

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ОДЕСЬКА МОРСЬКА АКАДЕМІЯ»  
ЧОРНОМОРСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ІМЕНІ ПЕТРА МОГИЛИ

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

**Оженко Євген Михайлович**

УДК 681.51:621.316.79

**МЕТОДИ, МОДЕЛІ ТА ЗАСОБИ ПОКРАЩЕННЯ СИСТЕМИ  
ПОДАЧІ ПАЛИВА СУДНОВОГО ДИЗЕЛЯ НА БАЗІ  
П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ**

05.13.05 – Комп'ютерні системи та компоненти

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 \_\_\_\_\_ Є. М. Оженко

Науковий керівник:

доктор технічних наук, професор В. В. Нікольський

Одеса – 2018

## АНОТАЦІЯ

Оженко Є. М. Моделі, методи та засоби покращення системи подачі палива суднового дизеля на базі п'єзоелектричних перетворювачів. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.05 – Комп'ютерні системи та компоненти. – Чорноморський національний університет імені Петра Могили, 2018.

Дисертаційне дослідження присвячене вирішенню актуальної науково-практичної задачі покращення системи подачі палива судових дизелів, обладнаних гідроприводом виконавчих механізмів за рахунок застосування п'єзоелектричних перетворювачів.

У роботі проведено обґрунтування актуальності напрямку досліджень, наведено зв'язок з науковими програмами, сформульовано мету та завдання дослідження, відображені наукова новизна, практична цінність роботи та особистий внесок здобувача, наведено відомості про апробацію, публікації та використання результатів дослідження.

У першому розділі проведено огляд літературних джерел, проаналізований стан предмета досліджень в області систем подачі палива судових дизелів та сформульовані основні задачі досліджень.

Проаналізовано характеристики комп'ютерних систем управління подачею палива судових дизелів провідних фірм в цій галузі, зокрема MAN-B & W, WARTSILA тощо. Виявлено, що подальше підвищення ефективності автоматизованої системи управління подачею палива можливо за рахунок удосконалення виконавчого механізму.

Проаналізовано існуючі типи приводів: гідравлічні, із застосуванням асинхронних електродвигунів змінного струму, однофазних синхронних, колекторних і безколекторних (вентильних) двигунів; з використанням електромагнітів і магнітострикційних матеріалів. Показано, що вдосконалення виконавчих механізмів електромагнітного типу в

конструкторсько-технологічному напрямі в даний час практично вичерпані, що не створює перспективи в їх застосуванні.

Показана можливість використання в якості виконавчого механізму п'єзоелектричні приводи, показані позитивні та негативні сторони, а також особливості їх застосування. Доведено, що існуючі теоретичні та практичні положення не дозволяють ефективно застосовувати існуючі рішення побудови п'єзоперетворювачів в якості виконавчих механізмів систем подачі палива суднових дизелів. Отже в роботі поставлено завдання розробити теоретичні та практичні положення, які дозволять розробляти п'єзоелектричні приводи виконавчих механізмів паливних систем високого тиску.

В результаті проведеного аналізу отримано технологічну карту наукового дослідження, а також визначено ряд задач, вирішенню яких присвячений матеріал наступних трьох розділів.

У другому розділі наведено результати розробки моделей та методів покращення систем подачі палива судового дизеля.

На першому етапі були визначені вимоги до виконавчих механізмів комп'ютерної системи управління подачею палива. При цьому враховувалися тиск палива та його пульсації під час роботи двигуна, об'єм акумулятора, геометричні розміри приймаючого поршня, тиск масла тощо. Проведені розрахунки довели, що привід блоку управління подачею палива повинен забезпечувати зусилля 12,3 кН при переміщенні приймаючого поршня на 4 мм за час переміщення, що не перевищує 6,5 мс (нормально близько 1 мс).

Далі була розроблена модель блоку управління подачею палива з приводом від складального стовпа п'єзоелектричних шайб. А саме, для повного виключення гідравліки з системи управління була розроблена конструкція п'єзоприводу зі складального стовпа п'єзоелементів, в якій для збільшення переміщення приводу застосовано коромисло.

В роботі отримані вирази визначення необхідних статичних та динамічних зусиль, напружень, деформацій та переміщень, побудовані відповідні структурні схеми. Визначені коефіцієнти прямого та зворотного п'єзоефектів, коефіцієнт пружності, маса стовпа та інші параметри. На підставі структурної схеми стовпа п'єзоелектричних шайб з врахуванням отриманих значень складена структурна схема блоку управління подачі палива з п'єзоприводом, яка враховує вплив підсилювача, а також пружини золотника і пружини попереднього навантаження.

За отриманої передавальної функції в роботі були досліджені амплітудно-частотні (АЧХ), фазочастотні (ФЧХ) та імпульсні характеристики.

Аналіз залежностей показав, що при використанні даної конструкції можна отримати необхідне переміщення при необхідному зусиллі, при цьому дотримавшись вимог щодо часу перехідного процесу (0,7 мс при необхідних 6,5 мс). Крім того, отримана лінійність АЧХ і відставання по фазі не більше ніж на  $0,5^\circ$  в діапазоні кутових швидкостей від 0 до 100 рад/с свідчить про можливість використання даної конструкції на судових дизелях з частотою обертання до  $960 \text{ хв}^{-1}$ .

Крім того, дослідження показали, що перехідний процес має коливальний характер, що знижує точність підтримки заданого тиску палива перед форсункою, і як наслідок, знижує енергетичну та екологічну ефективність дизеля.

Іншим рішенням, що було запропоновано і розглянуто в дисертаційній роботі, є застосування блоку управління подачею палива з приводом від роторних п'єзодвигунів.

Для моделювання за основу була взята модель віскозиметру з п'єзоелектричними двигунами, при цьому використані експериментальні дані, що були отримані при випробуваннях і тестах.

В роботі показано, що для цієї задачі найбільш підходять кільцеві п'єзоелементи з п'єзокераміки ЦТБС 3. Проведено їх моделювання і



розрахунок основних показників. Розглянуто режими роботи двигуна і системи управління.

В результаті аналізу моделей було доведено можливість отримання великих переміщень при необхідному зусиллі і часі перехідного процесу. При цьому показано, що п'єзодвигун розвиває момент практично миттєво (час розгону становить  $T_p = 0,08$  сек).

У третьому розділі описано розроблені методи покращення характеристик систем подачі палива на базі п'єзоприводів, а саме – зменшення коливань системи, що негативно позначається на надійності компонентів системи, призводить до відхилення закону подачі палива від заданого виду, і як наслідок, до зниження економічності.

В першу чергу була розроблена система позиціонування золотника блоку управління подачею палива з ПІД-регулятором. Застосування системи позиціонування п'єзоприводу з ПІД-регулятором, при керуючому сигналі 1000 В, дозволило знизити амплітуду коливань, але не виключило їх повністю.

Наступним кроком, для ще більшого зменшення коливань системи, була розробка системи позиціонування виконавчого механізму паливної системи двигуна з «нечітким» регулятором. Апробація запропонованої нечіткої системи позиціонування в середовищі Matlab продемонструвала її ефективність: коливання золотника блоку управління подачею палива вдалося практично виключити, при дотриманні вимог, що пред'являються, до швидкодії системи.

Для повного демпфірування небажаних коливань набору п'єзокерамічних шайб п'єзоприводу в дисертаційній роботі було запропоновано використання від'ємного зворотнього зв'язку. Наведено отримані схемотехнічні та функціональні моделі таких перетворювачів, АЧХ та ФЧХ, а також перехідні характеристики.

Аналіз характеристик показав, що використання від'ємного зворотного зв'язку дозволяє повністю усунути небажані коливання п'єзоелементів п'єзоприводу.

У четвертому розділі описані розроблені стенди та конструкції п'єзоприводів, в яких реалізовані усі отримані теоретичні положення, наведено результати експериментальних досліджень.

В роботі була розроблена експериментальна установка для дослідження п'єзоприводів зі складальних стовпів п'єзоелектричних елементів, в якій використовувалися п'єзоперетворювачі різних модифікацій.

Для противаги при проведенні експериментів було розглянуто чотири типи пружин. В якості вимірювального приладу був використаний індикатор часового типу японського виробництва MITUTOYO, діапазон 0,01-10 мм.

Для дослідження електричних параметрів п'єзопластин був використаний переносний стенд TSL (TATU Smart Lab, інтелектуальна лабораторія TATU), яка містить сучасні пристрої і модулі виробництва німецьких компаній Berghoff, Phoenix Contact и Siemens. Стенд отриманий в рамках проекту TEMPUS 544010-TEMPUS-1-2013-1-DE-TEMPUS-JPHES TATU – "Trainings in Automation Technologies for Ukraine" (тренінги в області технологій автоматизації для України), де здобувач брав участь як виконавець.

Результати проведених експериментальних досліджень підтвердили отримані теоретичні положення, що були викладені у попередніх розділах. Були отриманні переміщення плеча (до 4 мм), які повністю відповідають необхідним вимогам до побудови п'єзоприводів.

В роботі наведено розроблені та запатентовані конструкції і моделі компонентів системи подачі палива на базі п'єзоелектричних складальних стовпів та п'єзоелектричних роторних двигунів, які довели можливість застосування п'єзоперетворювачів для отримання великих переміщень при

необхідному зусиллі і часі перехідного процесу.

Отримані в роботі нові науково-технічні та конструктивні рішення дозволили доповнити класифікаційну схему основних типів паливних систем високого тиску за рахунок впровадження нового типу приводу виконавчого механізму на базі п'єзоелектричних перетворювачів.

Проведено порівняння розроблених систем з відомими, яке довело перевагу і перспективність використання запропонованих рішень. Це дозволило стверджувати, що поставлена в роботі мета досягнута.

Ключові слова: комп'ютерна система подачі палива суднового дизеля, привід виконавчих механізмів, п'єзоперетворювач.

## ABSTRACT

**Ozhenko Y. M.** Models, methods and means of diesel engine fuel injection system improving on the basis of piezoelectric transducers. – Manuscript.

The thesis for a Degree of Candidate of Science (Engineering) in specialty 05.13.05 – Computer systems and components. – National University “Odessa Maritime Academy”, 2018.

The dissertation research is devoted to solving an actual scientific and practical problem of improving marine diesel engines fuel injection system equipped with hydraulic actuators by means of piezoelectric transducers.

The research substantiates the relevance of the research direction, gives a link with scientific programs, formulates the purpose and tasks of the research, reflects the scientific interest, practical interest of the work and personal contribution of the applicant, provides information on testing, publication and use of research results.

The first section reviews the literary sources, analyzes the research subject state in the field of marine diesel engines fuel injection systems and formulates the main research objectives.

The characteristics of the diesel engines fuel injection computer systems of the leading companies in this field, in particular MAN-B&W, WARTSILA, etc. are analyzed. It is determined that automated fuel injection control system efficiency further improvement is possible due to the improvement of the actuating mechanism.

The existing types of actuators are analyzed: hydraulic, with the use of asynchronous electric motors of alternating current, single-phase synchronous, collector and collector motors; using electromagnets and magnetostrictive materials. It is shown that the improvement of the electromagnetic type actuating mechanisms in the design and technological direction is currently practically exhausted, which does not create prospects for their application.

The possibility of using piezoelectric actuators as an actuator mechanism is shown, positive and negative sides are shown, as well as peculiarities of their application. It is proved that the existing theoretical and practical provisions do not allow to effectively apply existing solutions for the construction of piezoelectric converters as marine diesel engines fuel injection systems actuating mechanisms. Therefore, the task is to develop theoretical and practical provisions that allow the development of piezoelectric drives of the high-pressure fuel systems actuating mechanisms.

As a result of the analysis, a technological map of scientific research was obtained, as well as a number of tasks were determined, the solution of which is the material of the following three sections.

The second section presents the results of models development and methods for improving the marine diesel fuel injection systems.

At the first stage, the requirements for the actuating mechanisms of the computerized fuel injection control system were determined. In this case, the fuel pressure and its pulsations during engine operation, the fuel rail volume, the actuating piston geometric dimensions, the oil pressure, etc. are taken into account. The performed calculations proved that the drive of the fuel injection

control unit should provide torque of 12.3 kN when the piston is moved by 4 mm during the time, which does not exceed 6.5 msec (normally about 1 msec).

Then a model of a fuel injection control unit driven by piezoelectric washers stuck was developed. Namely, for the complete exclusion of the hydraulics from the control system, a design of the piezoelectric drive from the stuck of the piezoelements was developed, in which a rocker arm was applied to increase the drive movement.

In the work the determination of necessary expressions of static and dynamic forces, stresses, deformations and displacements are obtained, corresponding structural schemes are constructed. The coefficients of direct and reverse piezoelectric effects, coefficient of elasticity, column weight and other parameters are determined. On the basis of the structural scheme of the piezoelectric stuck, taking into account the values obtained, a structural diagram of the fuel injection control unit with a piezo actuator is compiled, which takes into account the effect of the amplifier, as well as the springs of the spool and the pre-load springs.

On the received transfer function in the work were investigated amplitude-frequency (AFC), phase-frequency (FHC) and pulse characteristics.

The analysis of curves showed that using this design can be obtain the necessary movement with the necessary torque, while complying with the requirements for the time of the transition process (0.7 ms at the required 6.5 ms). In addition, the received linearity of the frequency response and the phase lag of no more than  $0.5^\circ$  in the range of angular velocities from 0 to 100 rads/s indicates the possibility of using this design on marine diesel engines with a rotational speed of up to  $960 \text{ min}^{-1}$ .

In addition, studies have shown that the movement is oscillatory, which reduces the accuracy of the fuel before the injector prescribed pressure, and as a consequence, reduces the energy and ecological efficiency of the diesel engine.

Another solution that was proposed and considered in the dissertation is the use of a fuel injection control unit with a drive from rotary piezo motors.

For simulation, a model of a viscometer with piezoelectric motors was used as the basis, using experimental data obtained during tests.

It is shown in this paper that ring piezoelements from piezoceramics of PTBZ-3 are the most suitable for this task. Their simulation and calculation of basic indicators are carried out. The modes of motor operation and the control system are considered.

As a result of model analysis, it was proved that large displacements can be obtained with the necessary effort and time of the transition process. It is shown that the piezoelectric motor assists a torque almost instantaneously (the acceleration time is 0.08 sec).

The third section describes the developed methods for improving the characteristics of the fuel injection systems on the basis of the piezoelectric drive, namely - reducing the system fluctuations, which negatively affects the reliability of the system components, leads to deviation of the fuel injection curve from prescribed, and as a consequence, to reduce the efficiency.

In the first place, the fuel injection control unit spool positioning system with the PID controller was developed. The application of the piezoelectric drive positioning system with the PID controller, with a control signal of 1000 V, allowed to reduce the amplitude of oscillations, but did not exclude it completely.

The next step, to further reduce the system fluctuations, was the development of a fuel injection system actuator positioning system with a "fuzzy" controller. Approbation of the proposed fuzzy positioning system in Matlab has demonstrated its efficiency: the fluctuations of the fuel injection control unit spool have been almost eliminated, while complying with the requirements, to the speed of the system.

For complete damping of piezoelectric drive unwanted oscillations in the dissertation, negative feedback was proposed. The received schematic and functional models of such transducers, AFC and FHC, as well as transition characteristics are given.

Analysis of characteristics showed that the use of negative feedback allows to completely eliminate the unwanted oscillations of piezoelectric elements.

The fourth section describes the developed stands and designs of the piezoelectric drives, in which all the theoretical positions obtained are realized, the results of experimental research are presented.

In the work, an experimental stand was developed for the study of the piezoelectric drive from the stuck of the piezoelectric elements, in which the piezoelectric transducers of various modifications were used.

For counterbalance during conducting of experiments four types of springs were considered. As a measuring instrument, the indicator of the clock type of Japanese manufacture MITUTOYO, range 0.01-10 mm was used.

The TSL (TATU Smart Lab, TATU Intelligent Laboratory), which contains modern devices and modules for the German companies Berghoff, Phoenix Contact and Siemens, was used to study the electrical parameters of the piezoelectric elements. The stand was received under the project TEMPUS 544010-TEMPUS-1-2013-1-DE-TEMPUS-JPHES TATU – "Trainings in Automation Technologies for Ukraine", where the applicant participated as a performer.

