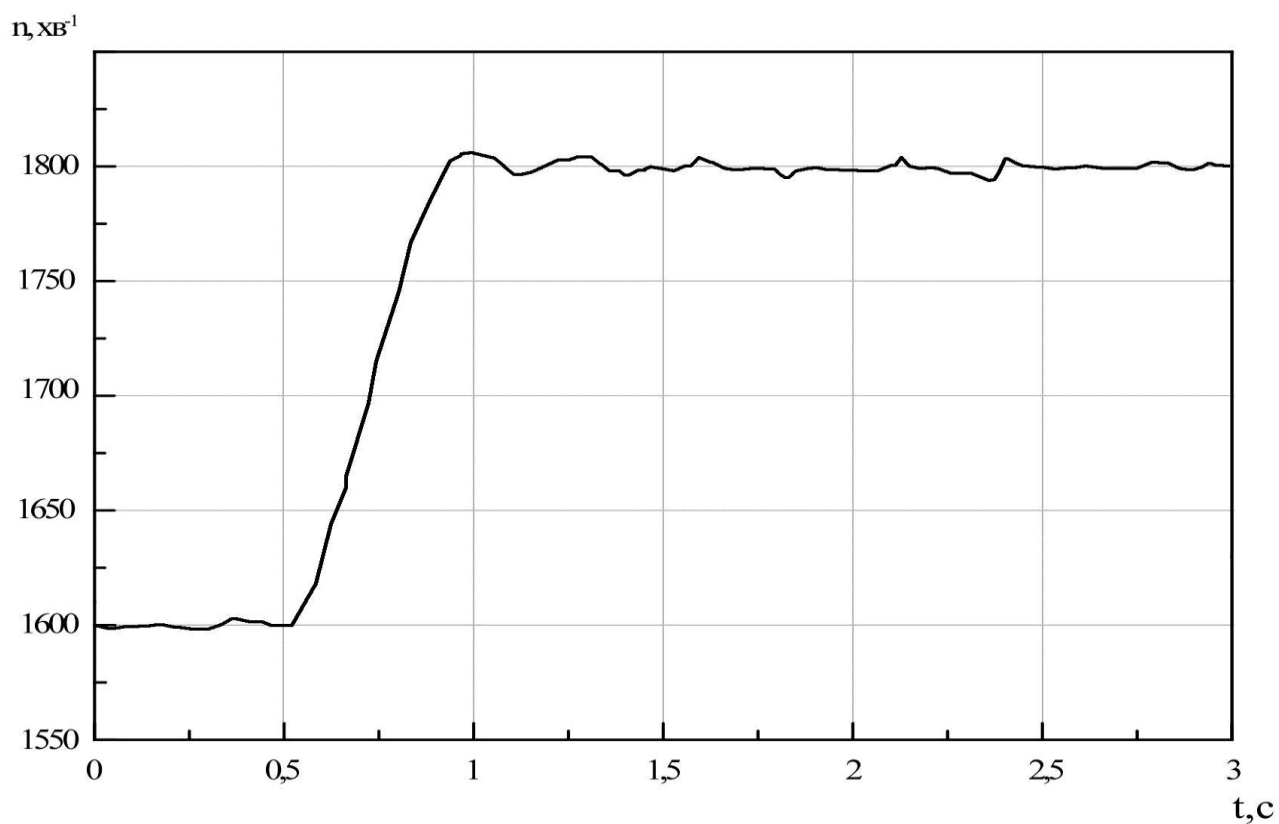


Рисунок 5.11. – Перехідні процеси та робота дизеля при збільшенні частоти обертання з 1600 до 1800 xv^{-1}

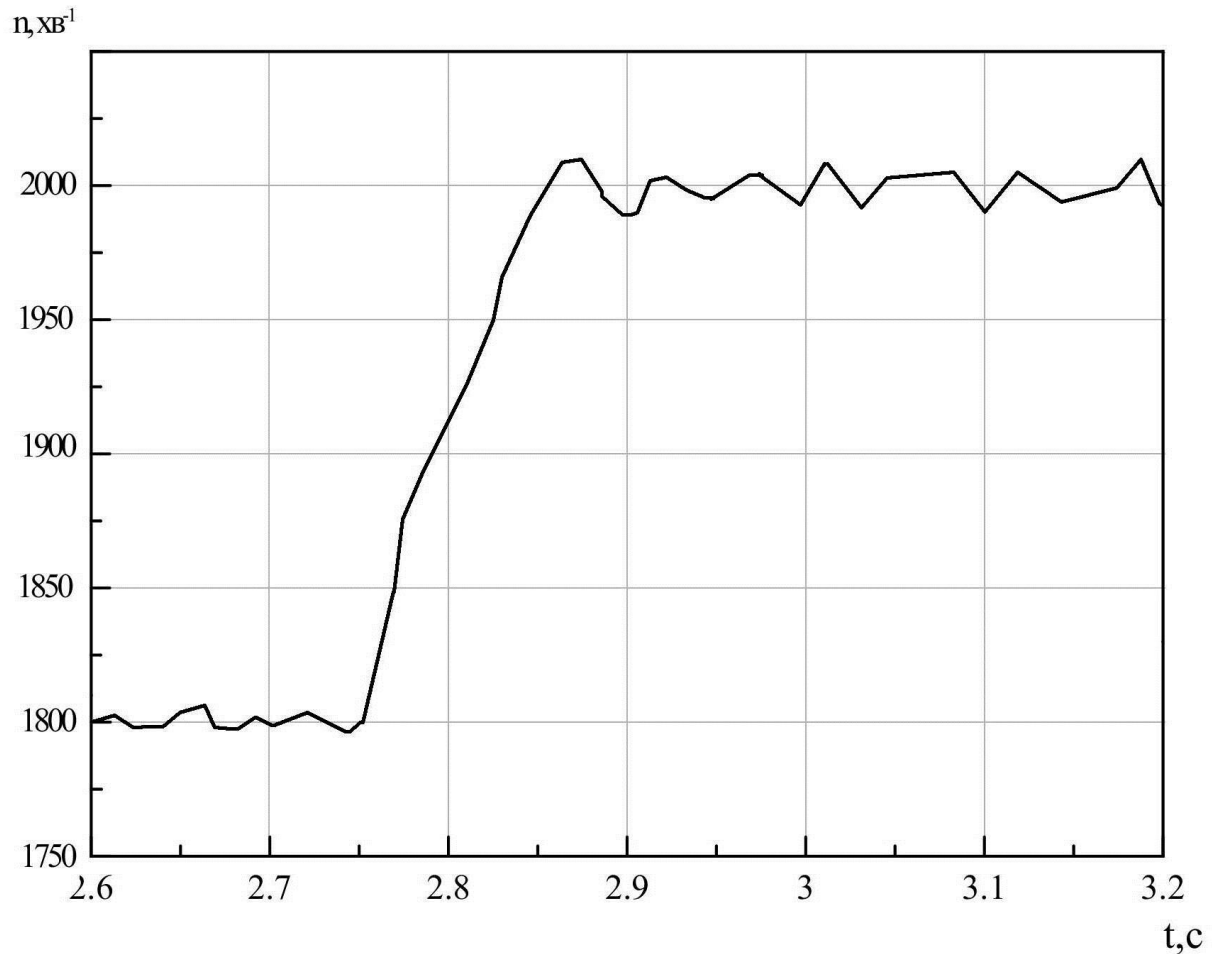


Рисунок 5.12 – Перехідні процеси та робота дизеля при збільшенні частоти обертання з 1800 до 2000 хв^{-1}

Проаналізували значення кута повороту вала ВМ. Він був перерахований в значення переміщення рейки ПНВТ. На рис. 5.13 та 5.14 показано перехідні процеси при різкому миттєвому зниженні частоти обертання колінчастого вала зі значення 2000 хв^{-1} з інтервалом 100 хв^{-1} . На рисунках показано зміни частоти, значення положення рейки ПНВТ, що задавалися ЕБК та реальні значення положення рейки ПНВТ.

На рис. 5.13 видно, що за частоти обертання колінчастого вала 2000 хв^{-1} суттєво зростає амплітуда коливань рейки ПНВТ. Це пояснюється підвищенням вібрації двигуна в цьому швидкісному режимі. Отримані данні підтверджують необхідність виконаних досліджень впливу вібрацій на роботу САРЧ дизеля.

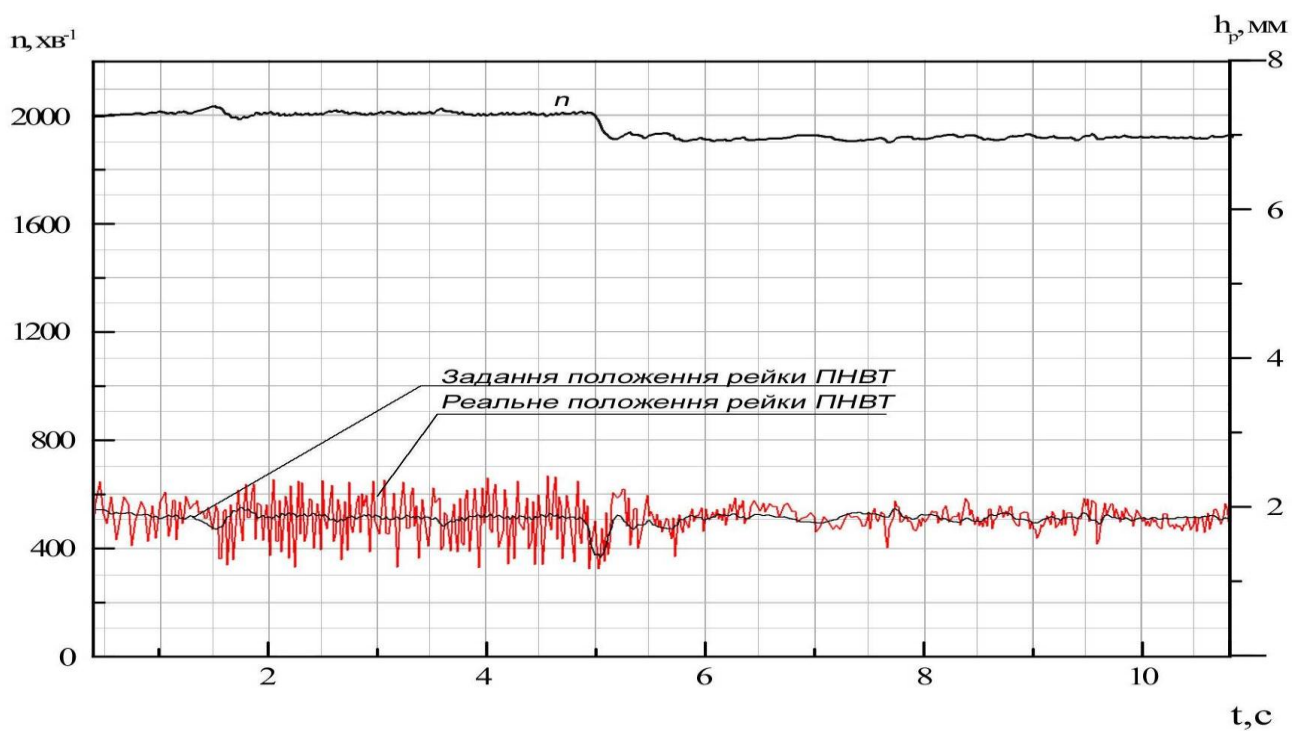


Рисунок 5.13 – Робота дизеля при зменшенні частоти обертання
з 2000 хв^{-1} до 1900 хв^{-1}

