

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
„ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ТАЛАНІН ДМИТРО СЕРГІЙОВИЧ

УДК 621.436

ДИСЕРТАЦІЯ

**СИНТЕЗ ТА ІМПЛЕМЕНТАЦІЯ ЕЛЕКТРОННОЇ СИСТЕМИ
АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ПАЛИВОПОДАЧЕЮ ДИЗЕЛЯ**

Спеціальність 142 – Енергетичне машинобудування

Електрична інженерія

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

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

Науковий керівник

Прохоренко Андрій Олексійович
доктор технічних наук, професор

Харків – 2020

АНОТАЦІЯ

Таланін Д.С. Синтез та імплементація електронної системи автоматичного керування паливоподачею дизеля. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 142 – Енергетичне машинобудування. – Національний Технічний Університет „Харківський Політехнічний Інститут”, Харків, 2020.

У *вступі* обґрунтовано актуальність питання дослідження, сформульовано мету та задачі дослідження, визначено об’єкт, предмет та методи виконання дослідження, наведено відомості про наукову новизну, практичну цінність отриманих результатів, особистий внесок здобувача, апробацію, структуру та обсяг дисертації.

В **першому розділі** «Сучасний стан питання та постановка задачі дослідження» наводяться загальні відомості щодо питання організації керування дизелем на сталих і перехідних режимах для забезпечення необхідних характеристик його роботи.

Наведена класифікація паливної апаратури дизелів з електронним керуванням, яка поділена на два класи: з механічним дозуванням подачі палива в циліндр і з електромагнітно-клапанним дозуванням. Обрана область дослідження – традиційна гідромеханічна паливна система високого тиску за умови поширення результатів дослідження на електромагнітно-клапанні системи.

Описано процес створення системи електронного керування дизелем, на підставі чого зроблено висновок, що цей процес вимагає знань в декількох не суміжних галузях науки та інженерії: електромеханіки, електроніки, програмування, гідродинаміки на базі теорій ДВЗ і САК тощо. Тобто, обґрунтовано необхідність застосовування комплексного синергетичного підходу до вирішення поставленого в дисертації завдання.

Розглянуто та проаналізовано масив наукових публікацій, що описують

дослідження в даній області, зокрема вчених О.Б. Богаєвського, А.Ф. Головчука, О.А. Грунауера, К.Є. Долганова, І.Д. Долгіх, А.А. Лісовала, А.О. Прохоренка, В.И. Крутова, В.А. Маркова, Ф.И. Пинского, R.H. Bishop, R.C. Dorf та ін. Показано, що в цих та інших відомих роботах сучасні питання відображені не вичерпно, зокрема повністю відсутні відомості про алгоритмізацію та програмування контролерів систем електронного керування. До того ж виявлено, що автори відомих досліджень в цій області не надають відомостей з питання забезпечення досягнення рівноважного режиму роботи двигуна в результаті недетермінованого керуючого впливу при всережимному регулюванні.

Розглянуто можливість застосування в алгоритмі роботи ЕБК математичної моделі конкретного двигуна, яка дозволить «передбачити» задану рівноважну частоту обертання колінчастого вала (*Predictive Model Control*) та представлена структурна схема такої системи керування дизелем. На підставі аналізу роботи такої системи робиться висновок, що імплементація даної концепції алгоритму керування потребує попереднього визначення або завдання характеристик двигуна і системи подачі палива у вигляді таблиць, які можна отримати тільки шляхом випробувань його завершеної конструкції.

Таким чином у першому розділі підтверджено обґрунтування актуальності науково-технічної задачі створення ефективної і надійної системи електронного керування подачею палива дизеля з точки зору розробки простого програмного алгоритму її роботи.

У **другому розділі** «*Теоретична база та математичні інструменти дослідження*» наведено синтез алгоритмів роботи ЕБК та математичних моделей, що використані у дослідженні.