The results of the experimental studies confirmed the obtained theoretical theses, which were set forth in the previous sections. Were received moving shoulders (up to 4 mm), which fully meet the necessary requirements for the construction of the piezoelectric drive.

The developed and patented designs and models of the fuel injection system components on the basis of piezoelectric stuck and piezoelectric rotary motors have been developed and patented, which proved the possibility of using piezoelectric converters for large displacements with the necessary effort and time of the transition process.

The new scientific, technical and constructive solutions obtained in the work allowed to supplement the classification scheme of the main types of high-pressure fuel systems by introducing a new type of actuator based on

piezoelectric converters.

A comparison of developed systems with known ones has been made, which has proven the advantage and promise of the proposed solutions use. This made it possible to assert that the goal set in the work was achieved.

**Keywords:** electronically controlled diesel engine fuel injection system, actuator, piezoelectric transducers.

## СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Миусов М. В., Ланчуковский В. И., Оженко Е. М. Электронные системы управления главными судовыми двигателями: учебное пособие / М. В. Миусов, В. И. Ланчуковский, Е. М. Оженко. – Одесса: ОНМА, 2013. – 98 с.

2. Никольский В. В. Повышение качества регулирования вязкости топлива на судне / В. В. Никольский, Е. М. Оженко, И. Г. Уранковский // Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сб. – 2007. – Вып. 12. – Одесса: ОНМА. – С. 95–107.

3. Оженко Е. М. Вискозиметр для измерения динамической вязкости тяжелого топлива / Е. М. Оженко, В. В. Никольский // Вісник Черкаського державного технологічного університету. – 2007. – Спецвипуск. – Черкаси: ЧДТУ. – С. 218–220.

4. Михайленко В. С. Нечеткая система автоматизированного регулирования давления пара судовой котельной установки / В. С. Михайленко, Е. М. Оженко // Холодильна техніка и технологія. – 2008, № 5 (115). – Одеса: ОДАХ. – С. 69–73.

5. Михайленко В. С. Экспертная система диагностики судового оборудования / В. С. Михайленко, Е. М. Оженко // Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сб. – 2008. – Вып. 14. – Одесса: ОНМА. – С. 64–68.

6. Ozhenko Y. M. Increase the intelligent engine's automation control system reliability / Y. M. Ozhenko, V. V. Nikolskiy // Вісник Черкаського



державного технологічного університету. – 2009. – Спецвипуск. – Черкаси: ЧДТУ. – С. 80–82.

7. Никольский В. В. Повышение надежности АСУ «Интеллектуального двигателя» / В. В. Никольский, Е. М. Оженко, С. И. Горб // Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сб. – 2010. – Вып. 16. – Одесса: ОНМА. – С. 77–82.

8. Никольский В. В. Оценка возможности использования вентильного двигателя, как привода блока управления подачей топлива / В. В. Никольский, Е. М. Оженко, С. С. Павленко, А. К. Сандлер // Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сб. – 2010. – Вып. 16. – Одесса: ОНМА. – С. 83–86.

9. Никольский В. В. Совершенствование системы управления частоты вращения дизель-генератора / В. В. Никольский, Е. М. Оженко, В. С. Свинобой, С. Г. Хнюнин // Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сб. – 2010. – Вып. 16. – Одесса: ОНМА. – С. 87–92.

10. Никольский В. В. Оценка возможности применения пьезогенератора в составе судового дизеля / В. В. Никольский, Е. М. Оженко, В. Е. Лысенко, М. В. Никольский // Судовые энергетические установки. – 2012. – № 30. – Одеса: ОНМА. – С. 92–97.

11. Оженко Е. М. Оценка возможности применения пьезоэлектрического исполнительного механизма для повышения эффективности автоматизированной системы управления подачей топлива / Е. М. Оженко // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия «Морская техника и технология». – № 2. – Астрахань: АГТУ, 2013. – С. 137–142.

12. Никольский В. В. Применение пьезоэлектрического исполнительного механизма для повышения эффективности автоматизированной системы управления подачей топлива / В. В. Никольский, Е. М. Оженко // Судовые энергетические установки. – 2015. – № 36. – Одеса: ОНМА. – С. 130–140.

13. Оженко Є. М. Зменшення механічних коливань набору п'єзокерамічних шайб п'єзоприводу за допомогою використання від'ємного зворотнього зв'язку / Є. М. Оженко // Наукові праці: Науково-методичний журнал. Серія «Комп'ютерні технології». – Вип. 296, Т. 308. – Миколаїв: ЧНУ ім. Петра Могили, 2017. – С. 146–149.

14. Оженко Е. М. Trace Mode в информационном обеспечении СЭУ / Е. М. Оженко, В. В. Никольский // Матеріали XIV міжнародної конференції з автоматичного управління (Автоматика – 2007), 10–14 вересня 2007. – Севастополь: СНУЯЄтаП, 2007. – С. 158–159.

15. Оженко Е. М. Повышение надежности АСУ «интеллектуального двигателя» / Е. М. Оженко, В. В. Никольский, В. С. Михайленко // Матеріали XV міжнародної конференції з автоматичного управління (Автоматика – 2008), 23–26 вересня 2008. – Одесса: ОНМА. – 2008. – С. 390–391.

16. Оженко Е. М. Вискозиметр для измерения динамической вязкости тяжелого топлива / Е. М. Оженко, В. В. Никольский // Матеріали IV міжнародної науково-технічної конференції «Датчики, прилади та системи – 2008», 19–23 вересня 2008. – Черкаси: ЧДТУ. – 2008. – С. 93–94.

17. Оженко Е. М. Повышение надежности АСУ «Интеллектуального двигателя» / Е. М. Оженко, С. И. Горб, Л. В. Вишнеvский, В. В. Никольский // Матеріали XVI міжнародної конференції з автоматичного управління (Автоматика – 2009), 22–25 вересня 2009. – Чернівці: Книги. – 2009. – С. 198–199.

18. Никольский В. В. Повышение надежности АСУ судовыми двигателями внутреннего сгорания с электронным управлением впрыска топлива / В. В. Никольский, Е. М. Оженко // Матеріали XVII міжнародної конференції з автоматичного управління (Автоматика – 2010), 27–29 вересня 2010. – Том 1. – Харків: ХНУРЕ. – 2010. – С. 258–259.

19. Никольский В. В. Повышение надежности АСУ судового двигателя с электронным управлением подачей топлива / В. В. Никольский, Е. М. Оженко // Матеріали XVIII міжнародної конференції з автоматичного управління (Автоматика – 2011), 28–30 вересня 2011. – Львів: Львівська політехніка. – 2011. – С. 266.

20. Никольский В. В. Усовершенствование АСУ подачи топлива судового двигателя с электронным управлением / В. В. Никольский, Е. М. Оженко // Матеріали XIX міжнародної конференції з автоматичного управління (Автоматика – 2012), 26–28 вересня 2012. – Київ: НУХТ. – 2012. – С. 233–234.

21. Пат. 37258 Україна, МПК (2006) G01N11/10. Віскозиметр / В. В. Нікольський, Є. М. Оженко. – № u200806748; заявл. 16.05.2008; опубл. 25.11.2008, Бюл. № 22.

22. Пат. 43426 Україна, МПК (2009) G01N11/10. Система управління подачею палива «інтелектуального» двигуна / В. В. Нікольський, Є. М. Оженко. – № u200904249; заявл. 29.04.2009; опубл. 10.08.2009, Бюл. № 15.

23. Пат. 54256 Україна, МПК (2009) G01N11/10. Система керування подачею палива «інтелектуального» двигуна / В. В. Нікольський, Є. М. Оженко. – № u201000962; заявл. 01.02.2010; опубл. 10.11.2010, Бюл. № 21.

24. Пат. 54257 Україна, МПК (2009) G01N11/10. Система керування подачею палива «інтелектуального» двигуна / В. В. Нікольський, Є. М. Оженко. – № u201000963; заявл. 01.02.2010; опубл. 10.11.2010, Бюл. № 21.

25. Пат. 54258 Україна, МПК (2009) G01N11/10. Система керування подачею палива «інтелектуального» двигуна / В. В. Нікольський, Є. М. Оженко. – № u201000966; заявл. 01.02.2010; опубл. 10.11.2010, Бюл. № 21.

26. Пат. 55019 Україна, МПК (2009) G01N11/00. Система керування подачею палива «інтелектуального» двигуна / В. В. Нікольський, Є. М. Оженко. – № u201000959; заявл. 01.02.2010; опубл. 10.12.2010, Бюл. № 23.

27. Пат. 78425 Україна, МПК (2013.01) B63B 17/00. Судновий дизель з п'езогенератором / В. В. Нікольський, Є. М. Оженко, В. Є. Лисенко, М. В. Нікольський. – № u201202943; заявл. 13.03.2012; опубл. 25.03.2013, Бюл. № 6.

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	20
ВСТУП.....	21
<b>РОЗДІЛ 1. СТАН ПРЕДМЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ І ФОРМУЛЮВАННЯ ВИРІШУВАНИХ ЗАВДАНЬ .....</b>	<b>28</b>
1.1 Особливості експлуатації та класифікація паливних систем суднового малооборотного дизеля.....	28
1.2. Типи приводів виконавчих механізмів.....	42
1.2.1. Аналіз існуючих типів приводів.....	42
1.2.2. Використання п'єзоелектричних приводів.....	43
1.3. Загальна методика дисертаційного дослідження.....	47
1.3.1. Вибір теми наукового дослідження.....	47
1.3.2. Обґрунтування мети і завдань дисертаційного дослідження.....	49
1.3.3. Системний підхід до розробки технологічної карти наукового дослідження.....	50
1.4. Висновки до розділу 1.....	52
 <b>РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА МОДЕЛЕЙ ТА МЕТОДІВ ПОКРАЩЕННЯ СИСТЕМ ПОДАЧІ ПАЛИВА СУДНОВОГО ДИЗЕЛЯ.....</b>	<b>54</b>
2.1. Формування вимог до виконавчих механізмів системи управління подачею палива.....	54
2.2. Модель блоку управління подачею палива з приводом від складального стовпа п'єзоелектричних шайб.....	56
2.3. Модель блоку управління подачею палива з приводом від роторних п'єзодвигунів.....	71
2.3.1. Основні вимоги до розробки приводу від роторних п'єзодвигунів.....	71
2.3.2. Моделювання п'єзоелектричного двигуна блоку	

управління подачею палива з приводом від роторних п'єзодвигунів.....	73
2.3.3. Режим роботи двигуна і система управління.....	76
2.4. Висновки до розділу 2.....	78
<b>РОЗДІЛ 3. МЕТОДИ ПОКРАЩЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМ ПОДАЧІ ПАЛИВА НА БАЗІ П'ЄЗОПРИВОДІВ.....</b>	
3.1. Система позиціонування золотника блоку управління подачею палива з ПІД-регулятором.....	80
3.2. Система позиціонування золотника блоку управління подачею палива з «нечітким» регулятором.....	83
3.3. Використання негативного зворотного зв'язку для усунення коливань.....	91
3.4. Висновки до розділу 3.....	95
<b>РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЙ КОМПОНЕНТІВ КОМП'ЮТЕРНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ПОДАЧЕЮ ПАЛИВА СУДОВОГО ДИЗЕЛЯ НА БАЗІ ПРИВОДУ ВИКОНАВЧИХ МЕХАНІЗМІВ З П'ЄЗОПЕРЕТВОРЮВАЧІВ.....</b>	
4.1. Експериментальні дослідження п'єзоприводу зі складального стовпа п'єзоелектричних шайб.....	96
4.2. Розробка блоку управління подачею палива з приводом від складального стовпа п'єзоелектричних шайб.....	109
4.3. Розробка блока управління подачею палива з приводом від роторних п'єзодвигунів.....	113
4.4. Порівняння розроблених систем управління подачею палива з відомими рішеннями.....	117
4.5. Висновки до розділу 4.....	121
<b>ВИСНОВКИ.....</b>	<b>123</b>

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	126
ДОДАТОК А. Акти про впровадження результатів дисертаційного дослідження.....	138
ДОДАТОК Б. Патенти на корисні моделі.....	141
ДОДАТОК В. Список публікацій здобувача за темою дисертації.....	162

**ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ**

FIVA	– valve - Fuel Injection Valve Activation (клапан керуючий подачею палива і переміщенням випускного клапана)
NO <sub>x</sub>	– оксиди азоту
VIT	– Variable Injection Timing (система зміни фаз подачі палива)
WECS	– Wartsila Engine Control System (система управління двигуном)
АЧХ	– амплітудно-частотна характеристика
АСУ	– автоматична система управління
БУПП	– блок управління подачею палива
ВЗЗ	– від'ємний зворотний зв'язок
МОД	– мало оборотний дизель
СДВС	– судновий двигун внутрішнього згоряння
ПЕ	– п'єзоелемент
п. к. в.	– поворот колінчастого вала
ПНВТ	– паливний насос високого тиску
СОД	– середньооборотний дизель
ФЧХ	– фазочастотна характеристика



## ВСТУП

**Актуальність теми.** Робота присвячена розробці методів, моделей та засобів покращення систем управління подачею палива суднових дизелів з електронним управлінням, за рахунок впровадження нових типів приводів виконавчих механізмів на базі п'єзоелектричних перетворювачів.

Двигуни внутрішнього згоряння широко застосовуються в промисловості і на всіх видах транспорту завдяки високій економічності та значному моторесурсу. На морському транспорті судові двигуни внутрішнього згоряння (СДВЗ) займають домінуюче становище. Більше 90 % світового флоту обладнано СДВЗ дизельного типу в якості головної енергетичної установки, що забезпечує хід судну, а також в якості приводів електрогенераторів та інших допоміжних механізмів.

За останні 10 років суттєво змінилася ситуація на ринку нафтопродуктів, що призвело до підвищення вартості палива з 50 до 450 дол./т. Крім того, посилилися вимоги до екологічної безпеки суднових дизелів у вигляді зниження норми викидів NO<sub>x</sub>, що поставило перед розробниками комплекс проблем щодо зниження емісії відпрацьованих газів і витрати палива. А посилення конкуренції на світових ринках вимагає підвищення надійності і ефективності двигунів, зниження експлуатаційних витрат і підвищення їх довговічності.

Однак, традиційні приводи паливних насосів високого тиску і випускних клапанів не можуть забезпечити необхідної гнучкості при оптимізації робочого процесу дизеля, що змусило розробників дизелів до створення нових типів паливних систем і систем газорозподілу, в яких закон подачі палива, зміна фаз подачі палива і газорозподілу не пов'язані жорстко з режимами роботи дизеля. Розвитком теорії і практики паливних систем займаються такі зарубіжні фірми, як Wartsila, MAN-B&W, Caterpillar тощо.

Основні напрямки розвитку – це акумуляторна система і система

безпосередньої дії з гідроприводом паливного насосу, які для переміщення виконавчих механізмів використовують гідропривід, несправності якого неодноразово приводили до виникнення аварійних ситуацій і аварій.

Від характеристик паливної системи залежить надійність, економічність і екологічна безпека двигуна, тому роботи по покращенню паливних систем суднових дизелів є актуальними як з наукової, так і з практичної точки зору.

Розвитком теорії та практики п'єзоелектричного приводу займалися такі відомі вітчизняні та зарубіжні вчені, як Єрофєєв А. А., Петренко С. Ф., Лавриненко В. В., Нікольський О. А., Вишневський В. С., Давлеталієв Д. А., Кеді У., Кауфман А., Окадзакі К. та інші.

Параметри паливної системи, що мають істотне значення, – це економічність, тобто кількість енергії, що витрачається на роботу паливної системи, вартість її обслуговування, надійність і гнучкість в управлінні фазами та законом подачі палива. Поліпшити ці характеристики можна за рахунок впровадження п'єзоприводів.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами та темами.** Дослідження відповідає основним принципам Транспортної стратегії України на період до 2020 року, зокрема, «Забезпечення безпеки транспортних процесів шляхом впровадження сучасних інформаційних технологій», «Підвищення екологічності та енергоефективності транспортних засобів шляхом оптимізації терміну експлуатації, технічного обслуговування і ремонту транспортних засобів» (розп. КМУ № 2174 від 20.10.2010 р.) та планом виконання науково-дослідних робіт Національного університету «Одеської морської академії» за темою «Розробка п'єзоелектричного приводу широкого застосування». Результати досліджень, що увійшли в дисертаційну роботу, відображені в звіті в НДР №№ ДР 0109U001538, в розробці якого автор брав участь як виконавець розділу 3.