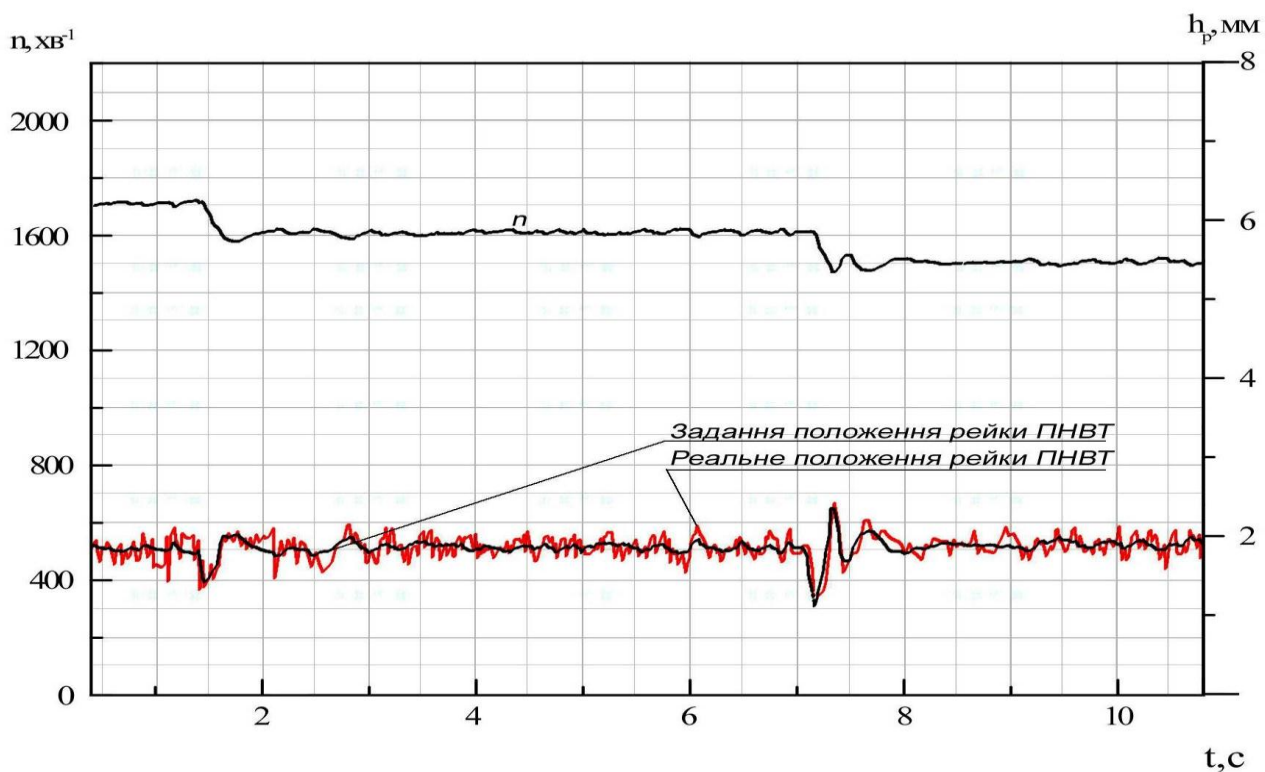


Рисунок 5.14 – Робота дизеля при зменшенні частоти обертання
з 1700 хв^{-1} до 1600 хв^{-1}

5.3. Порівняння показників роботи дизеля з різними регуляторами

Для порівняння якості регулювання розробленого ЕВР провели порівняння роботи дизеля 4ЧН12/14 в швидкісних режимах 800 хв^{-1} (рис. 5.15), 1100 хв^{-1} (рис. 5.16) та 1800 хв^{-1} (рис. 5.17) з регуляторами інших типів.

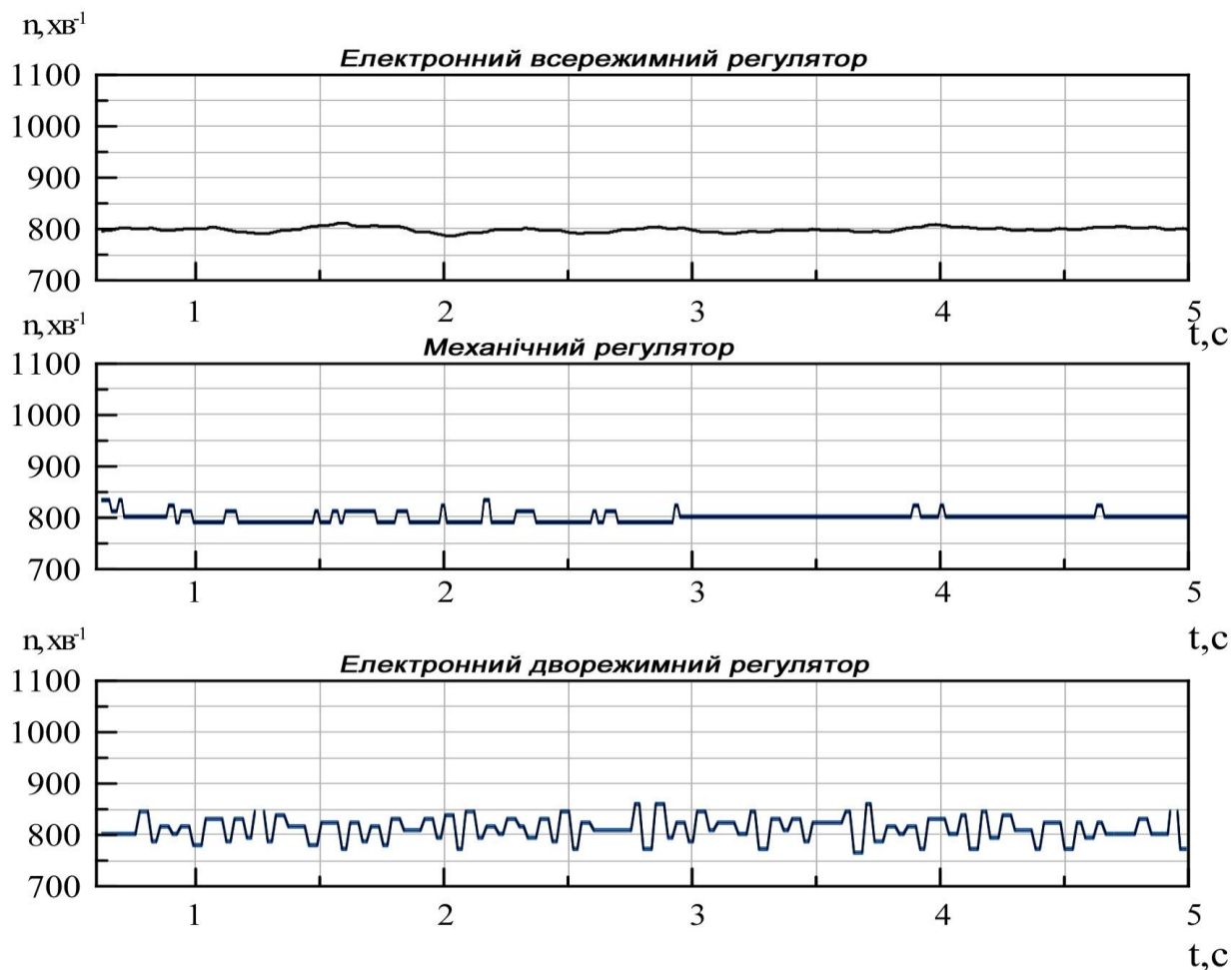


Рисунок 5.15 – Порівняння роботи дизеля 4ЧН12/14 з різними регуляторами при роботі в режимі мінімального холостого ходу 800 хв^{-1}

Отримані результати показують, що стабільність підтримання частоти обертання $\delta_{\text{ст}}$ розробленим електронним всережимним регулятором за різних уставлених швидкісних режимах не перевищує 5 % та не гірша, ніж при використанні механічного регулятора та дворежимного електронного регулятора.

Робота дизеля з електронним всережимним регулятором в перехідних режимах порівнювали з даними подібного перехідного процесу цього дизеля з

механічним дворежимним регулятором [73]. Перехідний процес при накиданні частоти з 1000 до 1200 хв^{-1} на гальмівному стенді KS-56 показано на рис. 5.18.

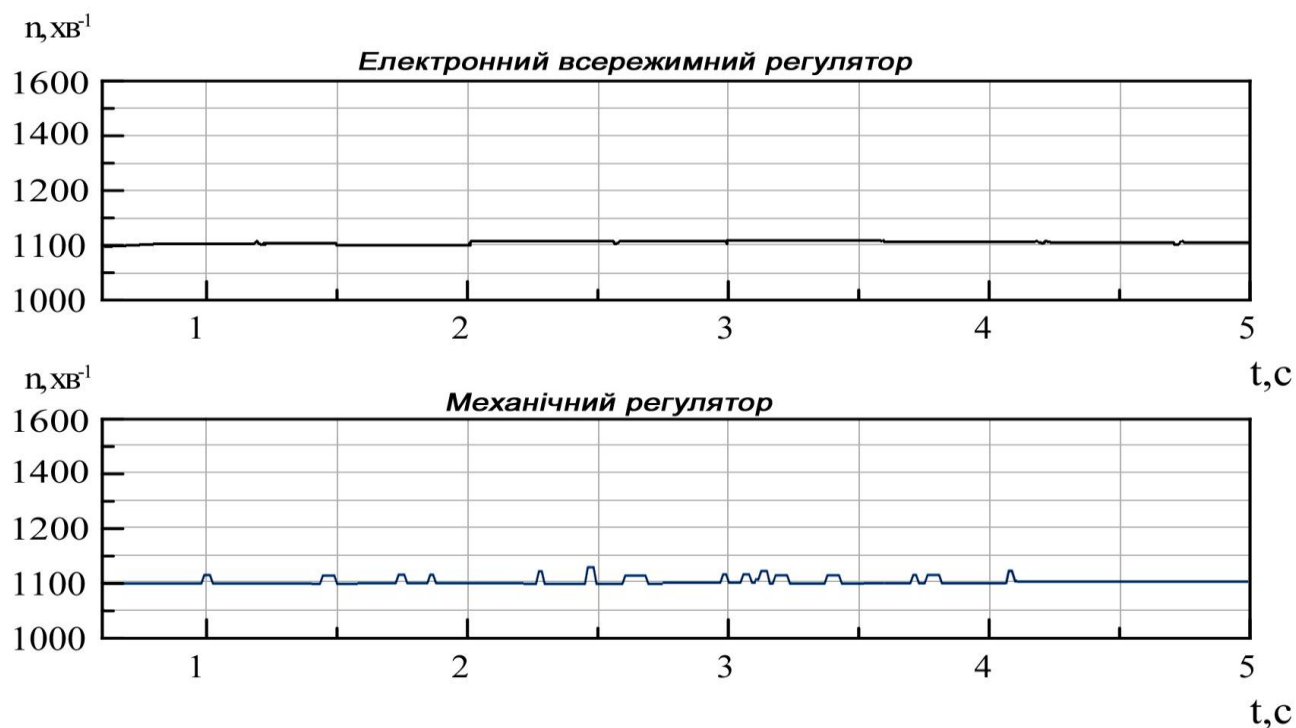


Рисунок 5.16 – Порівняння роботи дизеля з різними регуляторами за частоти обертання колінчастого вала 1100 хв^{-1}

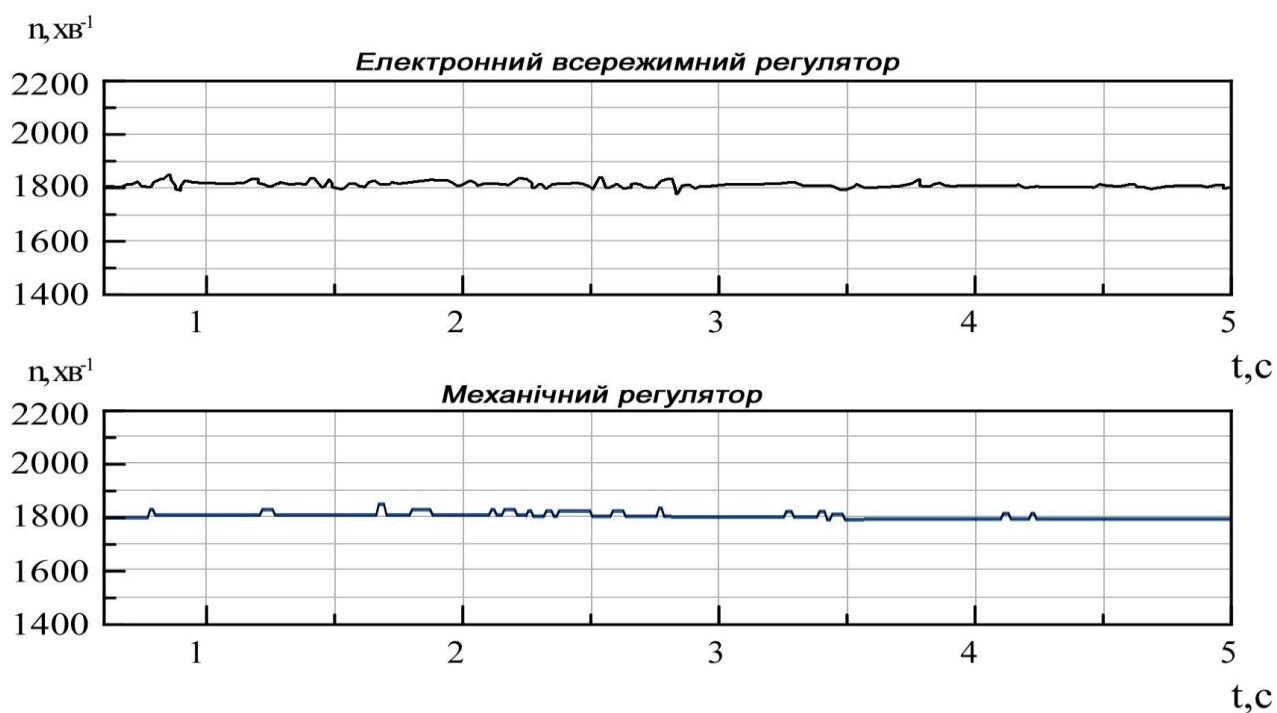


Рисунок 5.17 – Порівняння роботи двигуна з різними регуляторами за частоти обертання колінчастого вала 1800 хв^{-1}