Розроблена альтернативна концепція синтезу простого алгоритму електронного керування дизелем, яка заснована на методі аналогії з роботою механічного всережимного регулятора, що є основним пунктом наукової новизни роботи. Наведена послідовність логічних міркувань при виведенні основного рівняння регулятора у вигляді простого математичного виразу. Доповнення цього рівняння необхідними обмежувачами: граничним регулятором, позитивним ко-

ректором, негативним коректором, регулятором холостого ходу, збагачувачем паливо-повітряної суміші на режимі пуску дозволило створити ядро алгоритму електронного всережимного регулятора. Важливою особливістю розробленого алгоритму є незалежність його працездатності від зовнішніх факторів, як то – вид і якість палива, умови довкілля, технічний стан двигуна та ін. Крім того, підбір значень сталих коефіцієнтів в отриманому рівнянні дозволяє легко синтезувати регулятор для отримання будь-яких характеристик роботи двигуна – від астатичних до близьких до швидкісних, що також є науковою новизною роботи.

Особливу увагу приділено розробці алгоритму роботи підсистеми керування позиціонуванням виконавчого механізму на основі дискового електродвигуна постійного струму, керованого за сигналом ШІМ. Запропоновано оригінальну методику розрахунку інтегральної складової у алгоритмі ПІД-регулятора цієї системи на основі диференціального рівняння ізодрому, що є одним з пунктів наукової новизни даної роботи.

Наведено опис математичної моделі динаміки САР, яка розробляється у дослідженні. Проведені за допомогою математичного моделювання розрахункові дослідження показали, що запропонована концепція алгоритму повністю працездатна – в будь-якому випадку система здатна здійснювати конвергентний перехідний процес з одного рівноважного режиму роботи в інший.

Третій розділ *«Експериментальні випробування та доведення електронної САР дизеля»* присвячений імплементації систем електронного регулювання на дослідницьких моторному та безмоторному стендах. Питання, вирішення яких описане в даному розділі мають вагомое практичне значення.

Зокрема, створено та доведено до практичного використання систему електронного керування дизеля експериментального дослідницького стенду лабораторії кафедри ДВЗ НТУ «ХПІ», що підтверджено відповідним Актом впровадження результатів дисертації.

Розроблена компоновка конструкції та оснащення рядного гідромеханічного ПНВТ електричним сервоактуатором з електронним керуванням, який

встановлено для проведення досліджень на безмоторний експериментальний стенд.

Розділ містить ретельний опис складових вузлів та алгоритмів роботи досліджуваних систем автоматичного регулювання частоти обертання дизеля.

У четвертому розділі «*Результати експериментальних та розрахункових досліджень*» описано виконання:

- зняття статичних регуляторних характеристики дослідницького одноциліндрового дизеля з електронним регулятором;
- реєстрації, аналізу та моделювання динамічних характеристик електронної САР цього дизеля;
- експериментального дослідження універсального електронного регулятора транспортного дизеля, який дозволяє поєднати в одному пристрої дворежимний та всережимний регулятор з метою використання потрібного типу регулювання в залежності від поточного призначення транспортного засобу.

Отримані та наведені в розділі результати повністю підтверджують попередні теоретичні та розрахункові дослідження, а також повну працездатність розроблених САР.

Наприкінці розділу сформульовано та наведено можливі напрямки розвитку та перспективні наукові дослідження з впровадження електронних інформаційних систем дизелів.

Ключові слова: *дизель, автоматичне регулювання, електронна система, алгоритм, блок керування, ПД-регулятор, регуляторні характеристики, Інтернет речей, предиктивна модель.*

Список публікацій здобувача

1. Універсальний електронний регулятор дизеля на основі електричного сервоактуатора / А. О. Прохоренко, С. С. Кравченко, Д. Є. Самойленко, І. М. Карягін, Д. С. Таланін. *Двигатели внутреннего сгорания*. 2018. № 1. С. 31–39. URL: <http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/37783>. *Здобувач виконав пошук*

та аналіз літературних джерел, прийняв безпосередню участь у підготовці, проведенні та обробці результатів експерименту.