**Мета і задачі дослідження.** Метою дисертаційного дослідження є підвищення безпеки судноплавства шляхом розробки методів, моделей та засобів поліпшення(покращення, удосконалення) системи подачі палива судових дизелів, обладнаних гідроприводом виконавчих механізмів за рахунок застосування п'єзоелектричних перетворювачів.

В роботі поставлені та вирішені такі задачі:

- провести аналіз відомих методів та моделей існуючих систем подачі палива і їх ефективності, обґрунтувавши на цій основі завдання дослідження і позначивши шляхи їх вирішення;

- розробити метод удосконалення комп'ютерної системи управління подачею палива шляхом впровадження приводу виконавчих механізмів на базі п'єзоперетворювачів;

- отримати моделі конструкцій компонентів комп'ютерної системи управління подачею палива на основі приводу виконавчих механізмів на базі п'єзоперетворювачів за рахунок застосування п'єзоелектричних складальних стовпів та п'єзоелектричних роторних двигунів;

- розробити моделі та методи зменшення та усунення коливань систем управління подачею палива на основі приводу виконавчих механізмів на базі п'єзоперетворювачів;

- розробити конструкції приводів виконавчих механізмів на базі п'єзоперетворювачів, провести експериментальні дослідження.

**Об'єкт дослідження** – робочі процеси в комп'ютерній системі управління подачею палива судового дизеля.

**Предмет дослідження** – моделі, методи та засоби поліпшення системи подачі палива судового дизеля.

**Методи дослідження.** У дисертації для вирішення наукових завдань використані наступні методи досліджень: дедукції – при виборі напрямків дисертаційного дослідження; експертної оцінки – при виборі теми і постановці мети дослідження та аналізі результатів; системного аналізу – при розробці технології наукових досліджень; теорії автоматичного

керування, теорії коливальних систем із зосередженими параметрами та теорії електричних ланцюгів – при дослідженні п'єзоелектричних складальних стовпів; рівнянь п'єзо ефекту – при дослідженні моделі конструкцій компонентів комп'ютерної системи управління подачею палива із застосування п'єзоелектричних роторних двигунів; теорії нечіткої логіки – при розробці системи позиціонування виконавчого механізму паливної системи двигуна з «нечітким» регулятором; функціонального, схемотехнічного і математичного моделювання – при розробці моделей п'єзоперетворювачів зі зворотним зв'язком; фізичні експерименти на макетах і дослідних зразках, методи теорії ймовірності і математичної статистики – при проведенні експериментальних досліджень.

**Наукова новизна одержаних результатів** полягає у створенні моделей, методів та засобів поліпшення системи подачі палива судового дизеля на базі п'єзоелектричних перетворювачів, які дозволяють знизити аварійність і поліпшити роботу систем позиціонування виконавчих механізмів подачі палива. Відмінність запропонованої системи від існуючих гідравлічних полягає в можливості відмови від громіздких гідравлічних конструкцій, що знижують ККД дизеля та зниженні аварійності при експлуатації.

При цьому, *вперше* отримані наступні наукові результати:

- моделі конструкцій компонентів комп'ютерної системи управління подачею палива на основі приводу виконавчих механізмів на базі п'єзоперетворювачів за рахунок застосування п'єзоелектричних складальних стовпів, що дозволило отримати необхідне переміщення клапана в блоці управління подачею палива при необхідному зусиллі і часу перехідного процесу;

- моделі конструкцій компонентів комп'ютерної системи управління подачею палива на основі приводу виконавчих механізмів на базі п'єзоперетворювачів за рахунок застосування п'єзоелектричних роторних двигунів, що дозволило збільшити переміщення клапана в блоці

управління подачею палива.

Отримали *подальший* розвиток:

- метод удосконалення комп'ютерної системи управління подачею палива шляхом впровадження приводу виконавчих механізмів на базі п'єзоперетворювачів для суднового дизеля, що дозволило збільшити економічність паливної системи;

- модель позиціонування золотника блоку управління подачею палива за рахунок використання нечіткого регулятора, що дозволило зменшити внутрішні коливання системи і тим самим підвищити надійність системи подачі палива;

- моделі п'єзоперетворювачів зі зворотним зв'язком за рахунок вперше отриманих схемотехнічних і функціональних моделей складальних стовпів п'єзоперетворювачів зі зворотним зв'язком, що дозволило проектувати системи подачі палива без внутрішніх коливань системи, тобто зі збільшеною її надійністю.

### **Практичне значення одержаних результатів.**

За результатами теоретичних і експериментальних досліджень розроблена комп'ютерна система позиціонування виконавчих механізмів подачі палива на базі п'єзоелектричних перетворювачів, яка дозволила збільшити економічність паливної системи. Наведено практичні рекомендації щодо розрахунку, конструювання та експлуатації пропонованої системи.

Розроблено та запатентовано сім конструкцій приводів виконавчих механізмів на базі п'єзоелектричних складальних стовпів і п'єзоелектричних роторних двигунів, що дозволило отримати великі переміщення клапана в блоці управління подачею палива при необхідному зусиллі і часі перехідного процесу.

Розроблені моделі зменшення внутрішнього коливання системи управління подачею палива на основі приводу виконавчих механізмів на базі п'єзоперетворювачів підвищили надійність системи подачі палива.

Результати роботи використовуються в навчальному процесі Національного університету «Одеська морська академія» кафедр автоматизації дизельних і газотурбінних установок і теорії автоматичного управління та обчислювальної техніки.

**Особистий внесок здобувача.** Всі результати, наведені в дисертаційній роботі, що виносяться на захист, отримані здобувачем особисто. Результати, що опубліковані в [11, 13], отримані автором особисто. У наукових статтях, опублікованих у співавторстві, здобувачеві належать наступні результати: в роботі [1, 14] – аналіз паливних систем високого тиску суднових дизелів; [2, 3, 16] – отримання висновків за результатами досліджень; [4, 5, 12] – пропозиція, розробка та дослідження моделі позиціонування золотника блоку управління подачею палива за рахунок використання нечіткого регулятора; [6, 15] – пропозиція, розробка та дослідження моделі конструкцій компонентів комп'ютерної системи на базі п'єзоелектричних роторних двигунів; [7, 12, 17–20] – пропозиція, розробка та дослідження моделі конструкцій компонентів комп'ютерної системи на базі п'єзоелектричних складальних стовпів; [8–10] – пропозиція, розробка методу удосконалення комп'ютерної системи управління подачею палива шляхом впровадження приводу виконавчих механізмів на базі п'єзоперетворювачів для суднового дизеля; [21] – участь в розробці ідей, формул винаходів; [22–27] – пропозиція ідеї та конструкції, формулювання формули винаходів.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення дисертаційної роботи доповідалися і обговорювалися на науково-технічних конференціях: XIV міжнародній конференції з автоматичного управління «Автоматика – 2007» (Севастополь, 2007), XV міжнародній конференції з автоматичного управління «Автоматика – 2008» (Одеса, 2008), IV міжнародній науково-технічній конференції «Датчики, прилади та системи – 2008» (Гурзуф, 2008), XVI міжнародній конференції з автоматичного управління «Автоматика – 2009» (Чернівці, 2009), XVII міжнародній

конференції з автоматичного управління «Автоматика – 2010» (Харків, 2010), XVIII міжнародній конференції з автоматичного управління «Автоматика – 2011» (Львів, 2011), XIX міжнародній конференції з автоматичного управління «Автоматика – 2012» (Київ, 2012).

**Публікації.** Результати дисертації опубліковані в 27 наукових роботах, в тому числі в одному навчальному посібнику у співавторстві, 12 статтях в журналах, які затверджені МОН України та індексуються у наукометричних базах Index Copernicus тощо, 7 публікацій у збірниках праць міжнародних конференцій і 7 патентів України.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг становить 166 сторінок, з яких основний текст на 131 сторінці. Робота містить 66 рисунків та 6 таблиць.

# РОЗДІЛ 1

## СТАН ПРЕДМЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ І ФОРМУЛЮВАННЯ ВИРІШУВАНИХ ЗАВДАНЬ

### 1.1 Особливості експлуатації та класифікація паливних систем суднового малооборотного дизеля

Систему підготовки і подачі палива можна розділити на систему низького тиску і систему високого тиску [29, 34, 35, 48, 50, 52, 58, 95, 96].

Паливна система низького тиску представляє частину паливної системи дизеля для прийому, підготовки і подачі палива до паливної системи високого тиску і включає в себе цистерни, фільтри, насоси, змішувачі, сепаратори, гомогенізатори, підігрівачі і паливопроводи. Однак, на склад системи низького тиску істотно впливає паливо яке використовується. Найбільш важливо підтримувати постійний тиск і в'язкість палива на всіх режимах роботи дизеля, для цього на паливних насосах встановлені редуційні клапани.

Паливна система високого тиску – це частина паливної системи дизеля для нагнітання палива в камери згоряння. Система високого тиску здійснює впорскування палива в камеру згоряння двигуна і включає в себе паливний насос високого тиску (ПНВТ) і форсунку, зазвичай з'єднані паливопроводом високого тиску. В сучасних дизелях з електронним управлінням автоматизована система подачі палива в циліндр дозволяє змінювати фази і закон подачі палива значно впливаючи на економічну і екологічну ефективність дизеля.

Класифікаційна схема основних типів паливних систем високого тиску представлена на рис. 1.1. Основні напрямки паливних систем високого тиску що розвиваються – це акумуляторна система, що застосовується фірмою Wartsila і система безпосереднього дії з



гідроприводом паливного насоса, яка використовується фірмою MAN-B & W, які дозволяють оптимізувати закон і фазу подачі палива, тим самим підвищивши ефективність дизеля [55, 63].

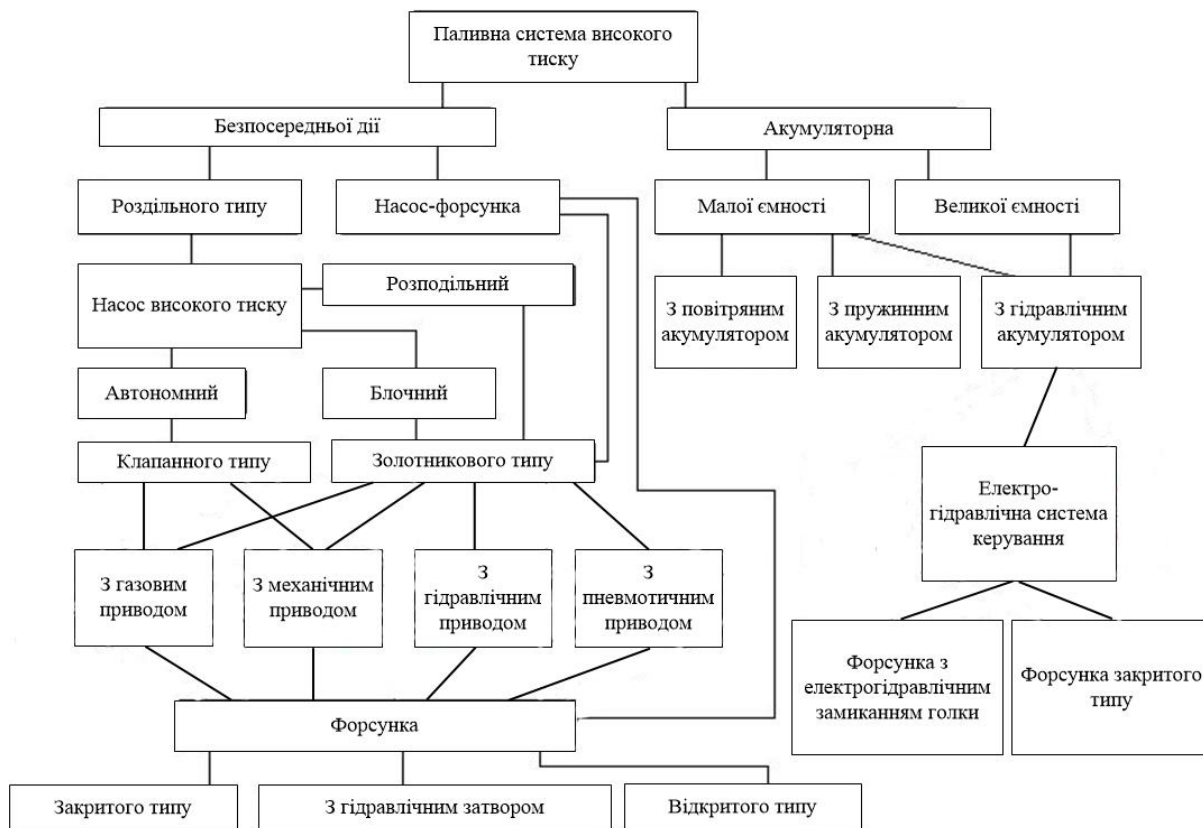


Рис. 1.1. Класифікаційна схема паливних систем високого тиску

Електронна система двигуна включає датчики [39, 47, 54, 57, 94]:

- рівня охолоджуючої рідини і її температури;
- тиску і температури палива;
- тиску повітря на виході з компресора агрегату наддуву;
- температури повітря на вході в компресор агрегату наддуву;
- частоти обертання колінчастого вала,

а також мікропроцесор і інші електронні компоненти.

Аналогічні системи розроблені практично усіма зарубіжними провідними виробниками суднових дизельних двигунів.

Так, наприклад, фірма MTU розробила систему «Monitoring and remote control for MTU ship propulsion systems», фірма Mitsui систему «Multipurpose controller for electronic control engine & electronic control units» [3, 8, 13].

В останні роки все ширше використовуються на морському флоті так звані інтелектуальні дизельні двигуни, розроблені ТНК Wartsila (двигуни серії Sulzer RT-flex) та MAN Diesel & Turbo (двигуни серії ME), що забезпечують електронне управління паливоподачею (Common Rail), фазами газорозподілу, лубрикаторною системою мастила і ін. (рис. 1.2).

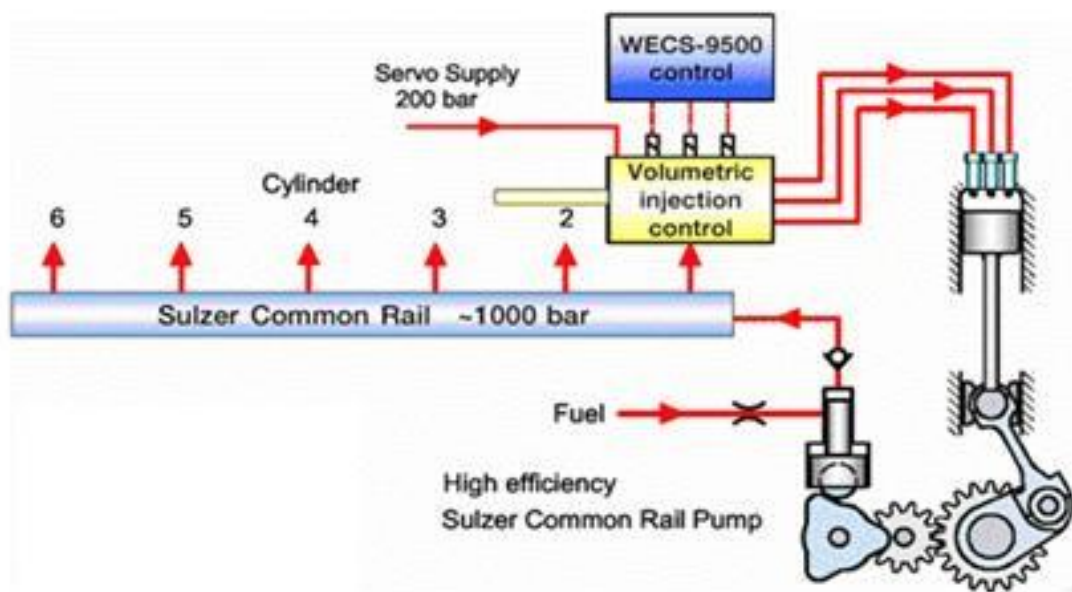


Рис. 1.2. Система електронного управління подачею палива дизельних двигунів Серії Sulzer RT-flex [21].