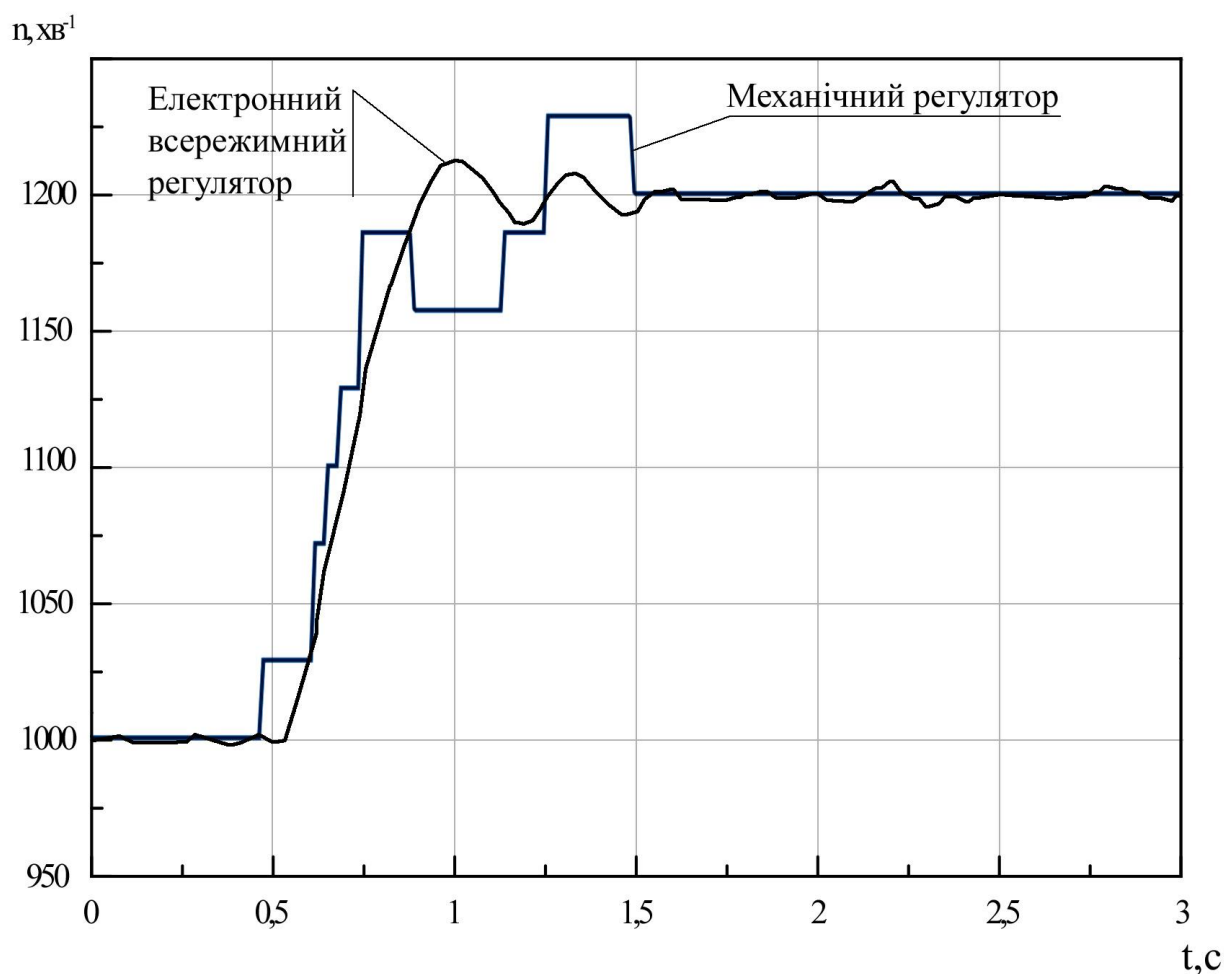


Рисунок 5.18 – Порівняння перехідних процесів двигуна з механічним та електронним регулятором

Низька дискретність сигналу механічного регулятора пояснюється низькою розрядністю аналого-цифрового перетворювача (АЦП), що обробляв сигнали з датчика.

Закидання частоти обертання під час перехідного процесу електронного всережимного регулятора склало 1,3 % та на механічному регуляторі - 2,3 %. Час встановлення склав в обох випадках 0,7 с.

В ході випробувань було відтворено режим вільного прискорення (час різкого збільшення частоти обертання – 5 с) аналогічними випробуванням проведеним з механічним регулятором [74]. Під час вільного прискорення ЕВР підтримувався темп пересування рейки ПНВТ 0,3 мм/сек. На рис. 5.19 показано порівняння

частоти обертання при цих випробуваннях та переміщення рейки ПНВТ обладнаного електронним всережимним регулятором.

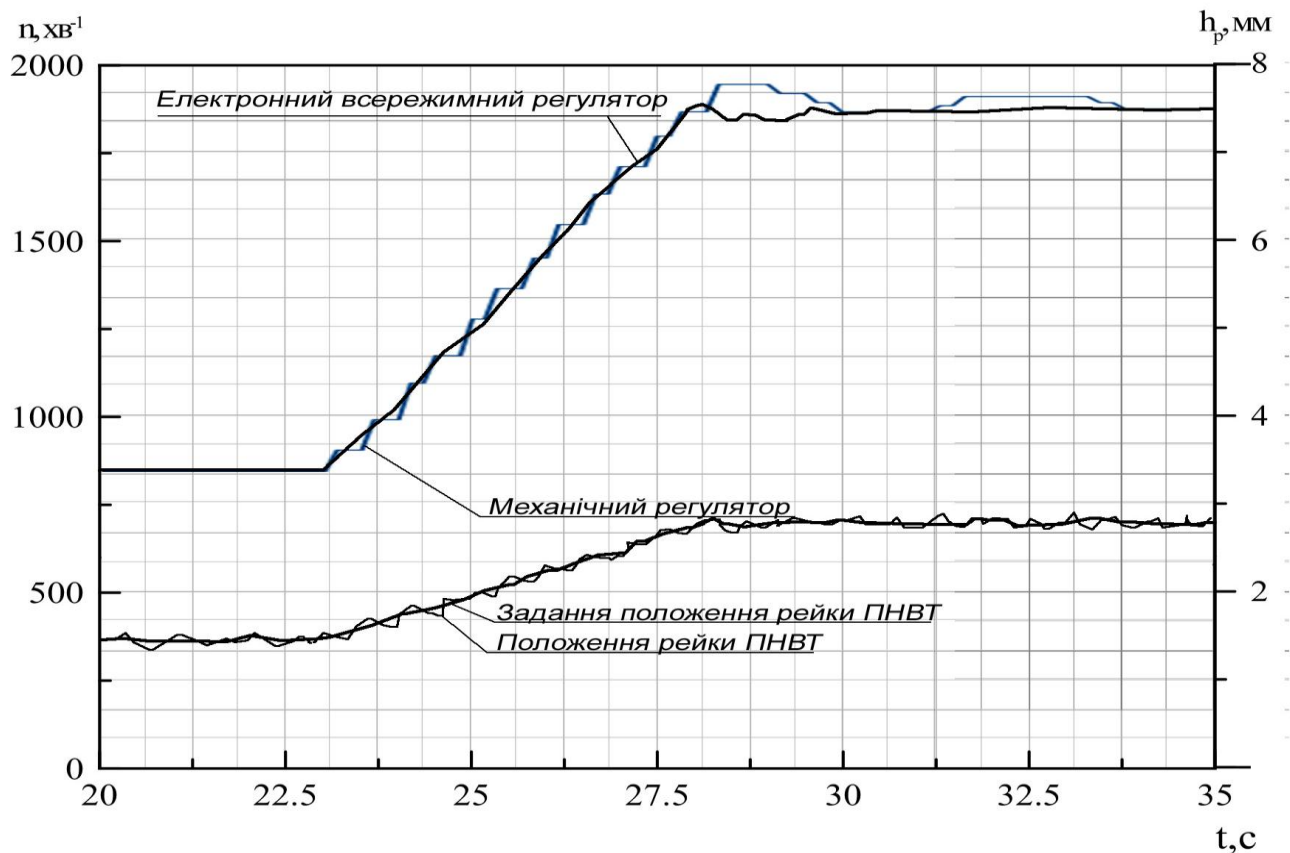


Рисунок 5.19 – Порівняння вільного прискорення двигуна з механічним та електронним регулятором

Отримані результати показують задовільну роботу електронного всережимного регулятора на різних статичних та динамічних режимах та підтверджують необхідність налаштування ПІД-параметрів в залежності від режиму роботи дизеля.

5.4. Підтвердження результатів ПІД-моделювання дорожніми випробуваннями

Для підтвердження правильності настройки ПІД-регулятора для КТЗ були проведені випробування дизеля 8Ч13/14 на тракторі Т150К при розгонах з переключанням передач. При таких розгонах перехідні процеси в САРЧ дизеля

збуджуються не накиданням навантаження, як в дизель-електричному агрегаті, а змішано - натисненням на електронну педаль і одночасно накиданням навантаження, яке передається через зчеплення від трансмісії.

На рис. 5.20 показано трактор Т150К встановлений на бігових барабанах для налаштування параметрів регулювання під навантаженням.



Рисунок 5.20 – Трактор Т150К встановлений на бігових барабанах

Дизель 8Ч13/14 був відрегульований на потужність 128 кВт при частоті обертання колінчастого вала 2100 хв^{-1} [102]. На дизелі був встановлений ПНВТ типу 80.05-30 з всережимним електронним регулятором частоти. Ступінь нерівномірності зовнішньої і часткових регуляторних гілок була однаковою, і дорівнювала 6 %.

Повна маса трактора зі встановленою на ньому додатковою вагою складала 9400 кг. Габаритні розміри трактора : висота 3,19 м; ширина 2,4 м.

Коробка передач механічна з гідравлічним управлінням, переключання без розриву потоку потужності.

Випробовування проводили на горизонтальній асфальтованій дорозі [103]. Для розгону вибрали спеціальну ділянку довжиною 50 м. Розгін дизеля на тракторі здійснювали на першій передачі з місця на другій транспортній швидкості з подальшим переключенням передач при русі до четвертої. Досягали максимальної швидкості 12 км/год на цій передачі. Режим вибрано із умови, що дизель розганяється до частот $1800 \dots 1850 \text{ хв}^{-1}$.

Було виконано 11 заїздів в одному напрямі. Проводили цифровий запис параметрів САРЧ дизеля і трактора. Було вибрано 5 результатів, для яких розгін трактора до 12 км/год зайняв в середньому 30 м. На рис. 5.21. показано цифровий запис частоти обертання колінчастого вала дизеля 8Ч13/14 при переключенні передач. Вибраний графік зміни частоти обертання найбільше співпадає із заїздом на ділянці розгону трактора в 30 м.