2. The basic algorithm of the all-speed governor with electronic control and its hardware implementation / A. Prokhorenko, D. Samoilenko, P. Orlinski, M. Wojs, S. Kravchenko, D. Talanin. *Journal of Machine Construction and Maintenance*. 2018. Vol. 2(109). P. 95–100. Здобувач прийняв безпосередню участь у підготовці, проведенні та обробці результатів експерименту.

3. Dumenko P., Kravchenko S., Prokhorenko A., Talanin D. Formation and study of static and dynamic characteristics of electronically controlled diesel engine. *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*. 2019. № 2. P. 12–23. DOI: 10.2478/lpts-2019-0009. Здобувач прийняв безпосередню участь у проведенні експерименту, виконав обробку результатів, сформулював висновки.

4. The application of isodromic equation for calculation of PID-controller integrated component / A. Prokhorenko, D. Samoilenko, P. Orlinski, D. Talanin, S. Kravchenko. *Combustion Engines*. 2019. Vol. 177(2). P. 91–94. DOI: 10.19206/CE-2019-216. Здобувачем запропоновано та реалізовано новий спосіб вирішення задачі точного позиціонування виконавчого механізму.

5. Прохоренко А. О., Кравченко С. С., Таланін Д. С., Самойленко Д. Є. Предиктивна модель двигуна в інтернеті речей. *Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT–2018): зб. матеріалів X Міжнар. наук.-практ. конф. (29–31 трав. 2018 р., м. Херсон)*. Херсон, 2018. С. 74–79. Здобувач обґрунтував основну технічну ідею та прийняв безпосередню участь в її експериментальному впровадженні.

6. Прохоренко А. О., Кравченко С. С., Таланін Д. С. Система позиціонування виконавчого механізму електронної САРЧ дизеля. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я = Information technologies: science, engineering, technology, education, health : тези доп. XXVI міжнар. наук.-практ. конф. MicroCAD–2018, [16-18 трав. 2018 р.]*: у 4 ч. Харків, 2018. Ч. 1. С. 30. URL: <http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/36117>. Здобувачем сформульовано актуальність задачі точного позиціонування виконавчого механізму

та практично реалізовано спосіб її вирішення.

7. Таланін Д. С., Прохоренко А. О., Кравченко С. С. Інформаційні технології у робочому процесі дизельного двигуна: досвід імплементації та перспективи подальшого розвитку. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я = Information technologies: science, engineering, technology, education, health : тези доп. XXVII міжнар. наук.-практ. конф. MicroCAD–2019, [15–17 трав. 2019 р.]*: у 4 ч. Харків, 2019. Ч. 1. С. 43. URL: <http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/41175>. *Здобувачем сформульовано та доведено доцільність впровадження можливих напрямків розвитку та перспективних наукових досліджень електронних інформаційних систем дизелів.*

8. Пат. України на корисну модель UA 138508 U, F02D1/00, F02D41/10. Спосіб мікроконтролерного регулювання частоти обертання колінчастого валу дизеля / А. О. Прохоренко, С. С. Кравченко, Д. С. Таланін, С. Ю. Білик, А. П. Кожушко, І. В. Шуба. № u201906158; заявл. 03.06.2019; опубл. 25.11.2019, Бюл. № 22.

9. Прохоренко А. О., Таланін Д. С. Методичні вказівки до виконання розрахунково-графічної роботи «Проектування чутливого елемента механічного регулятора частоти обертання дизеля» з курсу «Автоматичне регулювання ДВЗ». Харків: Вид-во ХНАДУ, 2019. 20 с.

ANNOTATION

Talanin D.S. Synthesis and implementation of electronic automatic control system of diesel fuel supply. – Qualifying scientific work on the manuscript.

Thesis for the degree of Doctor of Philosophy in specialty 142 – Power engineering. – National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, 2020.