Електронна система управління двигунів Wartsila типу RT-flex, складається з акумулятора палива і електронно-керованих клапанів, що розподіляють паливо по форсунках [15–19, 58]. Акумулятор представляє собою товстостінну трубу, що йде по всій довжині двигуна на рівні кришок циліндрів, в якій розміщується необхідний для впрыскуваннн обсяг палива, що знаходиться під тиском до 1000 бар і пристрій демпфірування виникаючих в ній коливань тиску. Подача і стиснення палива до зазначеного тиску здійснюється в звичайних ПНВТ, плунжери яких

приводяться в дію 3-ехкулачковим приводним валом. З акумулятора паливо надходить до стандартних форсунок, відкриття і закриття голок яких відбувається звичайним шляхом під тиском палива, яке потрапляє до кожної з них від блоку управління подачею палива (БУПП). Останній встановлює момент відкриття голки - кут випередження, кількість палива, що впорскується і форму кривої подачі палива.

Управління БУПП здійснюється за допомогою електронної системи управління WECS-9520 (Wartsila Engine Control System), що має модульне виконання з окремим контролером для кожного циліндра (рис. 1.3) [17]. Три форсунки в кожному циліндрі керуються незалежно одна від одної і програмується на роботу кожна окремо або одночасно.

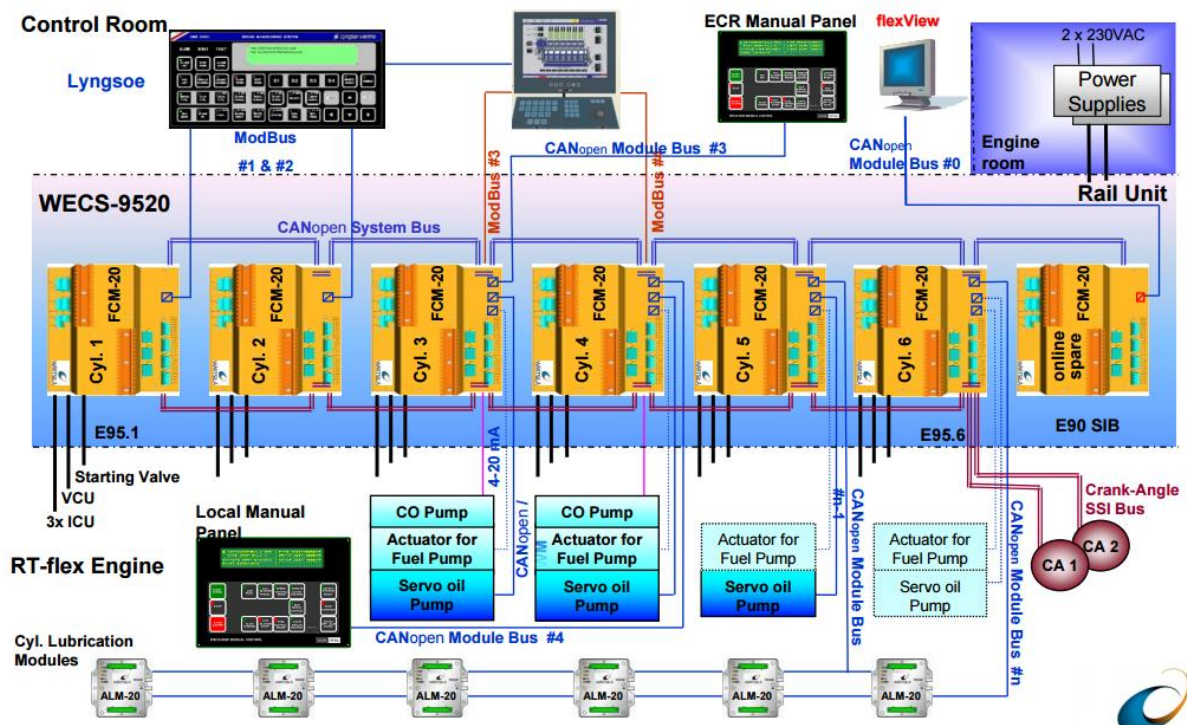


Рис. 1.3. Структурна схема комп'ютерної системи управління WECS-9500

WECS-9500 є електронною системою управління, яка побудована на базі модулів FCM-20 (рис. 1.4, 1.5).

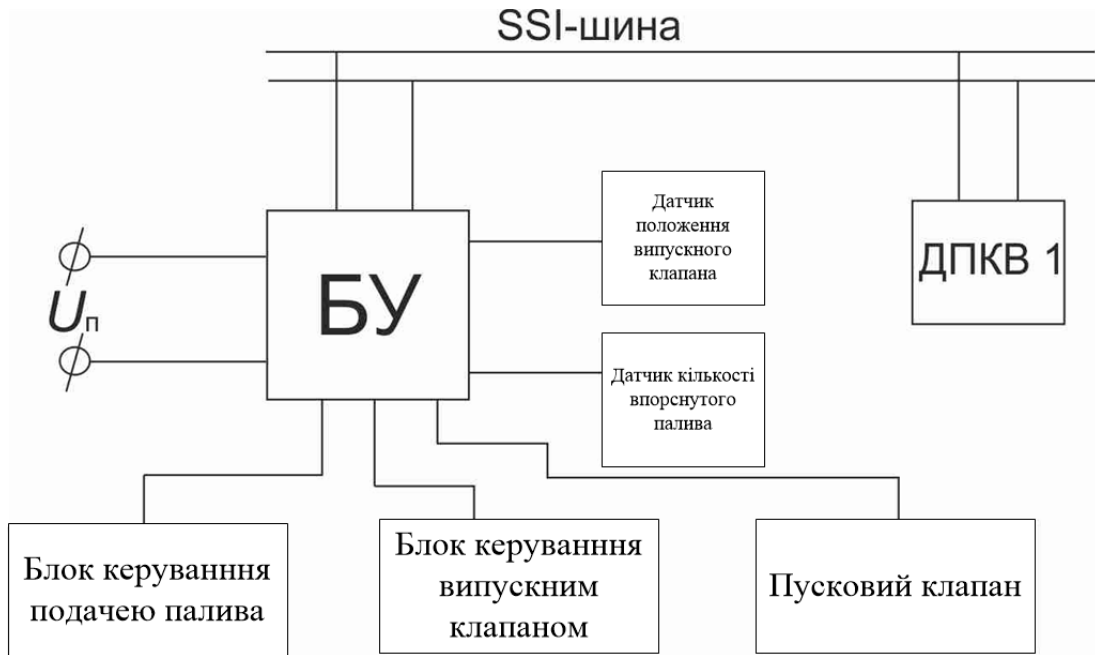
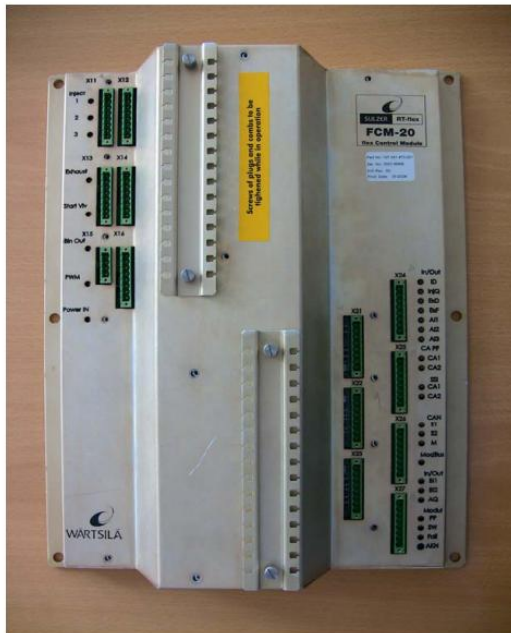


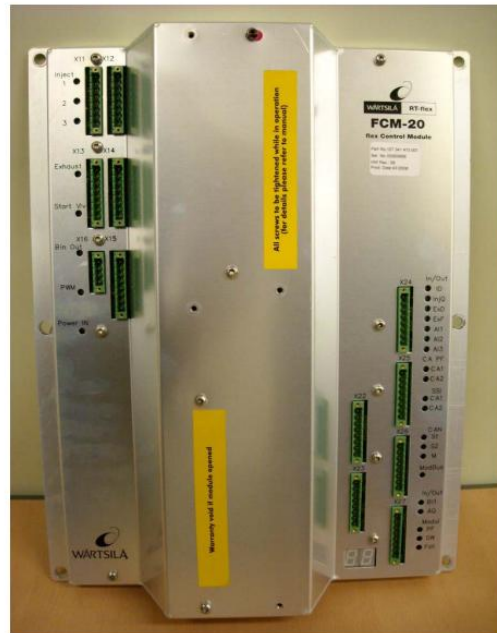
Рис. 1.4. Схема управління циліндром двигуна фірми Wartsila типу RT-flex:

БУ – блок управління FCM-20,

ДПКВ – датчик положення колінчастого валу



а)



б)

Рис. 1.5. Зовнішній вигляд модулів FCM-20:

а – HW версії 004; б – HW версії 006

Для управління пусковим клапаном, випускним клапаном і БУПП використовуються електромагнітні швидкодіючі клапани двостороннього типу. Дві електрокатушки встановлені на корпусі клапана, кожна з яких приводить в дію клапан в одному напрямку. Керуючий сигнал не може подаватися до катушки клапана довше 4 мс (нормально  $\sim 1$  мс) через дії великих струмів (50-60 А) і теплового навантаження. Цей час задається, контролюється і обмежується за допомогою WECS-9520. Дані клапани зберігають своє становище до тих пір, поки не буде подано сигнал на переміщення в зворотньому напрямку.

Будь-який дефект або заїдання клапана ведуть до неправильної роботи паливних форсунок або випускних клапанів. Несправність виявляється за допомогою WECS-9520, в результаті чого формується сигнал на систему безпеки двигуна, яка в свою чергу знизить обороти двигуна до самого малого ходу.

Паливо подається в циліндри від акумулятора, куди його нагнітають паливні насоси високого тиску, які приводяться в дію за допомогою кулачкового вала. ПНВТ об'єднані в одному блоці і встановлені в V-образному вигляді, по чотири насоса з кожного боку. Насоси подають паливо під високим тиском в проміжний колектор, звідки воно потім потрапляє в акумулятор, в якому підтримується тиск близько 1000 бар.

Приведена потужність паливних (8 шт.) і масляних насосів (6 шт.), що використовуються для забезпечення роботи двигуна 12RT-Flex96С становить по 500 кВт [40] відповідно на номінальному режимі.

Об'єм акумулятора підбирають таким чином, щоб тиск палива залишався постійним на протязі всієї роботи двигуна. Крім того, постійний тиск в паливному акумуляторі забезпечує хороший розпил палива. Перед пуском і під час самого пуску виконавчі механізми налаштовані на 95% від повної продуктивності і тиск в акумуляторі буде відрегульовано приблизно на 700 бар на малих навантаженнях. Після того як двигун буде виведений на нормальне навантаження, тиск буде підвищено до 1000 бар.

На кожній кришці циліндра встановлено по три форсунки і паливо подається до них з акумулятора через БУПП, керованого трьома електромагнітними клапанами.

Золотниковий клапан діє як відкриваючий або закриваючий клапан, і коли він знаходиться у відкритому положенні, керуюче масло надходить до золотника блоку управління подачею палива. Клапан блоку управління подачею палива відкривається і дозволяє пройти паливу під високим тиском від акумулятора до форсунки.

Коли *WECS-9520* подає сигнал керуючому клапану закритися, він перекидає підведення масла до золотника блоку управління подачею палива, припиняючи його впорскування. Керуюче масло подається з масляного акумулятора, в якому підтримується постійний тиск 200 бар.

Система *WECS-9520* управляє подачею палива за допомогою електронного модуля *FCM-20*, який контролює не тільки початок і кінець подачі, але і кількість уприснутого палива. Датчик кількості палива відміряє величину реально уприснутого палива і цю інформацію передає системі управління.

При нормальній роботі за кілька градусів до того, як поршень досягне верхньої мертвої точки блок *FCM-20* розраховує кут початку подачі палива з урахуванням роботи блоків *VIT* і *FQS*. Після цього додається час запізнювання, щоб компенсувати різницю в часі між подачею сигналу на уприскування і дійсним початком впорскування. Час нечутливості вимірюється протягом самого циклу подачі палива за допомогою порівняння часу подачі сигналу і часу реакції датчика кількості палива. Датчик кількості поданого палива забезпечує зворотний зв'язок. При досягненні необхідного значення впорскування закінчується.

Вважається, що подача палива починається після переміщення поршня датчика палива на 4% його повного ходу. Час, що минув від моменту подачі сигналу на впорскування палива до цієї точки, називається запізненням початку уприскування.

Після подачі сигналу на припинення подачі палива поршень все ще продовжує рух до закінчення запізнювання кінця подачі. Перевищення кількості необхідного палива компенсується регулятором частоти обертання коригуванням сигналу кількості необхідного палива до тих пір, поки не буде досягнута необхідна частота обертання.

Система управління вираховує кількість палива, необхідне для нормальної роботи двигуна на заданому режимі, і подає сигнал для вприскування відповідної кількості палива. Система подачі палива стежить за кожним циклом і при необхідності вносить зміни в наступний цикл.

Роботу електромагнітних керуючих клапанів контролює система *WECS-9520*, яка встановлює кут випередження, кількість палива, що вприскується і форму кривої подачі палива відповідно до режиму роботи двигуна. У нормальному стані працюють всі три форсунки, відкриття і закриття головок яких відбувається звичайним шляхом під тиском палива, проте їх можна так само запрограмувати на роботу поодиноці. У разі якщо одна з форсунок або її система активації вийде з ладу, двигун може продовжувати роботу з двома іншими форсунками.

На малих навантаженнях двигуна одна або дві форсунки на кожному циліндрі можуть бути відключені. Це робиться для того, щоб зменшити витрату палива і забезпечити бездимне згоряння.

До подачі сигналу блок управління знаходиться в положенні, при якому клапан і демпфуючий поясок закриті, а клапан поповнення відкритий. Отже, тиск в правій і лівій порожнини поршня датчика уприснутого палива однакові, але через різницю площ в правій і лівій порожнині, поршень буде переміщатися вліво в початкове положення.

При переміщенні поршня золотника на 0,01 ... 0,08 мм відбудеться відкриття клапана, проте, так як демпфуючий клапан залишається закритим, тільки невеликі протікання палива можуть потрапити до форсунки. При цьому клапан поповнення відкритий, а демпфуючий поясок



на випадок внутрішніх пошкоджень блоку управління закритий, запобігаючи потрапляння палива з акумулятора в циліндр,

Подальше переміщення приводного поршня на 0,08 ... 1,6 мм призведе до закриття клапана поповнення, але через те, що демпфуючий поясок все ще закритий, уприскування палива не почнеться.

Переміщення поршня на величину більше 1,6 мм відкриє прохід палива безпосередньо до форсунки через демпфуючий поясок. При цьому тиск в правій порожнини поршня датчика стане менше, ніж в лівій і поршень почне переміщатися вправо, виштовхуючи паливо до форсунки. При досягненні тиску палива перед форсункою 375 бар голка форсунки підніметься і перекриє дренаж, забезпечуючи подачу палива в циліндр.

**Переваги акумуляторної системи подачі палива [27, 31, 36–38, 68]:**

- паливний насос високого тиску конструктивно простіше;
- управління тиском вприскування, фазами подачі палива і газорозподілу здійснюється незалежно одне від іншого і оптимізовано для широкого діапазону робочих режимів;
- можливість відключення окремих форсунок на режимах самого малого ходу;
- гарна якість розпилу, внаслідок сталості тиску палива перед форсунками;
- зниження емісії твердих частинок і викидів NOx;

**Недоліки акумуляторної системи подачі палива:**

- відсутність можливості управління тиском палива перед форсункою протягом циклу подачі палива;
- ненадійність допоміжної гідравлічної системи, що призводить до протікання мастила, яке стикаючись з гарячими поверхнями, коксується і, як наслідок, призводить до відключення циліндра [20];
- наявність великої кількості паливних і масляних насосів, що приводяться в дію від двигуна, і відповідно підвищують витрату палива.