На рис. 5.22 показано фрагмент обробленого цифрового запису перехідних процесів в електронній САРЧ дизеля при включенні і подальшому розгоні трактора на першій передачі.

Розраховані криві n_{Π} і φ_P^I - це теж результати цифрового запису, які прораховує мікроконтролер САРЧ без урахування інерційності КТЗ і особливостей переключання передач. Результати зіставлення фактичних і розрахункових значень електронної САРЧ були враховані при математичному моделюванні і увійшли в комплексний корегуючий коефіцієнт k_{Σ} .

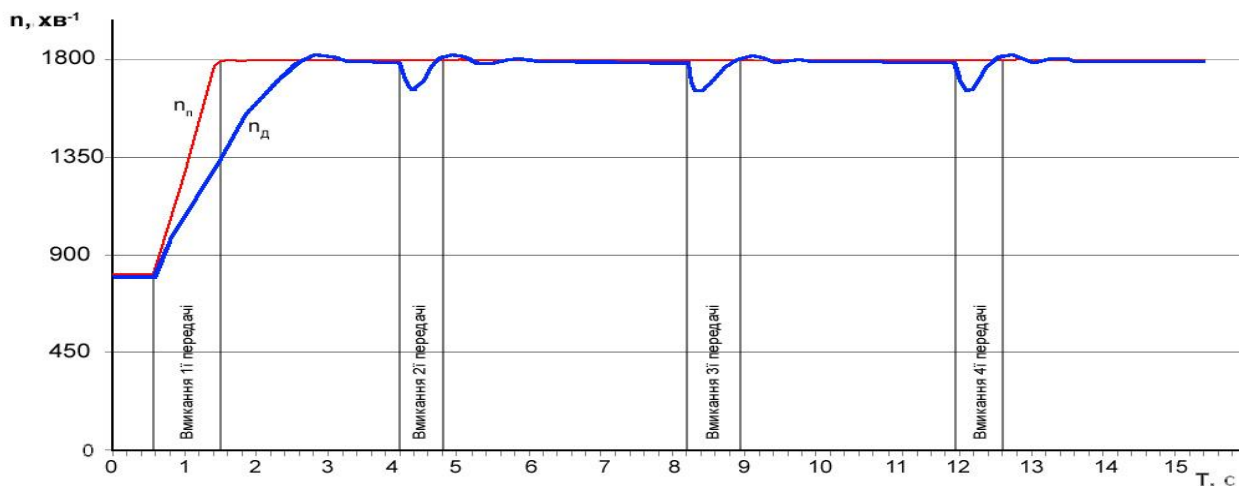


Рисунок 5.21 – Розгони дизеля 8Ч13/14 з переключанням передач на тракторі Т150К :

n_{Π} і n_{Δ} - задана і фактична частоти обертання колінчастого вала.

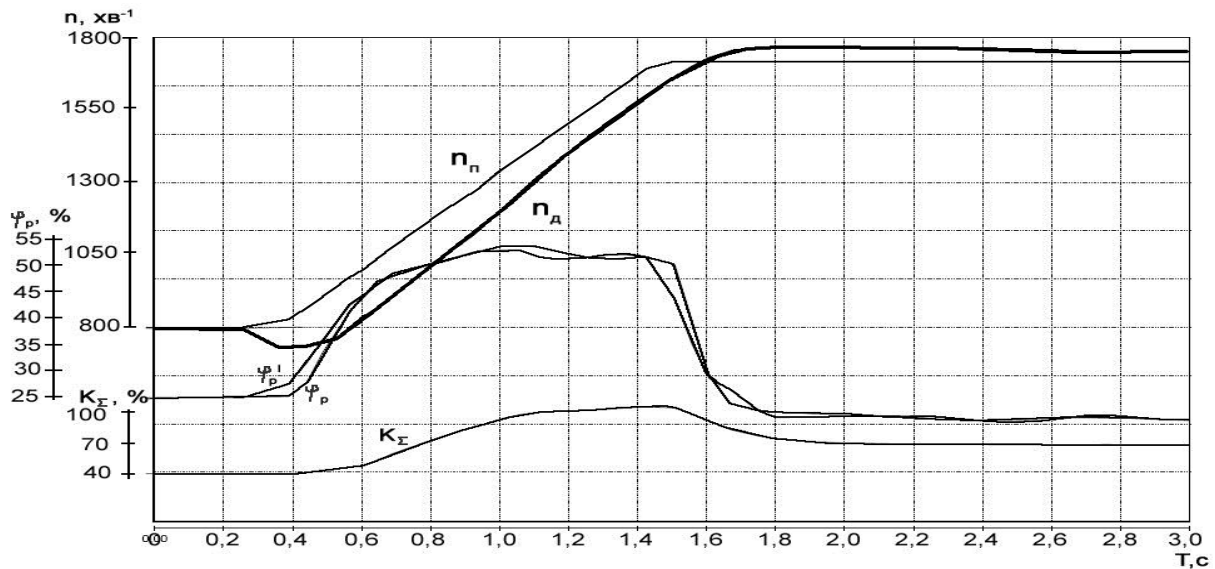


Рисунок 5.22 – Перехідні процеси в САРЧ дизеля 8Ч13/14 на тракторі Т150К при включенні і подальшому розгоні на першій передачі:

n_{Π} і n_{Δ} - задана і фактична частоти обертання колінчастого вала; φ_r^I і φ_r - задане і фактичне положення вала виконавчого механізму у відносних одиницях; K_{Σ} – сумарний корегуючий коефіцієнт настройки ПД-регулятора.

Показані на рис. 5.21 перехідні процеси САРЧ охоплюють швидкісний діапазон 800...1800 хв⁻¹. У цьому робочому діапазоні дизеля величини сумарних коефіцієнтів K_{Σ} електронний блок визначає методом інтерполяції за значеннями опорних точок, які були наведені в табл. 4.6.

На початковій стадії перехідного процесу незначне падіння частоти обертання пояснюється буксуванням зчеплення упродовж 0,35 с. Натискання на електронну педаль приводить до зростання значення n_{Π} частоти обертання, що задається. Електронний блок САРЧ реагує на це збільшенням заданого значення φ_r^I , положення вала виконавчого механізму. Під час перехідного процесу положення вала виконавчого механізму у відносних одиницях змінювалося від 20 до 53 %. Тривалість перехідного процесу склала 1,8 с. Сумарний корегуючий коефіцієнт K_{Σ}

змінився від 0,4 до 1,0. Показники якості перехідного процесу відповідають 1-у класу точності САРЧ дизеля за ГОСТ 10511-83.

Висновки до розділу 5

1. Обґрунтовано необхідність різних налаштувань ПІД-параметрів за різних режимів роботи дизеля. Встановлено, що робота на низьких частотах обертання потребує малих значень П-складової в той час коли робота за номінального режиму потребує збільшення значення П-складової для стабільної роботи дизеля.
2. В результаті моторних випробувань отримано підтвердження зростання вібрацій дизеля на частотах обертання близьких до номінальних. Отримані данні підтверджують необхідність врахувати при математичному регулюванні і налаштуванні ПІД-параметрів вплив вібрацій на роботу САРЧ.
3. Проведено порівняльний аналіз результатів моторних досліджень дизеля з механічним регулятором, ЕВР та електронним дворежимним регулятором. Результати аналізу показують задовільну роботу електронного всережимного регулятора на різних статичних та динамічних режимах та підтверджують необхідність налаштування ПІД-параметрів та комплексного корегуючого коефіцієнту k_z в залежності від режиму роботи дизеля. Закидання частоти обертання під час перехідного процесу електронного всережимного регулятора склало 1,3 % та на механічному регуляторі 2,3 %. Час перехідного процесу склав в обох випадках 0,7 с.
4. Встановлено, що стабільність підтримання частоти обертання $\delta_{ст}$ розробленим електронним всережимним регулятором за різних уставлених швидкісних режимах не перевищує 5 %. Це не гірше, ніж при використанні механічного регулятора та дворежимного електронного регулятора.
5. Розроблена методика налаштування ПІД-параметрів підтверджена результатами дорожніх випробувань.

ВИСНОВКИ

В дисертаційному дослідженні вирішена актуальна науково-техічна задача налаштування електронного всережимного регулятора швидкості автотракторного дизеля, обґрунтовано вибір раціональних ПД-складових з урахуванням якості перехідних процесів, паливної економічності і вібраційних збурень.

1. На підставі літературних джерел щодо САРЧ дизелів різних видів проаналізовано функціональні переваги і недоліки кожної, розроблено структурну і функціональну схеми електронного регулятора дизеля, що корегує ПД-параметри за частотою обертання колінчастого вала і за положенням рейки ВМ.
2. Розроблено і випробувано експериментальний зразок всережимного МР з ПД-управлінням і електромеханічним ВМ, що забезпечує момент 1,4 Н·м при 36 ° повороту вала і відсутності редуктора. Обґрунтовано мінімальну кількість АЦП та цифрових входів мікропроцесорного блоку – не менше 4-х аналогових та 4-х цифрових входів.
3. Розроблено алгоритм розрахунку циклової подачі палива при всережимному регулюванні для математичної моделі електронної САРЧ дизеля з всережимним регулюванням, який враховує динамічне моделювання ВМ, ПД-алгоритм регулювання циклової подачі палива, підтримання кута нахилу регуляторної гілки та відтворення впливу вібрацій дизеля на роботу системи. Підтверджено адекватність математичної моделі в статичі і динаміці.
4. Розроблено експериментально-розрахункову методику досліджень з визначення раціональних ПД-параметрів з урахуванням умов експлуатації автотракторного дизеля, яка була підтверджена безмоторними і моторними дослідженнями на автомобільному дизелі 4ЧН12/14.

Результатом досліджень став 3-х вимірний масив значень запропонованого K_{Σ} комплексного корегуючого коефіцієнта ПД-складових МР.

5. В процесі досліджень встановлено зростання вібрацій дизеля на частотах обертання колінчастого вала $\bar{n} = 0,9 \dots 1,06$. За цих значень ($\bar{n} = 0,9 \dots 1,06$) необхідно збільшувати П-складову для забезпечення стабільності роботи дизеля. Для дизеля 4ЧН12/14 П-складову необхідно збільшувати в 2,5 рази при ступені нерівномірності регулятора $0 \dots 6 \%$.
6. Рекомендовано після безмоторних випробувань виконати корекцію ПД-складових на дизелі в діапазонах $\bar{n} = 0,5 \dots 0,9$ і $0,9 \dots 1,06$ відносних частот обертання колінчастого вала, зменшивши запропонований комплексний корегуючий коефіцієнт K_{Σ} з 5% до 2% відповідно. Розроблена методика налаштування ПД-параметрів підтверджена результатами дорожніх випробувань.
7. Визначено, що зростання витрати палива зі збільшенням зовнішніх вібрацій нелінійне. За зовнішніх вібрацій рейки ПНВТ з амплітудою $1 \dots 3$ мм зменшення І-складової приводить до зменшення витрат палива. За результатами моделювання перехідних процесів отримана економія палива в розмірі $2,25 \%$. Розроблений всережимний регулятор відповідає першому класу точності САРЧ.
8. Результати дисертаційної роботи впроваджені при виконанні науково-дослідних робіт в Інституті газу НАН України. Методика налаштування ПД-параметрів мікропроцесорного регулятора швидкості прийнята до використання в компанії ТОВ «Мотортех» (м.Первомайськ).