The **introduction** proves the rationale, formulates the purpose and objectives of the research, defines the object, subject and methods of the research, provides in-

formation on the scientific novelty, the practical value of the obtained results, the applicant's contribution, testing, structure and volume of the dissertation.

In the **first section** "Current follow-up on the issue and the setting research problem", there is a general information about a mechanism for the control of the diesel engine in steady and transitional regimes to provide the necessary characteristics of its work.

Classification of fuel equipment for diesel engines with electronic control is given, which is divided into two classes: with a mechanical metering of fuel supply into a cylinder and with electromagnetic valve metering. The chosen research area is the traditional hydro-mechanical fuel system with high pressure, under the condition

The process of creating an electronic control system for diesel engines is described, according to it the result shows that this process requires knowledge in several non-related fields of science and engineering: electro-mechanics, electronics, programming, hydrodynamics based on the theories of ICE and SAC, etc. That is, the necessity of applying a complex synergetic approach to solve the given problem in the dissertation.

A great number of scientific publications has been considered and analyzed describing the research in this area, in particular scientists: O. B. Bogaevsky, A.F Golovchuk, O.A. Grunauer, K.E. Dolganov, I.D. Dolhikh, A.A. Lisoval, A.O. Prokhorenko V.I. Krutov, V.A. Markov, F.I. Pinskiy, R.H. Bishop, R.C. Dorf and others. It is proved that in these and other well-known works the modern issues are not reflected exhaustively, in particular, there is no information about algorithmization and programming of controllers for electronic control systems. In addition, it was found that the authors of known studies in this area do not provide an information to get the equilibrium mode of engine operation as a result of a non-deterministic control effect under intrinsic regulation.

The possibility of using the mathematical model for a certain engine in the ECC algorithm is considered, which will allow "to predict" the given equilibrium crankshaft speed (Predictive Model Control) and the structural scheme of such a diesel engine control system is given. Based on the analysis of the operation such a sys-

tem, we can make a conclusion that the implementation of this control algorithm concept requires the preliminary determination or the characteristics task for the engine and fuel supply system in the form of tables, which we can only obtain by testing its completed construction.

Thus, in the first section, the scientific and technical task of justification to create an efficient and reliable electronic fuel injection control system from the point of view to develop a simple software algorithm for its operation is confirmed.

In the **second section**, "Theoretical base and mathematical tools for research", we give a ECC algorithms synthesis and the mathematical models used in the research.

The alternative concept of a simple algorithm synthesis for electronic control by diesel engine is developed, based on the method of analogy with the mechanical intrinsic controller work, which is the main point of scientific novelty of a work. The sequence of logical thinking is given while calculating the basic equation for the controller in the form of a simple mathematical formula. Addition to this equation by necessary constraints: the limiting regulator, the positive corrector, the negative corrector, idle air control valve, the enrichment to start it allowed to create the core of the algorithm for the electronic intrinsic controller. An important feature of the developed algorithm is the independence of its ability to operate from external factors, such as the kind and quality of fuel, environmental conditions, technical state of the engine, etc. In addition, the selection of values of constant coefficients in the resulting equation makes it easy to synthesize the regulator to obtain any engine performance - from astatic to near-fast, which is also a scientific novelty of a work.

Particular attention is paid to the development of the operation algorithm for the subsystem control by the positioning of the acting mechanism on the basis of a disk electric motor of direct current controlled by the PWM signal. The original method of calculating the integral component in the algorithm of the PID- proportional- integrated differential regulator in this system is proposed on the basis of the differential equation of the isodrome, which is one of the points of scientific novelty of this work.

The description of the mathematical dynamics model SAR is being developed in the research. The calculations carried out with the help of mathematical modeling showed that the proposed concept of the algorithm is fully operational - in any case, the system is capable of implementing a convergent transient process from one equilibrium mode to another.