Перераховані недоліки обмежують подальше підвищення енергетичної та екологічної ефективності дизеля.

Фірма MAN-B & W пішла шляхом створення електро-гідравлічної автоматизованої системи управління паливним насосом високого тиску, намагаючись уникнути зазначених недоліків [9, 10, 14].

Так, для забезпечення оптимального згоряння (відповідно і теплового ККД) необхідний оптимальний закон подачі палива, який задається формою паливного кулачка в традиційних дизелях. Довгоходові двотактні дизеля спроектовані для роботи при певному максимальному тиску згоряння, а момент подачі палива змінюється для того щоб досягти цього тиску при даній паливній системі (кулачок, ПНВТ, форсунка і ін.).

Для сучасних дизелів, оптимальна тривалість уприскування палива при повній потужності складає приблизно 18 - 20° повороту колінчастого валу, а максимальний тиск згоряння досягається у другій половині цього періоду. Для досягнення найкращого теплового ККД паливо, подане після досягнення максимального тиску згоряння має бути подане (і спалене) якомога швидше для того щоб домогтися найвищого коефіцієнта розширення.

Таким чином, оптимальна характеристика подачі палива повинна підвищувати швидкість подачі до закінчення вприскування, відповідно подаючи паливо що залишилося якомога швидше. Це було доведено протягом багатьох років розвитку системи подачі палива 2-ухтактних дизелів і сучасний розподільний вал спроектований відповідно. Система подачі палива «інтелектуального двигуна» спроектована таким же чином, але на відміну від дизелів з розподільним валом, вона може бути оптимізована для роботи на різних режимах.

Акумуляторна система подачі палива з соленоїдними двопозиційними клапанами, в даний час, вже стала стандартною у багатьох сучасних судових дизелях. Однак, вона забезпечує іншу форму характеристики подачі палива, відмінну від оптимальної. Тиск в акумуляторі

дорівнюватиме заданому на початку впорскування і буде знижуватися під час впорскування, так як витрата палива з акумулятора відбувається значно швидше, ніж його наповнення.

Наприклад, тривалість впорскування в 8-міцільндровом двигуні складе  $160^\circ$  п. к. в. ( $8 \times 20^\circ$  п. к. в.), в перебігу яких в двигун з акумулятора буде подано таку ж кількість палива, що і паливні насоси подадуть в акумулятор за  $360^\circ$  п. к. в. Отже, витрата з акумулятора відрізняється від притоку в  $360/160 = 2,25$  рази протягом одного і того ж проміжку часу. Отже, тиск в акумуляторі буде знижуватися протягом впорскування, що в свою чергу суперечить оптимальній характеристиці подачі палива. Як варіант, було запропоновано використовувати ступінчасту акумуляторну систему, відповідно до якої витрата палива в перебігу початкового періоду зменшений, так як форсунки відкриваються не одночасно, а одна за одною.

Таким чином, система подачі палива безпосередньої дії з гідроприводом ПНВТ перевершує акумуляторну систему, будь то ступінчаста або проста. Випробування підтвердили, що дана система може реалізувати будь-яку закономірність подачі палива, необхідну для роботи дизеля. Наприклад, як одинарний впорск, так і попередній впорск з широким діапазоном свободи вибору швидкості подачі, часу початку подачі палива, тривалості та величини тиску.

Для приведення в дію паливного насоса застосована акумуляторна система сервомасла, що використовує охолоджене і очищене масло в якості проміжного приводу. Гідравлічний модуль кожного циліндра оснащений акумулятором масла для забезпечення досить швидкого нагнітання масла відповідно до вимог паливної системи, а також для запобігання сильних коливань тиску.

Система, що замінила розподільний вал, включає в себе масляні насоси високого тиску, що приводяться в дію двигуном через зубчасту передачу, які забезпечують енергією гідравлічно керовані блоки подачі палива і приводу випускного клапана, встановлені по одному на кожен

циліндр. До запуску двигуна тиск в системі сервомасла створюється за допомогою електроприводних насосів.

Сумарна гідравлічна потужність насосів використовуваних для забезпечення двигуна 12K98ME серво маслом становить 2,5 МВт [2] на номінальному режимі, що при ККД аксіально-плунжерного насоса в 80%, відповідає приведеній потужності 3,1 МВт, що відбирається від двигуна.

Переміщенням плунжера паливного насоса і випускного клапана управляє швидкодіючий пропорційний клапан (в літературі зустрічається його позначення як FIVA-valve – FuelInjectionValveActivation), який в свою чергу управляється лінійним електромотором, який отримує керуючий сигнал від електронної системи управління. При переміщенні золотника вліво FIVA-valve працює як двопозиційний клапан, приводячи в дію випускний клапан. У разі переміщення вправо діє як пропорційний клапан, що дозволяє управляти характеристикою подачі палива, дроселюючи сервомасло, що подається під плунжер паливного насоса (рис. 1.6).



Рис. 1.6. Система управління пропорційним швидкодіючим клапаном: 1 - блок управління циліндром, 2 - пропорційний клапан, ПНВД - паливний насос високого тиску

Закономірності подачі палива можуть бути збережені в пам'яті керуючого контролера і застосовані системою управління з тим, щоб

забезпечити роботу двигуна за оптимальною характеристикою впорскування від «самого малого» ходу до перевантаження, так само як робота на задній хід і аварійне реверсування. Зміна характеристик впорскування може відбуватися майже миттєво, від одного циклу до іншого.

**Переваги системи безпосередньої дії з гідроприводом паливного насоса в порівнянні з акумуляторною системою [54]:**

- можливість забезпечити будь-яку форму характеристики подачі палива, що підвищує гнучкість в управлінні дизелем;
- менша кількість акумуляторів і, як наслідок, протікання палива і мастила.

**Недоліки системи безпосередньої дії з гідроприводом паливного насоса в порівнянні з акумуляторною системою:**

- відсутність можливості відключення окремих форсунок на режимах малого ходу;
- більш висока приведена потужність масляних насосів.

Порівняння згаданих автоматизованих систем управління наочно представлено в табл. 1.1. Для порівняння чисельних характеристик зі всієї великої кількості двигунів, нами обрані двигуни WARTSILA12RT-Flex96C і MAN-B & W 12K98ME володіють схожими конструктивними параметрами і однаковою номінальною потужністю.

Аналізуючи описані автоматизовані системи управління подачею палива видно, що обидві системи використовують гідропривід виконавчого органу, що дозволяє отримувати великі перестановочні зусилля і високу швидкодію. Так, в акумуляторній системі застосовуються соленоїдні клапани, які забезпечують тільки два положення виконавчого органу і не дозволяють змінювати тиск палива протягом циклу, тим самим обмежуючи кількість застосовуваних законів подачі палива. При цьому відбір потужності паливними і масляними насосами не перевищує 1,5% потужності двигуна. У свою чергу, система подачі палива безпосереднього

дії з гідроприводом паливного насоса, дозволяє задати будь-яку форму закону подачі палива, оптимізуючи робочий процес дизеля для роботи на різних режимах і в різних умовах, але при цьому відбір потужності масляними насосами від двигуна досягає 4,6% його номінальної потужності.

Таблиця 1.1. – Порівняльні характеристики автоматизованих систем управління подачею палива фірм MAN-B & W і WARTSILA

	MAN-B&W	WARTSILA
Можливість зміни тиску палива перед форсункою протягом циклу подачі палива	Є	Немає
Можливість відключення окремих форсунок на режимах малого ходу	Немає	Є
Приводная потужність паливних і масляних насосів навішені на двигун	Масляні $\approx 3100$ кВт Топливные – нет	Масляні $\approx 500$ кВт Паливні $\approx 500$ кВт
Переміщення виконавчого органу подачі палива	Плунжер ПНВТ – 5...15 см	Золотник БУПП – 4 мм
Кількість акумуляторів	1	3

Таким чином, подальше підвищення ефективності автоматизованої системи управління подачею палива, як варіант, можливо за рахунок удосконалення виконавчого механізму, шляхом виключення гідроприводу.

Для подальшого дослідження обрана АСУ фірми WARTSILA, так як вона володіє можливістю окремого відключення форсунок на відміну від автоматизованої системи управління фірми MAN-B & W.

## 1.2. Типи приводів виконавчих механізмів

1.2.1. Аналіз існуючих типів приводів. Незважаючи на те, що гідравлічна система відповідає вимогам, що пред'являються, їй притаманні такі недоліки:

- високе енергоспоживання;
- високі масо-габаритні показники;
- необхідність окремого джерела енергії (насос);
- велике число масляних трубопроводів під тиском;
- протікання масла, які при зіткненні з високотемпературними поверхнями закоксовуються, що не раз призводило до відключення циліндра;
- висока металоємність.

Застосування асинхронних електродвигунів змінного струму, що володіють відносною простотою і невисокою вартістю, обмежена низьким ККД (80 - 82%), вібрацією і високими вимогами до балансування ротора через його високої частоти обертання [28, 37].

Однофазні синхронні електродвигуни позбавлені недоліків асинхронних, однак володіють великим магнітним полем навколо двигуна, низьким ККД (80 - 85%) і значними розмірами і [28, 37].

Крім того, забезпечити необхідну точність позиціонування і швидкодії не здатні ні синхронний, ні асинхронний двигуни, а необхідне велике зусилля, що розвивається, особливо при запуску двигуна, призведе до зростання струму і габаритів двигуна.

Колекторні і безколекторні (вентильні) двигуни мають високий ККД (більше 90%), простотою системи регулювання і можуть забезпечити необхідні зусилля і точність. Однак, проведені дослідження [28, 37, 91] показали, що вони володіють недостатнім швидкодією, а також високою вартістю, розмірами і обмеженим терміном служби.

Використання електромагнітів і магнітострикційних матеріалів

обмежено необхідним високим зусиллям і швидкодією, так як для їх забезпечення буде потрібен привід з високими маса-габаритними показниками і великим струмом управління [28, 37].

Удосконалення виконавчих механізмів електромагнітного типу в конструкторсько-технологічному напрямі в даний час практично вичерпані, що не створює перспективи в їх застосуванні [4–6, 28, 37, 90, 91]. Тому очевидна актуальність розробки систем управління з виконавчими механізмами на базі нових фізичних принципів.

1.2.2. Використання п'єзоелектричних приводів. Одним з фізичних принципів перетворення електричної енергії в механічне переміщення є п'єзоелектричні перетворення. Під дією електричної напруги, завдяки зворотному п'єзоефекту, при використанні п'єзоелементів вдається отримати механічне переміщення виконавчих механізмів.

Таким чином, перспективним є дослідження приводу на базі п'єзоелектричних перетворювачів, принцип дії яких заснований на перетворенні високочастотних коливань, створюваних за рахунок зворотнього п'єзоефекту, в поступальний або обертальний рух робочого органу. Такий принцип дії і високі частоти п'єзопривода призводять до якісної зміни процесів в пристроях, а також до нових явищ, які не спостерігаються в приводах електромагнітного типу.

Раніше застосування п'єзоприводів розглядалося [53, 64, 89] тільки для створення мікропереміщень при невеликому зусиллі. Причини, які перешкоджали застосуванню п'єзоелектричних приводів на транспорті:

- нелінійна АЧХ ПЕ (рис. 1.7), що обумовлює роботу ПЕ - основного елемента приводу або на частоті резонансу, або на вузькій лінійній ділянці до 20 кГц;

- оскільки маніпулятор виконує довільні рухи, то діапазон переміщень різко зменшується в порівнянні з роботою на частоті резонансу;

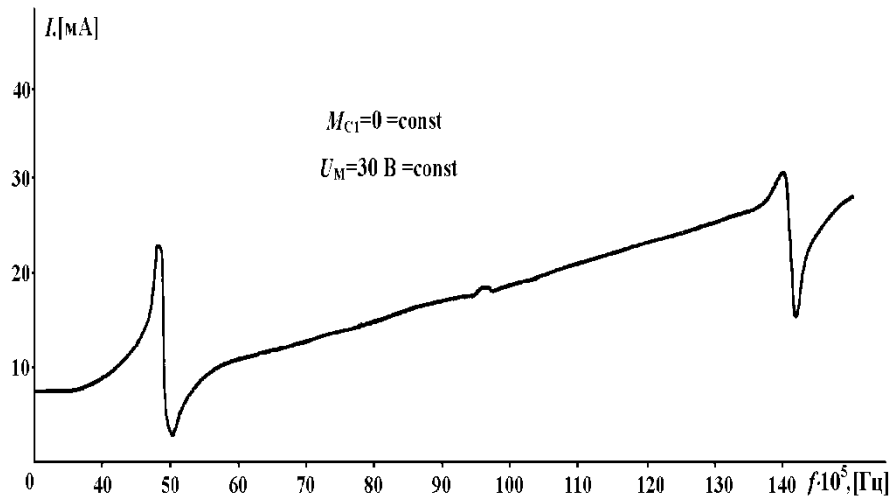


Рис. 1.7. Амплітудно – частотна характеристика ПЕ

- наявність гістерезису і сильної залежності переміщення від ступеня навантаження (рис. 1.8);

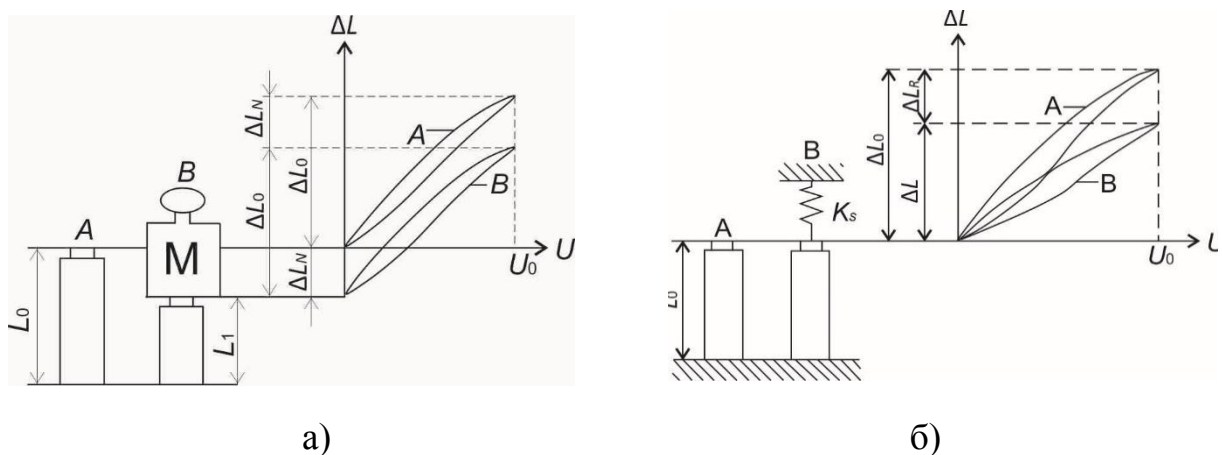


Рис. 1.8. Гістерезис і залежність переміщення при дії: а - постійного навантаження; б - змінного навантаження

- сильна залежність переміщення від температури навколишнього середовища (рис. 1.9), проте, на даний момент проводиться високотемпературний тип п'єзокераміки, здатний не втратити своїх властивостей до  $350^{\circ}\text{C}$ ;

- повзучість кераміки, яка зменшується за рахунок попереднього навантаження;



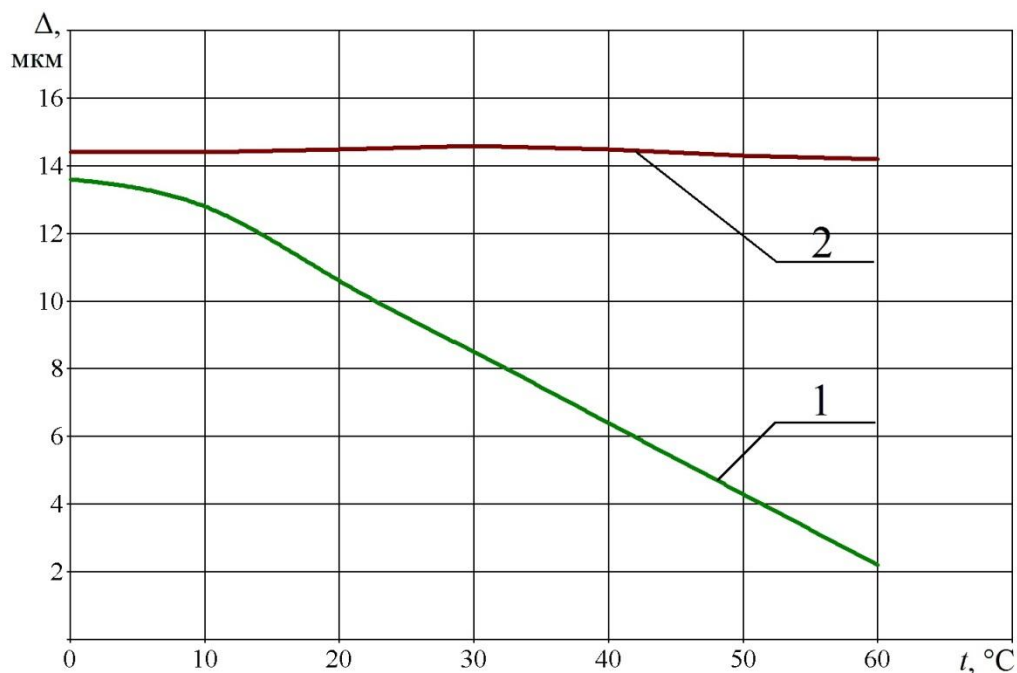


Рис. 1.9. Залежність переміщення від температури:  
1 – магнітострикційних матеріалів, 2 – п'єзокераміки

- малі переміщення вимагають дорогих оптичних датчиків;
- властивості п'єзоманіпуляторів поєднуються зі слабким внутрішнім демпфуванням, наслідком чого є їх сильна коливальність в перехідних процесах зміни керуючого поля і механічного навантаження.