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Крутов В.И. Двигатель внутреннего сгорания как регулируемый объект / В.И. Крутов — М.: Машиностроение, 1978. — 472 с.
2. Пинский Ф.И. Электронное управление впрыскиванием топлива в дизелях. Учебное пособие / Ф.И. Пинский — М.: Легион-Автодата, 1989. — 146 с.
3. Крутов В.И. Автоматическое регулирование двигателей внутреннего сгорания / В.И. Крутов — М.: Машиностроение, 1979. — 615 с.
4. Эпштейн А.С. Методика расчета переходных процессов в системе автоматического регулирования частот вращения и мощности тепловозного дизель-генератора / А.С. Эпштейн, П.М. Канило, И.Д. Долгих // Двигатели внутреннего сгорания. — 1976. — Вып. 23. — С. 62–68.
5. Грунауэр А.А. Методика расчета САР частоты вращения и нагрузки с импульсом по давлению наддува / А.А. Грунауэр, И.Д. Долгих, С.И. Тараканов, И.Н. Митин // Двигатели внутреннего сгорания. — 1980. — Вып. 32. — С. 61–67.
6. Ефимов С.И. Двигатели внутреннего сгорания: Системы поршневых и комбинированных двигателей / С.И. Ефимов, Н.А. Иващенко, В.И. Ивин и др.; 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Машиностроение, 1985. — 456 с.
7. Долганов К.Є. Автоматичне регулювання двигунів внутрішнього згоряння: навч. посібник / К.Є. Долганов, А.А. Лісовал — К.: НТУ, 2003. — 138 с.
8. Грехов Л.В. Топливная аппаратура и системы управления дизелей: Учебник для ВУЗов./ Л.В. Грехов, Н.А. Иващенко, В.А. Марков — М.: «Легион-Автодата», 2005. - 344 с.
9. Головчук А.Ф. Системы питания дизелей типа СМД/ А.Ф. Головчук, А.П. Строков — Д. : Пороги, 1996. — 170 с.
10. Долганов К.Е. Дорожные испытания трактора Т-150К с ограничителем дымления / К.Е. Долганов, А.Ф. Головчук, Н.И. Самусь // Двигателестроение. — 1980. — №11. — С. 44–46.

11. Ждановський Н.С. Режимы работы двигателей энергонасыщенных тракторов / Н.С. Ждановський, А.В. Николаенко, В.С. Шкрабак и др. – Л.: Машиностроение, 1981. – 240 с.

12. Блаженев Е.И. Работа системы автоматического регулирования дизеля КамАЗ-740 с двухрежимным регулятором / Е.И. Блаженев, Ю.Е. Хрящев, О.З. Щур и др. // Автомобильная промышленность. – 1985. - №3. – С. 6-7.

13. Ленин И.М. Автомобильные и тракторные двигатели. Ч.1.// И.М. Ленин, А.В. Костров, О.М. Малашкин, И.Я. Райков, Г.И. Самоль — Высшая школа, 1976.

14. Долганов К.Е. Двухрежимный регулятор роторного топливного насоса / К.Е. Долганов, В.Г. Ляковский, А.А. Лисовал // Матер. міжнародної н.-т. конф. [«Проблеми транспорту та шляхи їх вирішення»]. – 12-13 червня, Київ, УТУ, 1997. – С. 106–107.

15. Лисовал А.А. Улучшение статических и динамических показателей системы автоматического регулирования частоты вращения (САРЧ) дизель-электрического агрегата применением параллельного корректирующего устройства с электронным блоком управления: Автореф. дис....канд. техн. наук, Харьков, 1991.- 24с.

16. Долганов К.Е. Улучшение статических и динамических показателей САРЧ дизелей с обычными регуляторами прямого действия / К.Е. Долганов, С.А. Ковалев, М.Ю. Сережко, И.В. Грицук - КАДИ.- К., 1987.-30 с.- Деп. в УкрНИИНТИ 26.06.87, №1737- Ук87.

17. Попов Е.П. Автоматическое регулирование и управление. – М.: Наука, 1966. - 388 с.

18. Иващенко Н.Н. Автоматическое регулирование.- М.: Машиностроительное, 1973.- 606 с.

19. Герасимов С.Г. Введение в теорию непрерывного регулирования с регулирующим импульсом по параметру и его производной. Автоматизация тепловых процессов, Труды МЭИ, Госэнергоиздаг- 1948 г.

20. Хисаев И.А. Исследование возможности улучшения динамических свойств участка регуляторной ветви дизеля мобильной машины. Канд. дисс. Челябинск 1972.

21. Пат. № 669425, МПК F02D 31/00. Гидравлический регулятор числа оборотов двигателя внутреннего сгорания / К.Е. Долганов, А.Г. Маевский, С.И. Андрусенко - №а669425/24-6; заявл. 07.06.1960, Бюл.№20; опубл. 01.01.1968, Бюл. №20.

22. Долганов К.Е. Особенности статики гидравлического регулятора с грузовым центробежным чувствительным элементом / К.Е. Долганов // Труды ЦНИТА. – Л.: ЦНИТА. – 1966. – Вып. 31. – С. 35–48.

23. Дизельные и газовые двигатели: каталог. – С.-Петербург: ЦНИДИ. – 2000.–227 с.

24. Ефимов С.И. Двигатели внутреннего сгорания: Системы поршневых и комбинированных двигателей / С.И. Ефимов, Н.А. Иващенко, В.И. Ивин и др.; 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Машиностроение, 1985. — 456 с.

25. Крутов В.И. Автоматическое регулирование и управление двигателей внутреннего сгорания / В.И. Крутов: учебник для студ. вузов, обучающихся по специальности «Двигатели внутреннего сгорания». – [5-е изд., перераб. и доп.]. – М.: Машиностроение, 1989. – 16 с.

26. Шеховцов А.Ф. Компьютерные системы управления ДВС: уч. пособие / А.Ф. Шеховцов. — Харьков: ХГПУ, 1995. — 256 с.

27. Презентация фирмы “Роберт Бош ГмбХ”. Актуальные вопросы создания топливоподающих систем транспортных дизелей // Матер. науч.-техн. конф., посв. 30-летию ЯЗДА. — Ярославль, 2002. — С. 19 — 33.

28. HEINZMANN Цифровые регуляторы скорости. Базовая система PANDAROS — К.: DG66-105, 1998. — 9 с.

29. Новые разработки фирмы Bosch. Автостр. За рубежом. 2007, №1, с.8, рис.

30. Mayer Hans W. Перспективы применения дизелей в будущем. Erstickt der Diesel an künftigen Abgasnormen? Mayer Hans W. AMZ: Auto, Mot., Zubehor. 2006. 94, #10, стр.32.

31. Система управления двигателя с турбонаддувом. Turbocharged engine control system: Пат 7043900 США, МПК7 F 01 N 5/04. Nissan Motor Co., Ltd, Shirakawa Takashi, Sakai Makoto. #10/886658; Заявл. 09.07.2004; Опубл. 16.05.2006; Приор. 31.07.2003, №2003-284235 (Япония); НПК 60/280. Англ.

32. Bellinger Steven M. Система автоматического управления двигателем и трансмиссией автомобиля. System for controlling drivetrain components to achieve full efficiency goals: Пат 6957139 США, МПК7 T 7/12 Cummins Inc., Bellinger Steven M. #10/364263; Заявл 11.02.2003; Опубл. 18.10.2005; НПК 701/104. Англ.

33. Лісовал А.А. Експериментальний дворезимний мікропроцесорний регулятор для автомобільного дизеля / А.А. Лісовал, С.В. Костриця // Автошляховик України. Окремий вип. Вісник ЦНЦ ТАУ. — №12. — 2009. — С. 141 — 144.

34. Король С.А., Особенности автоматического регулирования топливным насосом с неравномерно вращающимся кулачковым валом. // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. / С.А. Король, А.Л. Григорьев – Харьков: ХГПУ, 1999. – Вып. 29. – С. 71-75.

35. Прохоренко А.А. Основы подхода к разработке конструкции и принципа управления ТНВД аккумуляторной топливной системы отечественного дизеля / А.А. Прохоренко, А.Н. Врублевский, А.В. Грицюк, Г.А. Щербаков // Двигатели внутреннего сгорания. — №1. — 2010. — С. 12 — 17.

36. Богаевский А.Б. Метод определения оптимальных характеристик нагружения для микроконтроллерных регуляторов транспортных дизель-электрических установок// Праці Луганського відділення Міжнарод. акад. інформатизації. Науч. журн. №2, 2004.-с. 52-55.

37. Лісовал А.А. Виконавчі механізми для електронних регуляторів паливних насосів високого тиску дизелів / А.А. Лісовал, С.В. Костриця, О.В. Вербовський // Автошляховик України. — №4. — 2009. — С. 23.

38. Лісовал А.А. Виконавчі механізми для електронних регуляторів паливних насосів високого тиску дизелів (продовження) / А.А. Лісовал, С.В. Костриця, О.В. Вербовський // Автошляховик України. — №5. — 2009. — С. 18-20.

39. Лісовал А.А. Микропроцессорный регулятор дизеля и расчёт цикловой подачи топлива / А.А. Лісовал, С.В. Костриця, О.В. Вербовський // Двигатели внутреннего сгорания. — №2. — 2010. — С. 63-67.

40. Настройка электронного регулятора дизеля / Лісовал А.А., Вербовський О.В. // Автоматизация судовых технических средств: наук.-техн. зб. — 2013. — Вип. 19.— Одеса: ОНМА. — С. 49-54.

41. Лісовал А.А. Микропроцессорный регулятор автомобильного дизеля / А.А. Лісовал, С.В. Костриця, О.В. Вербовський // Systems and means of motor transport. Politechnika Rzeszowska, Poland. — №1. — 2010. — С. 157-160.

42. Лісовал А.А. Виконавчі механізми для електронного регулятора дизеля / А.А. Лісовал, С.В. Костриця, О.В. Вербовський // Матеріали III-ої всеукраїнської науково-технічної конференції сучасні проблеми двигунобудування: стан, ідеї, рішення. — Первомайськ: ППІ НУК, 2009. — С. 231 - 236.

43. Лісовал А.А. Всережимный электронный регулятор дизеля колесного транспортного средства / А.А. Лісовал, О.В. Вербовський — Двигуни внутрішнього згоряння, №1, 2012 – С. 49-52.

44. Лісовал А.А. Математична модель електронного всережимного регулятора з ПНВТ дизеля / А.А. Лісовал, О.В. Вербовський // Тези доповідей LXVIII науково-практичної конференції науково-педагогічних працівників, аспірантів, студентів та структурних підрозділів університету.-К: НТУ, 2012р.

45. Лісовал А.А. Безмоторні випробування складових елементів електронного регулятора на базі регулятора фірми Heinzmann/ А.А. Лісовал, О.В. Вербовський // Тези доповідей LXIV науково-практичної конференції науково-педагогічних працівників, аспірантів, студентів та структурних підрозділів університету.-К: НТУ, 2008р.

46. Гутаревич Ю.Ф. Снижение вредных выбросов автомобиля в эксплуатационных условиях / Гутаревич Ю.Ф. – К.: Вища шк., 1991. – 179 с.

47. Говорун А.Г. Результаты полевых випробувань трактора МТЗ-80 з різними способами регулювання дизеля / А.Г. Говорун, А.О. Корпач, М.О. Сельский, П.В. Куций // Вісті Автомобільно-дорожнього інституту : наук.-вироб. зб. / Автомобільно-дорожній ін-т Донец. нац. техн. ун-ту. – Горлівка: 2010 №1 (10), с. 110-115.

48. Андрусенко П.И. Теория и исследование новой системы топливоподачи для тракторных двигателей: дис. д-ра техн. наук: 05.04.02. / Андрусенко Петр Иванович. – К., 1954. – 538 с.

49. Каньковский И.Е. Повышение эксплуатационной топливной экономичности тракторного дизеля путём применения универсального однорежимно-всережимного регулятора: дис. канд. техн. наук.: 05.04.02. / Каньковский Игорь Евгениевич. – К., 1987. – 377 с.

50. Жерновой А.С. Улучшение экономических и экологических показателей автомобильного дизеля совершенствованием способа регулирования: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.04.02. “Тепловые двигатели” / А.С.Жерновий – Харьков, 1985. – 24 с.

51. Захарчук В.И. Улучшение эксплуатационных показателей колёсного трактора при выполнении транспортной работы применением универсального регулятора: дисс. ...канд. техн. наук.: 05.22.20 / Захарчук Виктор Иванович. – К., 1996. – 217 с.

52. Лясковський В.Г. Розробка і дослідження дворежимного регулятора для дизеля середньої потужності з роторним паливним насосом: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.04.02. “Теплові двигуни” / Лясковський В.Г. – К., 2001. – 20 с.

53. Головчук А.Ф. Дослідження універсального регулятора колісних тракторів / А.Ф. Головчук, А.В. Садовников, Р.М. Харак // Матеріали міжнародної науково-практичної конференції. – Дніпропетровськ: ЕНЕМ. – 2004.– С. 53-54.