The **third section**, "Experimental testing and proof of the electronic SAR for a diesel engine", is devoted to the implementation of electronic regulation systems on research engine and motorless stands. The solution of questions is described in this section, has a significant practical significance.

In particular, it was created and brought to practical use the system of electronic control for the diesel engine in the experimental research stand at the department laboratory ICE in NTU "KhPI", which is confirmed by the corresponding Act of introduction results in the dissertation.

It is developed the design and equipment for a regular hydro-mechanical high-pressure fuel pump (HPFP) with an electronically controlled servo actuator, which is set up for research to a non-motorized experimental stand.

The section contains a detail description of the component parts and work algorithms of the studied systems for automatic regulation of the diesel motor speed control.

In the **fourth section**, "Experimental and computing results" it describes the implementation:

- static regulatory rating from a research one-cylinder diesel engine with an electronic regulator;
- registration, analysis and modeling of the dynamic characteristics for the electronic SAR for this diesel engine;
- experimental study of universal electronic regulator for a transport diesel engine, which allows combining in one device a two-mode and super-regulator for the purpose of using the necessary type of regulation depending on the current purpose of the vehicle.

The results obtained and presented in the section fully confirm the previous

theoretical and design studies, as well as the full performance of developed SAR.

At the end of the section it is formulated and presented possible directions of development and advanced scientific researches with introduction of electronic information systems for diesel engines.

Keywords: *diesel, automatic regulation, electronic system, algorithm, control unit, PID regulator, regulatory characteristics, Internet of things, predictive model.*

List of applicant's publications

1. Universalniy elektronniy regulyator dizelya na osnovi elektrichnogo servoaktuatora / A. O. Prohorenko, S. S. Kravchenko, D. E. Samoilenko, I. M. Karyagin, D. S. Talanin. *Dvigateli vnutrennego sgoraniya*. 2018. № 1. С. 31–39. URL: <http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/37783>. *The applicant has performed a search and analysis of literature sources, taken a direct part in the preparation, conducting and processing of experimental results.*
2. The basic algorithm of the all-speed governor with electronic control and its hardware implementation / A. Prokhorenko, D. Samoilenko, P. Orlinski, M. Wojs, S. Kravchenko, D. Talanin. *Journal of Machine Construction and Maintenance*. 2018. Vol. 2(109). P. 95–100. *The applicant has been directly involved in the preparation, conducting and processing of experimental results.*
3. Dumenko P., Kravchenko S., Prokhorenko A., Talanin D. Formation and study of static and dynamic characteristics of electronically controlled diesel engine. *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*. 2019. № 2. P. 12–23. DOI: 10.2478/lpts-2019-0009. *The applicant has taken a direct part in the experiment, processed the results, formulated conclusions.*
4. The application of isodromic equation for calculation of PID-controller integrated component / A. Prokhorenko, D. Samoilenko, P. Orlinski, D. Talanin, S. Kravchenko. *Combustion Engines*. 2019. Vol. 177(2). P. 91–94. DOI: 10.19206/CE-2019-216. *The applicant proposed and implemented a new way to solve the problem of exact positioning of the actuator.*