Переваги п'єзопривода впливають з його конструктивних рішень [53, 64, 89]:

- відсутність обмоток і простота технології виготовлення;
- високі пускові моменти і питома потужність (123 Вт / кг у ПЕД і 19 Вт / кг у електромагнітних мікродвигунів);
- великий ККД - до 54%;
- не боїться короткого замикання на механічній стороні (не потрібна муфта);
- плавна зміна швидкості без редуктора;
- лінійна механічна характеристика;
- одночасне протікання прямого і зворотного п'єзоефектів забезпечує

високу чутливість до зміни моменту навантаження, що дозволяє оцінити ступінь навантаження двигуна.

Однак, маючи такі властивості, п'єзоелектричний привід тривалий час не знаходив широкого застосування через неможливість вимірювання параметрів руху золотника блоку управління подачею палива з необхідною точністю.

І тільки з появою оптичних конфокальних датчиків положення і кута [43, 44, 102] і успіхам, досягнутим в підвищенні роздільної здатності датчиків на штрихових позначках стало можливим застосування п'єзоелектричних маніпуляторів і двигунів в пристроях, де діапазони переміщень складають 2-5 мм.

Слід зазначити, що в традиційних ЕМС при мікропереміщеннях і низьких швидкостях наступають явища, які з'являються у вигляді нерегулярних коливань в напрямку руху і є наслідком складної взаємодії нелінійного тертя і мікропружностей в зоні контакту частин ЕМС, які здійснюють відносне переміщення. Зусилля тертя визначається матеріалом, станом поверхностей, часом їх знаходження у взаємно нерухомому положенні і т.п.

Великий вплив на процес вимірювання мікропереміщень надають теплові та вібраційні обурення, які при макропереміщеннях найчастіше просто не враховуються. Вібраційні обурення, як правило, мають порівняно високочастотний спектр.

З огляду на переваги п'єзоприводи в порівнянні з електромеханічним, пнево- і гідроприводами в роботі поставлено завдання розробити теоретичні та практичні положення, які дозволять розробляти п'єзоелектричні приводи виконавчих механізмів паливних систем високого тиску.

### **1.3. Загальна методика дисертаційного дослідження**

1.3.1. Вибір теми наукового дослідження. Вибір напрямку наукового дослідження заснований на проведеній експертній оцінці можливих варіантів вирішення задачі зниження аварійності та поліпшення роботи систем позиціонування виконавчих механізмів подачі палива за наступними критеріями: актуальність, наукова новизна, економічна ефективність, відповідність паспорту спеціальності, а також основних напрямках наукової спеціальності і наукової школи [1, 10, 98].

Виконана експертна оцінка значимості досліджень по технологічному вдосконаленню елементів системи позиціонування виконавчих механізмів показала, що на сучасному етапі розвитку суднових систем управління подачею палива, даний варіант вирішення поставленого завдання всебічно вивчений і не є актуальним.

Конструкційне вдосконалення елементів застосовуваних систем управління в даний час також досягло свого максимуму.

За результатами експертних оцінок найбільш оптимальним і доцільним слід визнати варіант поліпшення системи управління подачею палива шляхом застосування приводів на базі нових фізичних принципів, в зв'язку з цим саме на його розвиток направлено наукове дослідження і тема дисертації.

З огляду на обраний напрям наукового дослідження, а також на підставі результатів аналізу інформаційного пошуку, виконаного в першому розділі, була визначена тема наукового дослідження - створення судової системи для поліпшення системи подачі палива судового дизеля на базі п'єзоперетворювачів.

Основним обґрунтуванням вибору теми досліджень також є наступне:

- судові дизеля, обладнані акумуляторною системою подачі палива з електронним управлінням, широко застосовуються на різних типах торгових судів в якості як головних, так і допоміжних двигунів;

- в ході їх експлуатації виникають ситуації, при яких знижується безпечна і ефективна робота судна, внаслідок раптового виходу з ладу гідравлічного приводу виконавчих механізмів, що призводить до зупинки двигуна;

- втрата управління судном в складній навігаційній обстановці, з огляду на зупинки головного двигуна, може привести до трагічних наслідків, багатомільярдних втрат і техногенної катастрофи.

Важливість проведення досліджень, пов'язаних з питаннями підвищення безпеки плавання, підтверджується програмою економічних реформ, що проводяться в Україні, а також Транспортною стратегією України на період до 2020 р, зокрема, "Забезпечення безпеки транспортних процесів шляхом впровадження сучасних інформаційних технологій", "Підвищення екологічності і енергоефективності транспортних засобів шляхом оптимізації терміну експлуатації, технічного обслуговування і ремонту транспортних засобів " (розп. КМУ № 2174 від 20.10.2010 р.).

Актуальність теми дослідження базується на запиті практики про необхідність пошуку нових шляхів зниження аварійності та поліпшення системи подачі палива суднового дизеля.

Наукова спрямованість досліджень відповідає паспорту спеціальності; профілю досліджень, що проводяться кафедрою теорії автоматичного управління та обчислювальної техніки Національного університету "Одеської морської академії"; основними напрямками спеціальністю 05.13.05 - комп'ютерні системи та компоненти.

Наукові дослідження виконувались відповідно до тематики держбюджетної науково-дослідної роботи Національного університету "Одеської морської академії" по темі «Розробка п'єзоелектричного приводу широкого застосування». Результати досліджень, що увійшли в дисертаційну роботу, відображені в звіті в НДР №№ ДР 0109U001538, в розробці якого автор брав участь як виконавець окремих розділів.

Як **об'єкт дослідження** в дисертації обрані робочі процеси в комп'ютерній системі управління подачею палива дизеля.

**Предметом дослідження** є моделі, методи та засоби поліпшення системи подачі палива суднового дизеля.

1.3.2. Обґрунтування мети і завдань дисертаційного дослідження. З огляду на тему дисертаційного дослідження, була сформульована мета роботи - створення і вдосконалення теоретичної, програмно-технічної та апаратної бази судової системи управління подачі палива, що має високі функціональні та експлуатаційні якості, які забезпечують безпеку експлуатації суден торгового і військово-морського флотів.

Гіпотеза наукового дослідження полягає в тому, що підвищення енергетичної та екологічної ефективності двигуна можливо шляхом застосування п'єзоелектричного виконавчого механізму в складі комп'ютерної системи управління подачею палива суднового дизеля з електронним управлінням для підвищення безпеки експлуатації судна.

Головне завдання дисертаційного дослідження полягає в розробці апаратних і програмних засобів позиціонування виконавчих механізмів систем подачі палива на базі п'єзоелектричних перетворювачів.

Для вирішення головного завдання необхідне рішення ряду допоміжних завдань, а саме:

- провести аналіз відомих методів та моделей існуючих систем подачі палива і їх ефективності, обґрунтувавши на цій основі завдання дослідження і позначивши шляхи їх вирішення;

- розробити метод удосконалення комп'ютерної системи управління подачею палива шляхом впровадження приводу виконавчих механізмів на базі п'єзоперетворювачів;

- отримати моделі конструкцій компонентів комп'ютерної системи управління подачею палива на основі приводу виконавчих механізмів на базі п'єзоперетворювачів за рахунок застосування п'єзоелектричних

складальних стовпів та п'єзоелектричних роторних двигунів;

- розробити моделі та методи зменшення та усунення коливань систем управління подачею палива на основі приводу виконавчих механізмів на базі п'єзоперетворювачів;

- розробити конструкції приводів виконавчих механізмів на базі п'єзоперетворювачів, провести експериментальні дослідження.

Рішення головного завдання дисертаційного дослідження буде виконано шляхом синтезу наукових результатів рішення допоміжних завдань.

1.3.3. Системний підхід до розробки технологічної карти наукового дослідження. Системний аналіз і системний підхід до вирішення наукової задачі дозволяє оцінити всі фактори, що сприяють досягненню поставленої мети, і визначити оптимальні способи їх досягнення [24, 30]. Визначення "система" відноситься до філософської категорії наукового пізнання, а комплекс допоміжних завдань, що вирішуються в будь-якому дисертаційному дослідженні, переводить це поняття в категорію складних систем. При вирішенні науково-прикладних задач розглядаються складні системи, що складаються з великого числа окремих елементів, які знаходяться між собою у взаємозв'язку і взаємодії.

З урахуванням викладеного в дисертаційному дослідженні, був розроблений замкнутий цикл наукового дослідження, який системно представлений у вигляді технологічної карти дослідження, наведеної на рис. 1.10.

Тема дисертаційної роботи формується на основі "запиту практики" про необхідність пошуку нових шляхів покращення систем подачі палива судових дизелів, яка сприяє підвищенню безпеки судноплавства.

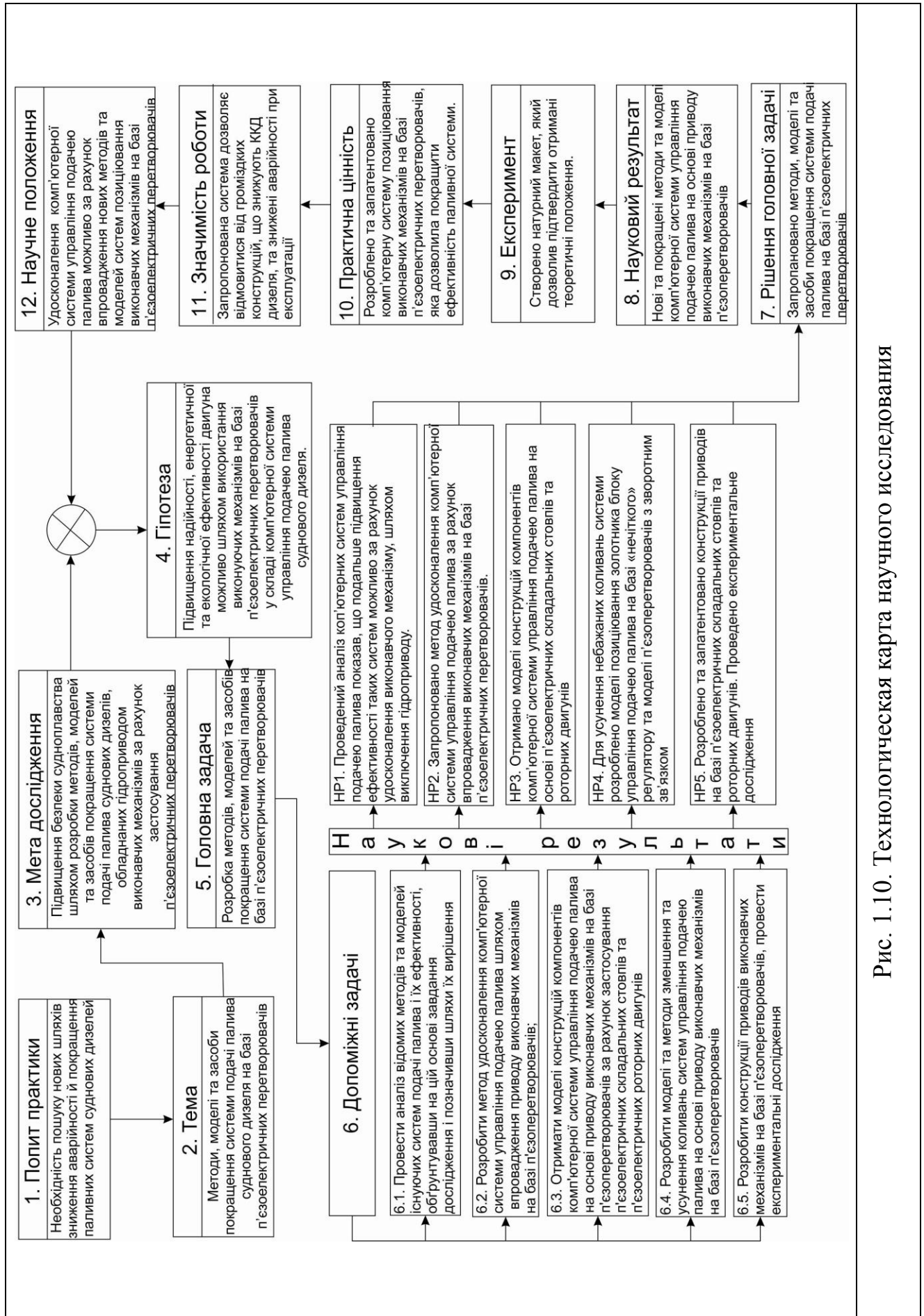


Рис. 1.10. Технологическая карта научного исследования

Тезою вирішення головного завдання є науковий прогноз про те, що зниження аварійності та поліпшення системи подачі палива суднового дизеля може бути досягнуто за рахунок застосування п'єзоелектричних перетворювачів.

У дисертаційному дослідженні висунуто і підтверджено наукове положення: поліпшення системи подачі палива суднового дизеля можливо за рахунок застосування п'єзоперетворювачів.

#### **1.4. Висновки до розділу 1**

1. Розглянуто системи подачі палива високого тиску, а саме: акумуляторної системи подачі палива і системи безпосереднього дії з гідроприводом паливного насоса. Відзначено їх недоліки та переваги. Зокрема, система подачі палива безпосереднього дії з гідроприводом ПНВТ перевершує акумуляторну систему, будь то ступінчаста або проста.

2. Розглянуто характеристики автоматизованих систем управління подачею палива фірм MAN-B & W і WARTSILA. Виявлено, що подальше підвищення ефективності автоматизованої системи управління подачею палива можливо за рахунок удосконалення виконавчого механізму, шляхом виключення гідроприводу.

3. Проаналізовано існуючі типи приводів: гідравлічні, із застосуванням асинхронних електродвигунів змінного струму, однофазних синхронних, колекторних і безколекторних (вентильних) двигунів; з використання електромагнітів і магнітострикційних матеріалів. Показано, що вдосконалення виконавчих механізмів електромагнітного типу в конструкторсько-технологічному напрямі в даний час практично вичерпані, що не створює перспективи в їх застосуванні, а значить - актуальна розробка систем управління з виконавчими механізмами на базі нових фізичних принципів.