54. Блаженнов Е.И. Совершенствование системы автоматического регулирования частоты вращения автомобильных дизелей: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.04.02. “Тепловые двигатели” / Е.И.Блаженнов / – М., 1987. – 31с.

55. Шестухин В.И. Исследование влияния параметров топливной аппаратуры на работу дизеля в условиях неустановившейся нагрузки: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.04.02. “Тепловые двигатели” / Шестухин В.И. – М., 1984. – 16 с.

56. Експериментальні дослідження механічного регулятора паливного насосу 4 утн-м, з параметрами, що забезпечують зміну принципу регулювання двигуном / А.Г. Говорун, М.В. Павловський, П.В. Куций // ВІСНИК ЖДТУ. 2014. № 2 (69). – С. 81–84.

57. С.В. Костриця Вибір раціональних параметрів і розробка електронного регулятора частоти обертання дизеля: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.05.03. “Теплові двигуни і енергетичні установки” / С.В. Костриця – М., 2014. – 22 с.

58. Попович О.М. Моделі та методи для комплексного дослідження та проектування електромеханічних систем / О.М. Попович, О.В. Бібік, Ю.В. Шуруб, І.В. Головань // Праці ІЕД НАНУ. – 2006. – № 2(14). – С. 68-71.

59. Литвинов В.А. Особенности разработки электромагнитного исполнительного органа для систем автоматического регулирования / В.А. Литвинов, А.Ю. Хандогин, А.И. Гришин [и др.] // Вести Киевского политехн. ин-та. [Электроэнергетика]. – 1987. – Вып. 24. – С. 44–45.

60. Пересада С.М. Полупроводниковый регулятор частоты вращения двигателя внутреннего сгорания / С.М. Пересада, В.А. Литвинов, А.В. Лысенко [и др.] // Вести Киевского политехн. ин-та. [Электроэнергетика]. – 1982. – Вып. 19. –С. 30–31.

61. Великанов Д.П. Изучение эксплуатационных режимов работы автомобильного двигателя. / Д.П.Великанов, В.И.Бернацкий // Автомобильный транспорт. – 1960. – №4. – С. 40–44.

62. Яковлев В.Ф. Диагностика электронных систем автомобиля / В.Ф. Яковлев — М.: СОЛОН-Пресс, 2003. — 272 с.
63. Гук М. Аппаратные средства IBM PC: Энциклопедия. 2-е изд. — СПб.: Питер Ком, 2001.
64. Тюнин А.А. Диагностика электронных систем автомобиля / А.А.Тюнин — М.: СОЛОН-Пресс, 2008. — 352 с.
65. Эйкхофф Й. Бортовые компьютеры, программное обеспечение и полетные операции. Введение. / Й.Эйкхофф // М.:ТЕХНОСФЕРА – 2014. – 336с.
66. Автомобильный справочник Bosch — М.: Изд-во "За рулём", 1999. — 896 с.
67. Смирнов Ю.А. Электронные и микропроцессорные системы управления автомобилей / Ю.А. Смирнов, А.В.Муханов — М.: Лань, 2012. – 624 с.
68. Взоров Б.А. Тракторные дизели: справочник / Б.А. Взоров, А.В. Адамович, А.Г. Арабян и др. — М.: Машиностроение, 1981. — 535 с.
69. Лісовал А.А. Обґрунтування необхідності використання електронних регуляторів на автотракторних дизелях/ А.А. Лісовал, О.В.Вербовський //Тези доповідей LXIII науково-практичної конференції науково-педагогічних працівників, аспірантів, студентів та структурних підрозділів університету.-К: НТУ, 2007р.
70. Онищенко Г.Б. Электрический привод: учебник для студ. Высш. учеб. заведений / Г.Б. Онищенко – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 288 с.
71. Бесекерский В. А.Теория систем автоматического регулирования. Издание третье, исправленное. / В.А. Бесекерский, Е.П. Попов // Москва, издательство «Наука», Главная редакция физико-математической литературы, 1975 – 768 с.
72. Лісовал А.А. ПІД-параметри мікропроцесорного регулятора дизеля / А.А. Лісовал, О.В.Вербовський // Вісник КДПУ: Наук. праці, Кременчук, вип. 5/2008(52). Част. 2, 2008. – С. 112-114.

73. Лісовал А.А. Результати моторних досліджень для вибору раціональних параметрів регулювання мікропроцесорного регулятора дизеля / А.А. Лісовал, О.В.Вербовський // «Збірник наукових праць 2-ї щорічної міжвузівської науково-технічної конференції» м.Донецьк 2010р.

74. Математична модель електронного всережимного регулятора з ПНВТ дизеля / Лісовал А.А., Вербовський О.В. // Тези доповідей LXVIII науково-практичної конференції науково-педагогічних працівників, аспірантів, студентів та структурних підрозділів університету.-К: НТУ, 2012р.

75. Дьяченко В.Г. Теория двигателей внутреннего сгорания. Учебник - Харьков: ХНАДУ, 2009. - 500 с.

76. Ютт В.Е. Электронные системы управления ДВС и методы их диагностирования: Учебное пособие для вузов/ В.Е. Ютт, Г.Е. Рузавин // «Горячая линия – Телеком», 2007. – 104 с.

77. HEINZMANN «Цифровые регуляторы скорости» — К.: DG 95-105, 1997. — 49 с.

78. HEINZMANN «Базовая цифровая система PANDAROS II» — К.: DG 95-105, 1997. — 51 с.

79. Prin Data 2005. Электронные блоки управления двигателем. Автомобили с бензиновым и дизельными двигателями с 1988 года./ Легион-Автодата, 2005. – 1562 с.

80 Лісовал А.А. Математичне моделювання автоматичної системи управління автотракторним дизелем / А.А.Лісовал, О.В.Вербовський // Управління проектами, системний аналіз і логістика,– Наук.журнал: в 2ч. –Ч.1.– Серія «Технічні науки».– К: НТУ.– 2014.– Вип.14. – С.109–114

81. Лісовал А.А. Безмоторні випробування складових елементів електронного регулятора на базі регулятора фірми Heinzmann/ А.А. Лісовал, О.В. Вербовський // Тези доповідей LXIV науково-практичної конференції науково-педагогічних працівників, аспірантів, студентів та структурних підрозділів університету.-К: НТУ, 2008р.

82. Лісовал А.А. ПІД-параметри мікропроцесорного регулятора дизеля / А.А. Лісовал, О.В. Вербовський // Матеріали III-ої всеукр. наук.-техн. конф. «Сучасні проблеми двигунобудування», м. Первомайськ, 2009, – С.48-50.

83. Лісовал А.А. Дослідження і настройка електронного регулятора Henzmann / А.А. Лісовал, О.В. Вербовський // LXX наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та працівників відокремлених структурних підрозділів університету. Тези доповідей.- К.: НТУ, – 2014.

84. Лісовал А.А. Моделирование работы электронного ПИД-регулятора скорости двигателя внутреннего сгорания / А.А.Лісовал, О.В. Вербовський, Ю.А. Свистун // Двигатели внутреннего сгорания. — №2. — 2016. — С. 51-54.

85. Курманов В.В. Электронные системы управления подачей топлива в дизелях: Обзорная информация / В.В. Курманов, М.В. Мазинг, В.К. Горбаченко — М.: ЦНИИЕЭИавтопром, 1989. — 51 с.

86. HEINZMANN «Базовая информация по цифровому управлению» — К.: DG 95-105, 1997. — 72 с.

87. Пересада С.М. Электромагнитный привод для подачи топлива в двигатель внутреннего сгорания / С.М. Пересада, Б. Винклер // Вести Киевского политехн. ин-та. — №20. — 1983. — С. 53 — 56.

88. Лісовал А.А. Визначення апроксимуючих залежностей характеристик дизеля СМД-23.07 для диференціального рівняння руху двигуна / А.А. Лісовал, М.І. Гуменчук // Вісник Кременчуцького держ. політех. у-ту. – Кременчук: КДПУ. – 2004. – Вип.4/2004(27). – С. 116–118.

89. Системы впрыскивания топлива фирмы Бош для экологически совместимых дизельных двигателей — Штутгарт: Производственный отдел К5, 1994. — 46 с.

90. Долганов К.Е. Система питания и регулирования для автомобильного газодизеля / К.Е. Долганов, Ю.П. Майфет, И.С. Вознюк, А.А. Лісовал, С.В. Костриця. // Экотехнологии и ресурсо-сбережение. — №5. — 2004. — С. 66 — 69.

91. Дорф Р. Современные системы управления / пер. Б.И. Копытова — М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2004. — 832 с.
92. Харбор Р. Системы управления с обратной связью / Харбор Р. Филлипс Ч. — М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2001. — 616 с.
93. Онищенко Г.Б. Электрический привод: учебник для студ. высш. учеб. заведений / Г.Б. Онищенко — М.: Издательский центр «Академия», 2006. — 288 с.
94. Лисовал А.А. Моделирование цифровой системы регулирования скорости автотранспортного дизеля / А.А. Лисовал, С.В. Кострица, О.В. Вербовский // Матеріали III-ої всеукраїнської науково-технічної конференції сучасні проблеми двигунобудування: стан, ідеї, рішення. — Первомайськ: ППІ НУК, 2011. — С. 214-216.
95. Вербовський О.В. Моделювання всережимного електронного регулятора швидкості дизеля/ Свідectво про реєстрацію авторського права на твір № 58166 від 20.01.2015 р.
96. Лісовал А.А. Корегуючий коефіцієнт ПД-параметрів мікропроцесорного регулятора дизеля / А.А. Лісовал, О.В. Вербовський // Systems and means of motor transport. Politechnika Rzeszowska, Poland, 2011. С. 167-170.
97. Chowanietz E. Automobile electronics - Society of Automotive Engineers // E. Chowanietz. — 1995. — С. 246.
98. Галушко В.Г. Вероятностно-статистические методы на автомобильном транспорте / В.Г. Галушко — К.: Вища школа, 1976. — 232 с.
99. Рафалес-Ламарка Э.Э. Некоторые методы планирования и математического анализа биологических экспериментов / Э.Э. Рафалес-Ламарка, В.Г. Николаев. — К.: Наук. думка, 1971. — 119 с.
100. Таблицы планов экспериментов для факторных и полиномиальных моделей: справочное пособие / Под ред. Налимова В.В. — М.: Металлургия, 1982.— 752 с.
101. Лисовал А.А. Результати досліджень на математичній моделі дизеля з електронним регулятором / А.А. Лисовал, С.В. Кострица, А.В. Вербовський // LXIX

Науково-практична конференція науково-педагогічних працівників, студентів та структурних підрозділів університету. — К.: НТУ, — 2013. — С. 21.

102. Лісовал А.А. Когенераційна установка з газовим двигуном / Лісовал А.А., Нижник М.Є., Вербовський О.В.. / Водний транспорт: зб. наук. праць — 2013. — Вип. 3 (18).— К.: КДАВТ. — С. 51–55

103. Лісовал А.А. Проверка адекватности математической модели системы автоматического регулирования дизеля / А.А. Лісовал, С.В. Костриця, О.В. Вербовський // Двигатели внутреннего сгорания. — №2. — 2011. — С. 64-69.

104. Иванов В. Н. Влияние режимов движения автомобиля на выброс вредных веществ / В. Н. Иванов, В. И. Ерохов // Автомобильный транспорт. — 1979. — № 9. — С. 46 – 48.

105. Гарбер А.З. Составление модели режимов движения городских автобусов на основе натуральных испытаний / А.З.Гарбер, П.Д.Лупачев, Ж.Г.Манусаджянц // Повышение эффективности мероприятий по снижению вредных воздействий от автомобильного транспорта. — М.: 1982. — С. 43 – 55.