5. Prohorenko A. O., Kravchenko S. S., Talanin D. S., Samoylenko D. E. Prediktivna model dviguna v interneti rechey. *Suchasni informatsiyini ta innovatsiyini tehnologiyi na transporti (MINTT–2018): zb. materialiv X Mizhnar. nauk.-prakt. konf. (29 –31 trav. 2018 r., m. Kherson)*. Kherson, 2018. C. 74–79. *The applicant has substantiated the main technical idea and taken a direct part in its experimental implementation.*
6. Prohorenko A. O., Kravchenko S. S., Talanin D. S. Sistema pozitsiyuvannya vikonavchogo mehanizmu elektronnoyi SARCH dizelya. *Informatsiyini tehnologiyi: nauka, tehnika, tehnologiya, osvita, zdorov'ya = Information technologies: science, engineering, technology, education, health: tezi dop. XXVI mizhnar. nauk.-prakt. konf. MicroCAD–2018, [16-18 trav. 2018 r.]*: u 4 ch. Harkiv, 2018. Ch. 1. C. 30. URL: <http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/36117>. *The applicant has formulated the relevance of the problem for accurate positioning of the actuator and practically implemented the method of its solution.*
7. Talanin D. S., Prohorenko A. O., Kravchenko S. S. Informatsiyini tehnologiyi u robochomu protsesi dizelnogo dviguna: dosvid implementatsiyi ta perspektivi podalshogo rozvitku. *Informatsiyini tehnologiyi: nauka, tehnika, tehnologiya, osvita, zdorov'ya = Information technologies: science, engineering, technology, education, health: tezi dop. XXVII mizhnar. nauk.-prakt. konf. MicroCAD–2019, [15–17 trav. 2019 r.]*: u 4 ch. Harkiv, 2019. Ч. 1. C. 43. URL: <http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/41175>. *The applicant has formulated and proved the feasibility of implementing possible directions of development and promising research for electronic information systems of diesels.*
8. Pat. Ukrayini na korisnu model UA 138508 U, F02D1/00, F02D41/10. Sposib mikrokontrolernogo reguluvannya chastoti obertannya kolinchastogo valu dizelya / A. O. Prohorenko, S. S. Kravchenko, D. S. Talanin, S. Yu. Bilik, A. P. Kozhushko, I. V. Shuba. № u201906158; zayavl. 03.06.2019; opubl. 25.11.2019, Byul. № 22.
9. Prohorenko A. O., Talanin D. S. Metodichni vkazivki do vikonannya rozrahunkovo-grafichnoyi roboti «Proektuvannya chutlivogo elementa mehanichnogo regulatora chastoti obertannya dizelya» z kursu «Avtomatiche reguluvannya DVZ». Harkiv: Vid-vo HNADU, 2019. 20 s.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	4
ВСТУП.....	5
1 СУЧАСНИЙ СТАН ПИТАННЯ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	12
1.1 Область і метод виконання дослідження.....	12
1.2 Огляд та аналіз літературних джерел.....	16
1.3 Керування дизелем на основі предиктивної моделі.....	22
Висновки до Розділу 1.....	24
2 ТЕОРЕТИЧНА БАЗА ТА МАТЕМАТИЧНІ ІНСТРУМЕНТИ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	26
2.1 Синтез статичних характеристик всережимного електронного регулятора.....	26
2.2 Алгоритм роботи підсистеми керування позиціюванням виконавчого механізму.....	36
2.3 Математична модель динаміки САР дизеля та результати моделюван- ня перехідних процесів.....	48
Висновки до Розділу 2.....	59
3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ВИПРОБУВАННЯ ТА ДОВЕДЕННЯ ЕЛЕКТРОННОЇ САР ДИЗЕЛЯ.....	61
3.1 Імплементация системи електронного регулювання на дослідному мо- торному стенді.....	61
3.2 Безмоторний стенд системи електронного керування ПНВТ.....	71
3.3 Кінематика передачі руху від актуатора до рейки ПНВТ.....	79
Висновки до Розділу 3.....	86
4 РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ТА РОЗРАХУНКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	87
4.1 Статичні характеристики дизеля з електронним регулятором.....	87
4.2 Дослідження динамічних властивостей електронної САР.....	91

4.3 Експериментальне дослідження універсального всережимного електронного регулятора.....	97
4.4 Напрямки розвитку та перспективні наукові дослідження з впровадження електронних інформаційних систем дизелів.....	99
Висновки до Розділу 4.....	106
ВИСНОВКИ.....	108
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	112
ДОДАТОК А.....	122
ДОДАТОК Б.....	126
ДОДАТОК В.....	129
ДОДАТОК Г.....	130
ДОДАТОК Д.....	131
ДОДАТОК Е.....	132
ДОДАТОК Ж.....	135