4. Показана можливість використання п'єзоелектричних приводів. Розглянуто позитивні та негативні сторони їх використання, показані особливості їх застосування. В результаті визначення переваг п'єзоприводи в порівнянні з електромеханічним, пнево- і гідроприводами, в роботі поставлено завдання розробити теоретичні та практичні положення, які дозволять розробляти п'єзоелектричні приводи виконавчих механізмів паливних систем високого тиску.

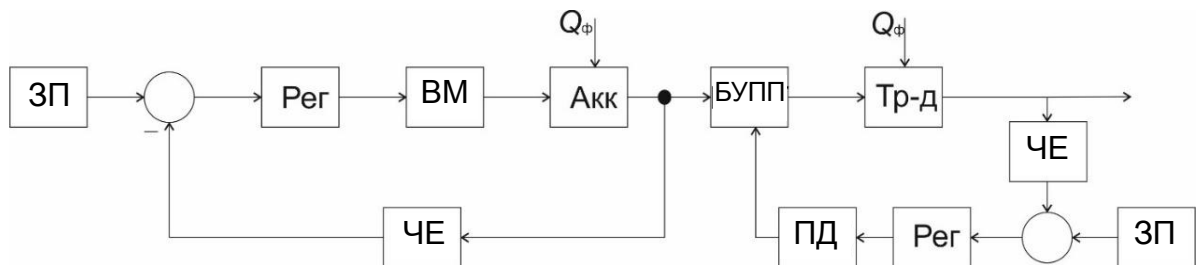
5. Проведено обґрунтування мети і завдань дисертаційного дослідження. Визначено гіпотеза, головна і допоміжні завдання. Отримано технологічна карта наукового дослідження.

## РОЗДІЛ 2

### РОЗРОБКА МОДЕЛЕЙ ТА МЕТОДІВ ПОКРАЩЕННЯ СИСТЕМ ПОДАЧІ ПАЛИВА СУДНОВОГО ДИЗЕЛЯ

#### 2.1. Формування вимог до виконавчих механізмів системи управління подачею палива

Акумуляторна система як об'єкт регулювання тиску палива (рис. 2.1) являє собою два трубопроводи послідовно з'єднаних через блок управління подачею палива (БУПП).



#### 2.1. Функціональна схема системи управління подачею палива

На рис.2.1 введені наступні позначення:

ЗП – задаючий пристрій;

Рег – регулятор;

Вм – виконавчий механізм;

Акк – акумулятор палива;

ЧЕ – чутливий елемент;

БУПП – блок управління подачею палива;

Тр-д – трубопровід;

ПД – п'єзоелектричний двигун;

$Q_0$  – витрати палива.

У першому трубопроводі (акумуляторі) тиск палива змінюється в залежності від режиму роботи двигуна і не залежить від закону подачі палива. Об'єм акумулятора підбирається так, щоб зменшити пульсації

тиску під час роботи двигуна. Так, на практиці встановлено, що для двигуна 12RT-flex96С він становить  $1,6 \text{ м}^3$ . Паливо в акумулятор подається плунжерними насосами, які приводилися в дію від двигуна через 3-х кулачкові шайби.

Другий трубопровід, що з'єднує акумулятор і форсунку, має порівняно малий обсяг ( $\approx 0,01 \text{ м}^3$ ), а тиск в ньому має змінюватися відповідно до однієї з отриманих характеристик подачі палива. Паливо до форсунки надходить з акумулятора через БУПП, впливаючи на який можна змінювати тиск палива перед форсункою.

На акумулятор і трубопровід діє збурення з боку витрат палива через форсунку. Тиск відкриття форсунки становить 38 МПа. Збуренням на акумулятор до відкриття форсунки можна знехтувати, так як воно занадто мало зважаючи на дуже малій ємності трубопроводу, що з'єднує акумулятор і форсунку.

Збурення, що впливає на трубопровід, який з'єднує акумулятор і форсунку, з боку витрат палива через форсунку визначається аналогічно, з припущеннями:

- прохідний перетин соплових отворів розпилювача постійно;
- подача палива відбувається при постійному середньому тиску в циліндрі.

БУПП має клапан з вбудованим датчиком об'єму поданого палива, золотник якого переміщається під дією складального стовпа п'єзоелектричних шайб, змінюючи витрату палива з акумулятора до форсунки.

Для визначення вимог до приводу золотника блоку управління подачею палива необхідно врахувати геометричні розміри приймаючого поршня. З особистого досвіду автора по обслуговуванню і ремонту судових дизелів відомо, що діаметр поршня складає  $d_{II} = 28 \text{ мм}$ , а його хід  $h = 4 \text{ мм}$ . Тиск масла управління  $P$  в існуючій гідравлічній системі 20 МПа.

Тоді площа поперечного перерізу приймаючого поршня блоку

управління подачі палива,  $\text{м}^2$ :

$$S_1 = \frac{\pi \cdot d_{II}^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 0,028^2}{4} = 6,154 \cdot 10^{-4} .$$

Зусилля, яке необхідно докласти до поршня, Н,

$$F_1 = PS_1 = 200 \cdot 10^5 \cdot 6,154 \cdot 10^{-4} \approx 12300 .$$

Таким чином, привід блоку управління подачею палива повинен забезпечувати зусилля 12,3 кН при переміщенні приймаючого поршня на 4 мм за час переміщення, що не перевищує 6,5 мс (як правило, близько 1 мс). Вплив на БУПП можливо через складальний стовп п'єзоелектричних шайб, роторний або лінійний п'єзоприводи [83–87].

## **2.2. Модель блоку управління подачею палива з приводом від складального стовпа п'єзоелектричних шайб**

Для повного виключення гідравліки з системи управління була розроблена конструкція п'єзопривода зі складального стовпа п'єзоелементів, в якій для збільшення переміщення приводу застосовано коромисло (рис. 2.2) [65, 69-71, 73, 77, 79].

Щоб домогтися переміщення золотника на 4 мм (ділянка  $A'B'$ ) при переміщенні приводу 0,18 мм (ділянка  $AB$ ) необхідно підібрати коромисло зі співвідношенням плечей 22,2. Тобто при довжині лівого плеча  $OA$  рівному 5 см, довжина правого  $OA'$  складатиме 1,11 м. Коромисла подібних розмірів використовувалися в приводних механізмах вихлопних клапанів, проте співвідношення їх плечей було рівним 1. Отже, вимоги до міцності пропонованого коромисла будуть значно вище, що негативно позначиться на масо-габаритних показниках системи і її вартості.

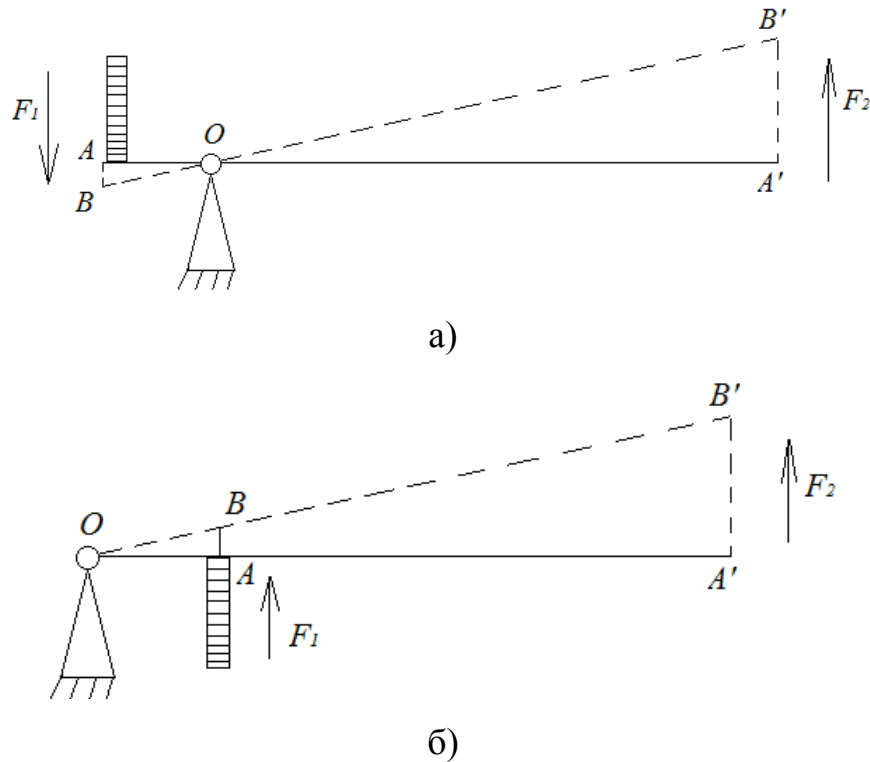


Рис. 2.2. Кінематична схема коромисла:

*a* – з точкою опори між кінцями;

*б* – з точкою опори на одному з кінців

Так як важіль знаходиться в рівновазі при умові, коли сили, що діють на нього, обернено пропорційні плечам цих сил, то для обертання коромисла привід повинен розвивати силу  $F_1$  в 22,2 рази більше ніж необхідно для переміщення золотника  $F_2$ .

Сила, яку необхідно прикласти до лівого плеча (точка  $A$ ) коромисла, Н:

$$F_1 = 12300 \cdot 22,2 = 273060.$$

Аналіз ринку п'єзоприводів показав, що наборні стовпи, розвиваючі таке зусилля, не виробляються. Як варіант можливо паралельне включення чотирьох стовпів моделі P-056.90 фірми PI Ceramic вироблених з матеріалу PIS 255, які при переміщенні 0,18 мм розвивають зусилля 78 кН кожен. При цьому загальна електрична ємність приводу збільшиться в 4 рази, що різко знизить швидкодію системи.

Аналіз існуючих передавальних механізмів показав, що найбільш раціонально застосування гідравлічної передачі у вигляді двох гідроциліндрів з'єднаних між собою.

На рис. 2.3 представлена схема гідравлічної передачі, де:

-  $S_1, d_1, h_1$ , – площа, діаметр і переміщення поршня веденого циліндра;  
 -  $S_2, d_2, h_2$ , – площа, діаметр і переміщення поршня провідного циліндра;

-  $V_1$  и  $V_2$  – об'єм масла під поршнем ведомого та ведучого гідроциліндрів відповідно;

-  $F_1$  и  $F_2$  – зусилля, що прикладене до поршня гідроциліндра, що ведеться і розвивається маніпулятором відповідно.

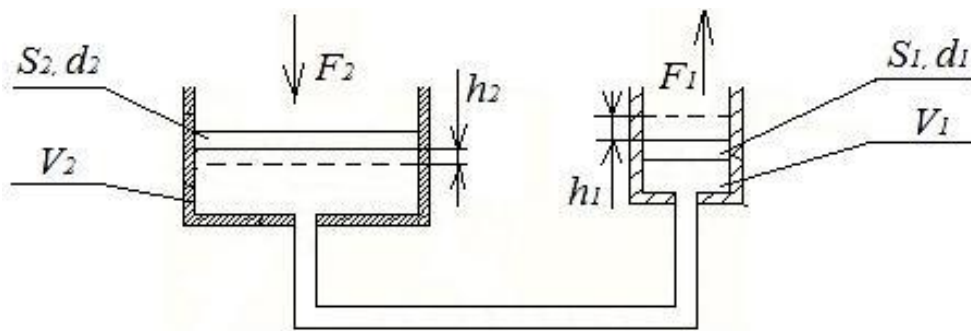


Рис. 2.3. Гідравлічна передача

Переміщення поршня, що ведеться, на гідроциліндр 3 на 4 мм вгору змінить обсяг порожнини масла на:

$$V_1 = S_1 \cdot h_1 = 2,46 \text{ см}^3.$$

Отже, зміна обсягу  $V_2$  порожнини масла під поршнем ведучого гідроциліндра 4 має бути таким же. Хід поршня ведучого циліндра задамо 0,18 мм, його діаметр:

$$d_2 = \sqrt{4V_1/(\pi \cdot h_2)} = 13,2 \text{ см},$$

тоді площа поперечного перерізу провідного циліндра:

$$S_2 = 136,8 \text{ см}^2.$$

Сила, яку необхідно прикласти до поршня відомого циліндра:

$$F_2 = F_1 \cdot S_1 / S_2 = 555 \text{ Н.}$$

Конструкція зі складального стовпа п'єзоелектричних шайб показана на рис. 2.4, де введені такі позначення:

- $F_C$  – статичне зусилля, що прикладене до виконавчого органу;
- $F_D$  – демпфуюче зусилля в п'єзоелементі;
- $F_{ДИН}$  – динамічне зусилля в п'єзоелементі;
- $F_{ПР}$  – зусилля пружної деформації;
- $F_E$  – зусилля в п'єзоелементі, що викликане прикладеним електричним полем;
- $l_0$  – товщина стовпа;
- $l_0$  – початкова товщина п'єзоелемента;
- $\delta$  – значення зміни товщини п'єзоелемента.

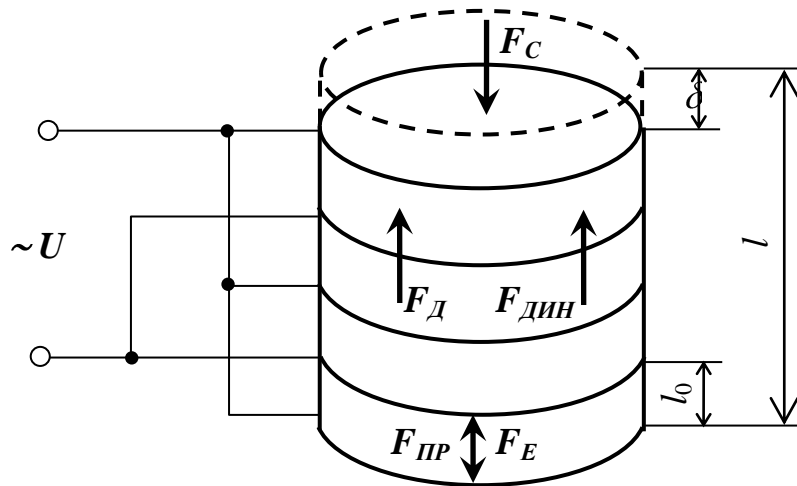


Рис. 2.4. Конструкція складального стовпа п'єзоелектричних шайб

Синтезуємий привід закріплений одним кінцем на нерухомій основі. Він складається з набору п'єзоелектричних шайб поперечного перерізу  $S_0$  початкової товщини  $l_0$ . Довжина стовпа змінюється під дією електричного напруги  $U$ , що подається на електроди п'єзоелемента (та перетворюється в

електричне поля  $E$ ) в напрямку дії поля на значення  $\delta$ , переміщаючи виконавчий орган масою  $m_0$ , під'єднаний до його вільного кінця. Крім виконавчого органу переміщаються також елементи об'єму активної частини п'єзоелемента. Їх маса  $m_k$  найчастіше менша, ніж маса виконавчого органу. При цьому інерційностями елементарних об'ємів п'єзоелемента можна знехтувати. Або, беручи до уваги, що п'єзоелемент закріплений одним кінцем і ця його частина не приймає участі в русі, уточнити значення сумарної приведеної рухомий маси  $m_\Sigma$ , кг:

$$m_\Sigma = m_0 + 0,382m_k.$$

Для сил, що діють на складальний стовп, справедлива така умова рівноваги [64]:

$$\bar{F}_{ПР} = \bar{F}_E + \bar{F}_C + \bar{F}_D + \bar{F}_{ДИН},$$

де  $F_{ПР} = K_{ПР} \delta$  – зусилля пружної деформації, Н;

$$F_E = d_n Y S_0 E, \text{ Н};$$

$$F_D = -\frac{K_D d\delta}{dt}, \text{ Н};$$

$$F_{ДИН} = -m_\Sigma \frac{d^2\delta}{dt^2}, \text{ Н};$$

$$K_{ПР} = \frac{YS_0}{l_0} \text{ – коефіцієнт пружності п'єзоелемента, Н/м};$$

$l_0$  – початкова товщина шайби, мм;

$\delta$  – деформація п'єзоелемента, мм;

$Y$  – модуль Юнга, Н/м<sup>2</sup>;

$d_n$  – п'єзомодуль, Кл/Н;

$E$  – напруженість поля, В/м;

$m_\Sigma$  – еквівалентна наведена сумарна маса рухомих частин, кг.