Додаток А

Розшифровка написів рисунку 2.5 (Структурна схема електронного блоку керування Pandaros)

Window – вікно;

Function – функція;

Up – вгору;

Down – вниз;

INC – збільшення;

DEC – зменшення;

Enter – вод;

LCD-Display – РК-дісплей;

Integrated hand programmer – інтегрований ручний програматор;

Switch inputs – вхід перемикачів;

Analogue setpoint adjuster – аналогове налаштування базових точок;

Analogue synchronizer – аналогова синхронізація;

Analogue load measuring unit – аналоговий пристрій вимірювання навантаження;

Failure lamp – індикатор несправності;

Interface RS-232 – інтерфейс RS-232;

24V power supply – живлення (24В);

MicroController – мікроконтролер;

DC/DC – перетворювач DC/DC;

Watchdog – режим «Watchdog»

EEP-ROM – підключення зовнішньої постійної пам'яті;

DC-6 Board – блок DC-6;

Speed sensor – датчик частоти обертів колінчастого вала;

Pressure sensors – датчик тиску;

Temperature sensor – датчик температури;

Actuator position sensing – зворотні зв'язок ВМ;

Actuator drive – живлення двигуна ВМ;

Перв. застосування

6,3

A-A (1 : 1)

H14 h14, ±IT14/2

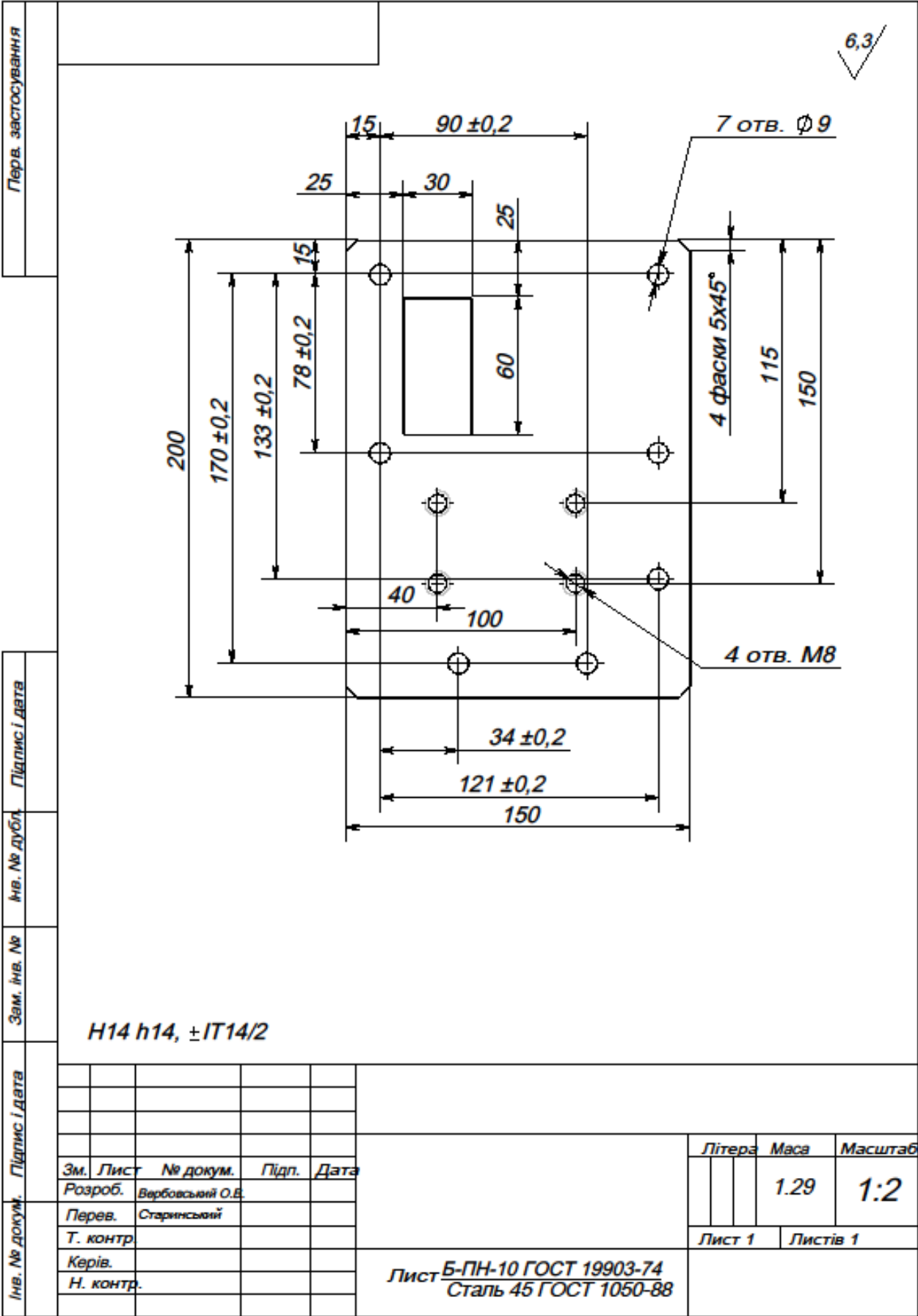
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата
Розроб.		Вербовий О.В.		
Перев.		Старинський Ю.В.		
Т. контр.				
Керів.				
Н. контр.				

Шестерня

Сталь 45

Літера	Маса	Масштаб
	1.49	1:2
Лист 1		Листів 1

Перв. застосування										
Зам. інв. №	Інв. № дубл.	Підпис і дата	1. *Размеры для справок 2. H14 h14, ±IT14/2 23 Детали 1 и 2 варить по контуру прилегания сварочным швом катетом 3							
Інв. № докум.	Підпис і дата	Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата	Стойка	Літера	Маса	Масштаб
									1.12	1:2
Інв. № докум.	Підпис і дата	Розроб.	Вербовський О.В.				Складальне креслення	Лист 1	Листів 1	
		Перев.	Старинський Ю.В.							
		Т. контр.								
		Керів.								
		Н. контр.								



Значення вхідних даних математичної моделі САРЧ двигуна СМД-23.07

Vibr – 0,2

Nagruzka/constant – 1,25

Diesel/constant1 – 1600

Diesel/constant2 – $8 \cdot 10^{-5}$

Diesel/constant3 – 3000

Diesel/constant4 – 680,04

Diesel/constant5 – 120

Diesel/constant6 – 3600

Diesel/constant6 – 1,5

TNVD/constant1 – 0,95

TNVD/constant2 – $0,823 \cdot 10^{-6}$

reg/constant1 – 0,95

reg/angle – 0,06

reg/hpmax – 8

reg/constant1 – 0,95

$a_{Д1}$: -283,33

$a_{Д2}$: $94,25 \cdot 10^5$

$a_{Д3}$: $0,96767 \cdot 10^{-3}$

$a_{Д4}$: 0,395

$a_{Д5}$: $1,7812 \cdot 10^{10}$

$a_{Д6}$: $0,28522 \cdot 10^{-8}$

$a_{Д7}$: $0,1375 \cdot 10^{-3}$

$a_{Д8}$: $0,23438 \cdot 10^2$

$a_{Д9}$: 1750

$a_{Д10}$: $0,66964 \cdot 10^{-7}$

УКРАЇНА



• УКРАЇНА • **ДЕРЖАВНА СЛУЖБА** • УКРАЇНА • **ВЛАСНОСТІ УКРАЇНИ** • УКРАЇНА •
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ

СВІДОЦТВО
про реєстрацію авторського права на твір

№ 58166

Науковий твір "Моделювання всережимного електронного регулятора швидкості дизеля"

(вид, назва службового твору)

Автор(и) **Вербовський Олексій Валерійович**

(повне ім'я, псевдонім (за наявності))

Авторські майнові права належать **Вербовський Олексій Валерійович, вул. Суворова, 1, м. Київ, 01010; Національний транспортний університет, вул. Суворова, 1, м. Київ, 01010**

(повне ім'я фізичної та/або повне офіційне найменування юридичної особи, адреса)

20.01.2015

Дата реєстрації



Голова Державної служби інтелектуальної власності України

А.Г.Жарінова

Додаток Д

Цифровий запис роботи електронної всережимної САРЧ, встановленої на дизелі

СМД-23.07

[RecordingStart]

0

[Parameter]

"Speed","1/min",0,2000,-40000,44000,"0.0"

"SpeedSetp","1/min",0,2000,-40000,44000,"0"

"ActPos","%",0,100,-1000,1100,"0.0"

"ActPosSetpoint","%",0,100,-1000,1100,"0.0"

[Data]

0,000	0	0	0,98115510795758	2,99992370489052	34,9980
0,337	0	0	0,98115510795758	2,99992370489052	34,9980
0,337	0	0	0,964370183871214	2,99992370489052	34,9980
0,377	0	0	0,997940032043946	2,99992370489052	34,9980
0,417	0	0	0,98115510795758	2,99992370489052	34,9980
0,457	0	0	0,98115510795758	2,99992370489052	34,9980
0,497	0	0	0,964370183871214	2,99992370489052	34,9980
0,557	0	0	0,98115510795758	2,99992370489052	34,9980
0,607	0	0	0,997940032043946	2,99992370489052	34,9980
0,667	0	0	0,964370183871214	2,99992370489052	34,9980
0,717	0	0	0,964370183871214	2,99992370489052	34,9980
0,797	0	0	0,98115510795758	2,99992370489052	34,9980
0,847	0	0	0,964370183871214	2,99992370489052	34,9980
0,907	0	0	0,997940032043946	2,99992370489052	34,9980
0,958	0	0	0,997940032043946	2,99992370489052	34,9980
1,038	0	0	0,964370183871214	2,99992370489052	34,9980
1,088	0	0	0,98115510795758	2,99992370489052	34,9980
1,148	0	0	0,997940032043946	2,99992370489052	34,9980
1,199	0	0	0,964370183871214	2,99992370489052	34,9980
1,278	0	0	0,997940032043946	2,99992370489052	34,9980
1,320	0	0	0,98115510795758	2,99992370489052	34,9980
1,388	0	0	0,98115510795758	2,99992370489052	34,9980
1,439	0	0	0,997940032043946	2,99992370489052	34,9980
1,498	0	0	0,964370183871214	2,99992370489052	34,9980
1,548	0	0	0,964370183871214	2,99992370489052	34,9980
1,640	0	0	0,997940032043946	2,99992370489052	34,9980
1,679	0	0	0,964370183871214	2,99992370489052	34,9980
1,759	0	0	0,964370183871214	2,99992370489052	34,9980
1,800	0	0	0,964370183871214	2,99992370489052	34,9980
1,869	0	0	0,98115510795758	2,99992370489052	34,9980
1,949	0	0	0,964370183871214	2,99992370489052	34,9980
1,999	0	0	0,997940032043946	2,99992370489052	34,9980
2,040	0	0	0,997940032043946	2,99992370489052	34,9980
2,109	0	0	0,964370183871214	2,99992370489052	34,9980
2,190	0	0	0,947585259784848	2,99992370489052	34,9980
2,239	5,12703135729	0	0,701915007248035	2,99992370489052	
2,280	24,1702906843671	0	2,12863355458915	2,99992370489052	
2,350	50,2937361715114	800	19,0508888380255	50,0007629510948	
2,430	77,8210116731517	800	62,0752269779507	50,0007629510948	
2,480	82,9480430304418	800	45,5970092317082	50,0007629510948	
2,521	83,4973678187228	800	48,4504463263905	50,0007629510948	
2,590	99,2446784161135	800	50,3349355306325	50,0007629510948	
2,670	109,19356069276	800	50,2693217364767	50,0007629510948	
2,713	125,368123903258	800	50,2037079423209	50,0007629510948	
2,750	131,41069657435	800	50,1380941481651	50,0007629510948	
2,810	153,261615930419	800	50,0892652780957	50,0007629510948	
2,873	176,821545738918	800	50,0724803540093	51,1192492561227	
2,910	187,563897154192	800	50,1716639963378	51,6792553597314	

Продовження додатоку Д

2,953	211,367971313039	800	50,3349355306325	52,5200274662394
2,991	226,626993209735	800	51,090257114519	53,0800335698482
3,051	257,87747005417	800	52,8603036545357	54,2000457770657
3,113	292,973220416571	800	54,3190661478599	55,3200579842832
3,151	305,91287098497	800	55,0911726558328	55,5992980849928
3,193	333,684290836957	800	55,6313420309758	55,5992980849928
3,231	380,437933928435	800	55,7961394674601	55,5992980849928
3,291	485,72518501564	800	54,2870222018769	42,928206301976
3,371	584,542610818646	800	27,5440604257267	26,9153887235828
3,421	604,623483634699	800	21,2481879911498	23,3844510566873
3,471	590,035858701457	800	21,4282444495308	23,8193331807431
3,531	569,222552834363	800	22,3956664377813	25,2704661631189
3,611	540,108339055467	800	26,8711375600824	28,2475013351644
3,662	520,210574502174	800	29,1172655832761	30,4875257495994
3,713	507,087815671016	800	31,3801785305562	32,6070038910506
3,772	487,983520256352	800	34,4472419317922	35,5397878995956
3,852	473,762111848631	800	38,3978027008469	38,7182421606775
3,902	475,654230563821	800	39,5788509956512	39,5635919737545
3,952	481,086442359045	800	40,0549324788281	39,5834287022202
4,012	487,312123292897	800	40,1693751430533	40,2273594262608
4,093	501,10627908751	800	40,3662165255207	39,7512779430838
4,142	506,172274357214	800	40,3662165255207	39,8123140306706
4,185	514,41214618143	800	40,3006027313649	39,4979781795987
4,252	527,473868925002	800	40,1861600671397	38,8372625314717
4,332	545,662623025864	800	38,956282902266	37,8332188906691
4,383	550,545510032807	800	38,2513160906386	37,8286411841001
4,425	552,132448310063	800	38,1368734264134	38,1597619592584
4,493	548,348210879683	800	38,1368734264134	39,1866941329061
4,573	547,127489127947	800	38,5137712672618	40,0808728160525
4,623	547,493705653468	800	39,1699092088197	40,503547722591
4,921	639,230945296407	800	34,8897535667964	33,2860303654536
4,921	678,294041351949	800	30,3318837262531	29,4850080109865
4,962	703,440909437705	800	28,5770962081331	27,0710307469291
5,011	716,319523918517	800	25,806057831693	25,9113450827802
5,061	717,479209582666	800	25,149919890135	25,8884565499352
5,141	707,103074692912	800	25,2643625543603	27,1015487907225
5,191	696,787975890745	800	25,6412603952087	28,2154573891814
5,271	680,613412680247	800	28,3634699015793	29,9931334401465
5,351	671,091783016709	800	30,6431677729458	31,3511863889525
5,394	668,772411688411	800	31,2825207904173	31,7509727626459
5,461	670,176241702907	800	32,0531013962005	32,0866712443732
5,511	673,899443045701	800	32,3979552910658	31,9233997100786
5,571	680,308232242313	800	32,3811703669795	31,5922789349203
5,622	682,627603570611	800	32,3476005188067	31,5617608911269
5,702	689,036392767224	800	32,2819867246509	31,2489509422446
5,752	693,797207598993	800	32,1507591363394	30,9773403524834
5,812	697,215228503853	800	31,9218738078889	30,8812085145342
5,862	703,013656824598	800	31,4625772487984	30,4814221408408
5,942	708,262760357061	800	30,5119401846342	30,1121538109407
6,022	713,572899977111	800	29,6421759365225	29,8374914168002
6,072	715,831235217823	800	29,5109483482109	29,7795071335927
6,132	716,624704356451	800	29,4789044022278	29,889372091249
6,182	717,112993057145	800	29,5277332722972	29,9778744182498
6,263	718,028534370947	800	29,7077897306783	30,1091020065614
6,312	717,479209582666	800	30,0038147554742	30,2861066605631
6,373	719,249256122682	800	30,429541466392	30,2861066605631
6,423	719,920653086137	800	30,4783703364614	30,3669794766155
6,503	721,38551918822	800	30,5119401846342	30,4234378576333
6,553	724,98664835584	800	30,5287251087205	30,2037079423209

НАЦІОНАЛЬНА
АКАДЕМІЯ НАУК ACADEMY
УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ГАЗУ



NATIONAL
OF SCIENCES
OF UKRAINE
THE GAS INSTITUTE

03113 Київ, вул.Дегтярівська, 39
тел. (044) 456-44-71
факс. (044) 456-88-30
E-mail: ingas@mail.kar.net

39 Degtjarivska St., 03113 Kiev, Ukraine
tel. (380 44) 456 44 71
fax. (380 44) 456 88 30
E-mail: ingas@mail.kar.net

« » 2015

ЗАТВЕРДЖУЮ
Заступник директора НАН України
З наукової роботи, канд. Техн.
Наук, ст.н.с. П'ятничко О.І.

« » 201

Акт впровадження
результатів дисертаційної роботи
Вербовського Олексія Валерійовича
«Вибір і обґрунтування параметрів мікропроцесорної системи автоматичного
регулювання частоти обертання дизеля»

В 2014...2016р.р. при виконанні науково-дослідних робіт в Інституті газу НАН України пов'язаних з автоматизацією силових енергетичних установок які працюють на традиційних і альтернативних газових паливах були використані наступні результати дисертаційної роботи Вербовського О.В.:

1. Математична модель всережимної САРЧ транспортного дизеля;
2. Креслення для встановлення ВМ на ПНВТ;
3. Методика налаштування ПІД-параметрів МР транспортного дизеля.

Математична модель і конструкторська розробка МР були використані на тракторі Т-150К при переобладнанні його на газодизельний процес.

Методика налаштування ПІД-параметрів електронного регулятора були використані для енергоустановок АГД-100С-Т400-2Р та АГД-200С-Т400-2Р потужністю 100 та 200кВт.

Завідувач відділом «Переробки
та транспортування природного газу»

 д.т.н. Г.В. Жук



Товариство з обмеженою відповідальністю «Мотортех»
55200, Україна, Миколаївська обл., м. Первомайськ, пров. Гранітний, 14
Тел./факс: (05161) 5-88-02, E-mail: motortech.p@gmail.com
www.motortech.com.ua

Акт впровадження
результатів дисертаційної роботи Вербовського Олексія Валерійовича
«Вибір і обґрунтування параметрів мікропроцесорної системи
автоматичного регулювання частоти обертання дизеля»

9 серпня 2016 р.

м. Первомайськ

ТОВ "Мотортех" інжинірингова компанія, що має висококваліфікованих фахівців, які мають багаторічний досвід роботи на одному із найстаріших двигунобудівних підприємств України. Компанія спеціалізується на наданні повного спектру послуг, в тому числі і з постачання та налаштування ексклюзивних комплектуючих до газо-поршневих двигунів різних типів: систем регулювання газопостачання, систем запалення на базі новітніх контролерів MIC500, MIC850 і MIC4, а також систем управління газо-поршневими двигунами і газомотокомпресорами.

В зв'язку з цим використання результатів дисертаційного дослідження Вербовського О.В. таких як:

- методики налаштування ПД-параметрів мікропроцесорного регулятора швидкості;
 - математичної моделі мікропроцесорного регулятора швидкості поршневого двигуна;
- в робочому процесі налаштування мікропроцесорних регуляторів швидкості поршневих двигунів є доцільним і перспективним.

Головний інженер ТОВ "Мотортех" С.М.Литвин



Список публікацій здобувача

1. Лісовал А.А. Виконавчі механізми для електронних регуляторів паливних насосів високого тиску дизелів. / А.А. Лісовал, С.В. Костриця, О.В. Вербовський // Автошляховик України. — №4. — 2009. — С. 23.
2. Лісовал А.А. Виконавчі механізми для електронних регуляторів паливних насосів високого тиску дизелів (продовження) / А.А. Лісовал, С.В. Костриця, О.В. Вербовський // Автошляховик України. — №5. — 2009. — С. 18-20.
3. Лісовал А.А. Микропроцессорный регулятор дизеля и расчёт цикловой подачи топлива / А.А. Лісовал, С.В. Костриця, О.В. Вербовський // Двигатели внутреннего сгорания. — №2. — 2010. — С. 58-61.
4. Лісовал А.А. Проверка адекватности математической модели системы автоматического регулирования дизеля / А.А. Лісовал, С.В. Костриця, О.В. Вербовський // Двигатели внутреннего сгорания. — №2. — 2011. — С. 64-69.
5. Лісовал А.А. Всережимный электронный регулятор дизеля колесного транспортного средства / А.А. Лісовал, О.В. Вербовський // Двигатели внутреннего сгорания, №1, 2012 – С. 49-53.
6. Лісовал А.А. ПІД-параметри мікропроцесорного регулятора дизеля / А.А. Лісовал, О.В. Вербовський // Вісник КДПУ: Наук. праці, Кременчук, вип. 5/2008(52). Част. 2, 2008. — С. 112-114.
7. Лісовал А.А. Настройка электронного регулятора дизеля / А.А. Лісовал, О.В. Вербовський // Автоматизация судовых технических средств: наук.-техн. зб. — 2013. — Вип. 19.— Одеса: ОНМА. — С. 49-54.
8. Лісовал А.А. Математичне моделювання автоматичної системи управління автотракторним дизелем / А.А. Лісовал, О.В. Вербовський // Управління проектами, системний аналіз і логістика,— Наук.журнал: в 2ч. —Ч.1.— Серія «Технічні науки».— К: НТУ.— 2014.— Вип.14. — С.109–114.
9. Лісовал А.А. Когенераційна установка з газовим двигуном / А.А. Лісовал, М.Є. Нижник, О.В. Вербовський / Водний транспорт: зб. наук. праць — 2013. — Вип. 3 (18).— К.: КДАВТ. — С. 51–55.
10. Лісовал А.А. Моделирование работы электронного ПИД-регулятора скорости двигателя внутреннего сгорания / А.А. Лісовал, О.В. Вербовський, Ю.А. Свистун / Двигатели внутреннего сгорания. — №2. — 2016. — С. 51-54.
11. Лісовал А.А. Микропроцессорный регулятор автомобильного дизеля / А.А. Лісовал, С.В. Костриця, О.В. Вербовський // Systems and means of motor transport. Politechnika Rzesowska, Poland. — №1. — 2010. — С. 157-160.
12. Корежуючий коефіцієнт ПІД-параметрів мікропроцесорного регулятора дизеля / Лісовал А.А., Вербовський О.В. // Systems and means of motor transport. Selected problems. Seria:Transport, Politechnika Rzesowska, Poland, 2011. — С. 167-170.
13. Лісовал А.А. Результати досліджень на математичній моделі дизеля з електронним регулятором / А.А. Лісовал, С.В. Костриця, О.В. Вербовський // LXIX Науково-практична конференція науково-педагогічних працівників, студентів та структурних підрозділів університету. — К.: НТУ, — 2013. — С. 21.

14. Лісовал А.А. Виконавчі механізми для електронного регулятора дизеля / А.А. Лісовал, С.В. Костриця, О.В. Вербовський // Матеріали III-ої всеукраїнської науково-технічної конференції сучасні проблеми двигунобудування: стан, ідеї, рішення. — Первомайськ: ППІ НУК, 2009. — С. 231 - 236.

15. Лісовал А.А. Моделирование цифровой системы регулирования скорости автотранспортного дизеля / А.А. Лісовал, С.В. Костриця, О.В. Вербовський // Матеріали III-ої всеукраїнської науково-технічної конференції сучасні проблеми двигунобудування: стан, ідеї, рішення. — Первомайськ: ППІ НУК, 2011. — С. 214-216.

16. Лісовал А.А. Математична модель електронного всережимного регулятора з ПНВТ дизеля / А.А. Лісовал, О.В. Вербовський // Тези доповідей LXVIII науково-практичної конференції науково-педагогічних працівників, аспірантів, студентів та структурних підрозділів університету.-К: НТУ, 2012р.

17. Лісовал А.А. Безмоторні випробування складових елементів електронного регулятора на базі регулятора фірми Heinzmann/ А.А. Лісовал, О.В. Вербовський // Тези доповідей LXIV науково-практичної конференції науково-педагогічних працівників, аспірантів, студентів та структурних підрозділів університету.-К: НТУ, 2008р. — С. 21-22.

18. Лісовал А.А. Дослідження і настройка електронного регулятора Henzmann / А.А. Лісовал, О.В. Вербовський // LXX наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та працівників відокремлених структурних підрозділів університету. Тези доповідей.- К.: НТУ, – 2014. — С. 19.

19. Лісовал А.А. ПД-параметри мікропроцесорного регулятора дизеля / А.А. Лісовал, О.В. Вербовський // Матеріали III-ої всеукр. наук.-техн. конф. «Сучасні проблеми двигунобудування», м. Первомайськ, 2009, С.90-95.

20. Вербовський О.В. Науковий твір «Моделювання всережимного електронного регулятора швидкості дизеля» / Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 58166 від 20.01.2015 р.