Статичним зусиллям  $F_C$ , що прикладене до виконавчого органу і діє на п'єзоелемент з боку виконавчого органу, а також динамічним зусиллям



$F_{дин}$ , пропорційним прискоренню виконавчого органу, і демпфуючим зусиллям  $F_{д}$ , пропорційним швидкості зсуву виконавчого органу, визначається механічне напруження  $\sigma$ .

Основне динамічне зусилля  $F_{дин}$  в даному випадку діє на п'єзоелемент в напрямку прикладеного поля.

Тому з умови рівноваги сил отримаємо вираз

$$\frac{\delta \cdot Y \cdot S_0}{i \cdot l_0} = d_n Y S_0 E - S_0 \sigma, \quad (2.1)$$

де  $i$  – коефіцієнт мультиплікації;

$\sigma$  – механічна напруга, Н/м<sup>2</sup>.

Розділив всі члени (2.1) на  $YS_0$  отримаємо рівняння (2.2), яким разом з (2.3), згідно [64], можна скористатися для опису зворотного і прямого п'єзоефекту відповідно.

$$\frac{\delta}{l_0} = -\frac{\sigma}{Y} + d_n E, \quad (2.2)$$

$$P = -d_n \sigma + \epsilon_0 \chi E, \quad (2.3)$$

де  $P$  – поляризованість зразка, Кл/м<sup>2</sup>;

$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  – електрична постійна, Ф/м;

$\chi$  – діелектрична сприйнятливість п'єзоматеріала ( $\chi \approx \epsilon_r$ );

$\epsilon_r$  – відносна діелектрична проникність.

Взявши до уваги вираз для струму  $I_{зМ}$  зміщення в діелектрику, та врахувавши, що для п'єзоелектричних матеріалів виконується умова  $\chi \gg 1$  [64], отримаємо:

$$I_{зМ} = S_0 \frac{dP}{dt}. \quad (2.4)$$

Підставивши з (2.1) значення  $\sigma$  в рівняння (2.3), отримаємо:

$$P = -d_n^2 \cdot Y \cdot E + \frac{\delta \cdot Y \cdot d_n}{i \cdot l_0} + \varepsilon_0 \cdot \chi \cdot E.$$

Після диференціювання отриманого виразу за часом, та беручи до уваги, що модуль Юнга і діелектричну проникність є незалежними від напруженості електричного поля і від механічної напруженості в п'єзоелементі, отримаємо:

$$\frac{dP}{dt} = -d_n^2 \cdot Y \cdot \frac{dE}{dt} + \frac{1}{i} \cdot \frac{Y \cdot d_n}{l_0} \cdot \frac{d\delta}{dt} + \varepsilon_0 \cdot \chi \cdot \frac{dE}{dt}$$

Враховуючи  $U = El_0$  – напруга, що прикладена до електродів:

$$\frac{dP}{dt} = \frac{1}{i} \cdot \frac{Y \cdot d_n}{l_0} \cdot \frac{d\delta}{dt} + \frac{\varepsilon_0 \cdot \chi - d_n^2 \cdot Y}{l_0} \cdot \frac{dU}{dt}.$$

Взявши до уваги значення коефіцієнта електромеханічного зв'язку

$$K_{EM} = \frac{d_n^2 Y}{\varepsilon_0 \chi} \text{ отримаємо:}$$

$$\frac{dP}{dt} = \frac{1}{i} \cdot \frac{Y \cdot d_n}{l_0} \cdot \frac{d\delta}{dt} + \frac{\varepsilon_0 \cdot \chi \cdot (1 - K_{EM}^2)}{l_0} \cdot \frac{dU}{dt}.$$

Після підстановки виразу в (2.4), отримаємо,

$$I_{3M} = C_0 \frac{dU}{dt} + K_{II} V(t), \quad (2.5)$$

де  $V(t) = \frac{d\delta}{dt}$  – швидкість виконавчого органу, м/с;

$$C = \varepsilon_0 \chi S_0 \frac{1 - K_{EM}^2}{l_0} \text{ – ємність п'єзоелемента, Ф;}$$

$K_{II} = K_{IIP}d_n$  – коефіцієнт прямого п'єзоефекту, К/м.

Зв'язок між зусиллям  $F_E$  і електричною напругою, що прикладена до електродів п'єзоелемента [64], визначається виразом:

$$F_E = YS_0d_n E = YS_0d_n \frac{U}{l_0} = K_0 U, \quad (2.6)$$

де  $K_0 = K_{IIP}d_n$  – коефіцієнт зворотного п'єзоефекту, К/м.

Так, при управлінні маніпулятором від джерела ЕРС  $e$  через еквівалентний внутрішній опір справедливо рівняння:

$$\frac{e - U}{R_{BT}} = I_{3M}, \quad (2.7)$$

де  $R_{BT}$  – внутрішній опір п'єзостовпа.

З виразів (2.5) та (2.6) отримаємо:

$$\frac{F_E}{K_0} = U,$$

$$I_{3M} = \frac{C_0}{K_0} \cdot \frac{dF_E}{dt} + K_{II} \cdot V(t),$$

де  $C_0$  – ємність п'єзостовпа.

Підставляємо отримані вирази в (2.7), отримаємо [64]:

$$\frac{dF_E}{dt} = \frac{K_0 \cdot e - F_E}{C_0 \cdot R_{BT}} - \frac{K_{II} \cdot K_0}{C_0} \cdot V(t). \quad (2.8)$$

Виразимо з виразу (2.8) значення  $F_E$ ,

$$F_E = \frac{K_0 \cdot (e - K_{II} \cdot R_{BT} \cdot V(t))}{C_0 \cdot R_{BT} \cdot p + 1}. \quad (2.9)$$

Позначивши  $W_1(p) = \frac{1}{C_0 \cdot R_{BT} \cdot p + 1}$ ,  $W_2(p) = K_0$ ,  $W_3(p) = K_{II} \cdot R_{BT}$ ,

можна отримати структурну схему виразу (2.9), яка представлена на рис. 2.5.

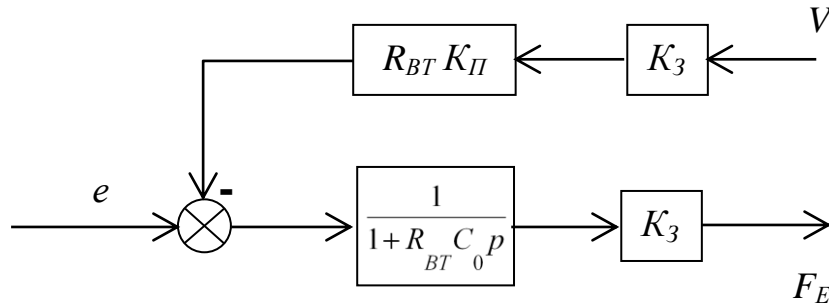


Рис. 2.5. Структурна схема перетворення прикладеного електричного поля в зусилля в п'єзоелементі

З виразу для сил, що діють на складальний стовп, можна отримати наступне рівняння:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{F_E + F_C - K_{II} \Delta - K_D V(t)}{m_\Sigma}, \quad (2.10)$$

Структурна схема перетворення за (2.10) наведена на рис. 2.6.

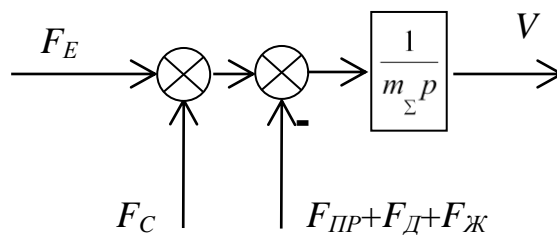


Рис. 2.6. Структурна схема, що визначає швидкість переміщення вільного кінця п'єзоелемента

Виходячи з умови  $V(t) = \frac{d\delta}{dt}$ ,  $F_D = -\frac{K_D d\delta}{dt}$ ,  $F_{II} = K_{II} \cdot \delta$ , які в

поєднанні з (2.8) і (2.10) утворюють повну систему диференціальних

рівнянь, що описують складальний стовп з виконавчим органом при зроблених вище припущеннях, можна отримати структурну схему, що наведена на рис. 2.7.

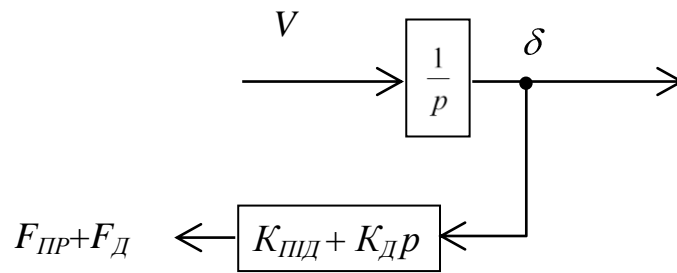


Рис. 2.7. Структурна схема, що визначає величину переміщення вільного кінця п'єзоелемента

При об'єднанні усіх трьох структурних схеми отримуємо структурну схему складального стовпа п'єзоелектричних шайб (рис. 2.8).

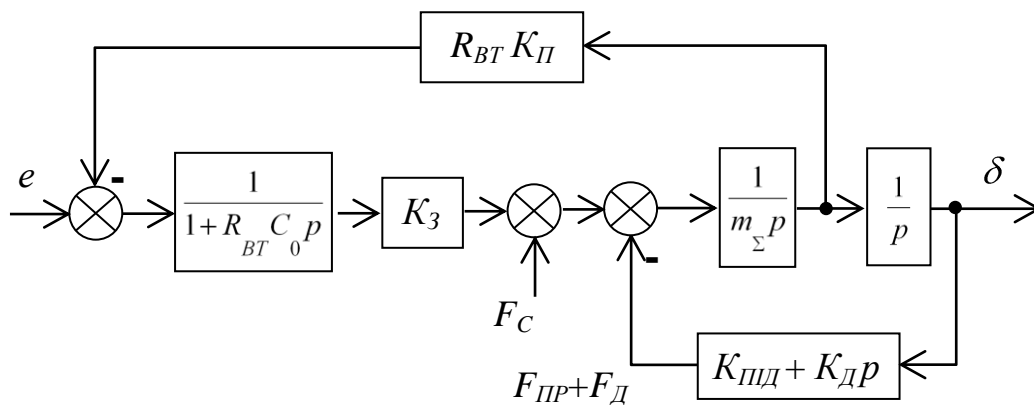


Рис. 2.8. Структурна схема стовпа п'єзоелектричних шайб

На рис. 2.8 додатково наведено:

$K_3$  – коефіцієнт зворотного п'єзоефекту;

$K_{ПД}$  – коефіцієнт підсилення впливу п'єзостовпа;

Передавальна функція має вигляд:

$$W_{\delta}(p) = \frac{K_3}{R_{BT} C_0 m_{\Sigma} p^3 + (m_{\Sigma} + R_{BT} C_0 K_{Д}) p^2 + \psi \cdot p + K_{ПД}},$$

де  $\psi = R_{BT} C_0 (1 + K_{Д} + K_{\Pi}) + K_{Д}$ .

За даними компанії PhysikInstrumente (PI) [12] в даний час одним з найпоширеніших матеріалів, що використовуються для виробництва п'єзomanipуляторів, є PIS 255, параметри якого, вказані в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Параметри п'єзоелектричного матеріалу PIS 255

Параметр	Позначення	Значення
Щільність, кг/м <sup>3</sup>	$\rho$	$7,8 \cdot 10^3$
Відносна діелектрична проникність	$\epsilon$	1750
П'єзомодуль, Кл/Н	$d_{33}$	$400 \cdot 10^{-12}$
	$d_{31}$	$-180 \cdot 10^{-12}$
Коефіцієнт електромеханічного зв'язку	$k_{33}$	0,69
	$k_{31}$	0,35
Модуль Юнга, Н/м <sup>2</sup>	$Y_{33}$	$10 \cdot 10^{10}$
Пружня постійна, м <sup>2</sup> /Н	$S_{11}$	$16,1 \cdot 10^{-12}$
коефіцієнт демпфування, кг/см <sup>2</sup>	$k_d$	$8,9 \cdot 10^{-3}$

Аналіз пропозицій німецької фірми PI Ceramic, що займається виробництвом п'єзодвигунів, показав, що в ряду стовпів є модель P-016.90, яка створює переміщення 0,18 мм і має параметри, що представлені в табл. 2.2.

Таблиця 2.2 – Параметри складального стовпа моделі P-016.90

Параметр	Значення
Переміщення, м	$180 \cdot 10^{-6}$
Діаметр, м	0,016
Довжина, м	0,15
Зусилля, Н	6500
Електрична ємність, Ф	$2 \cdot 10^{-6}$
Частота резонанса, Гц	7000

Коефіцієнт пружності  $K_{ПР}$  матиме значення, Н/м:

$$K_{ПР} = \frac{S_0 Y_{33}}{l} = \frac{2 \cdot 10^{-4} \cdot 10 \cdot 10^{10}}{0,15} = 1,34 \cdot 10^8.$$

Коефіцієнти прямого і зворотного п'єзоефекту, Н/В,

$$K_{П} = K_3 = \frac{Y_{33} d_{33} S_0}{l_0} = \frac{10 \cdot 10^{10} \cdot 400 \cdot 10^{-12} \cdot 2 \cdot 10^{-4}}{0,002} = 4,1.$$

Маса наборного стовпа  $m$ , кг:

$$m = S_0 l \rho = 2 \cdot 10^{-4} \cdot 0,15 \cdot 7,8 \cdot 10^{-3} = 0,235.$$

На підставі структурної схеми, яка описує складальний стовп п'єзоелектричних шайб, складена структурна схема блоку управління подачі палива з п'єзоприводом (рис. 2.9), яка враховує вплив підсилювача, а також поворотної пружини і пружини попереднього навантаження.

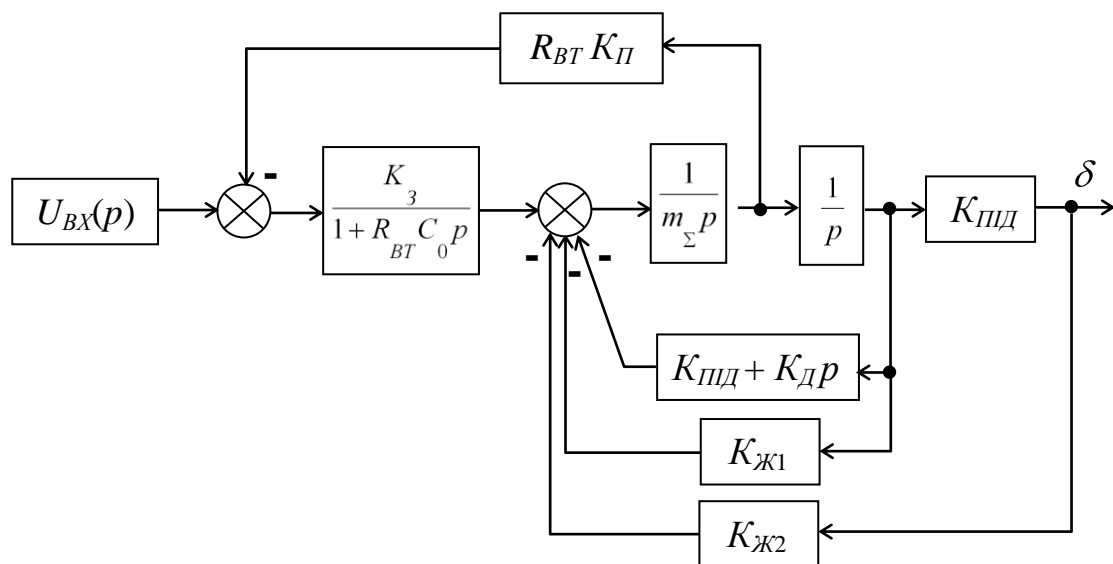


Рис. 2.9. Модель блоку управління подачею палива в циліндр з п'єзоприводом

На рис. 2.9 представлені наступні позначення:

$U_{BX}(p)$  – керуюча напруга;

$K_{Ж1}$  – коефіцієнт жорсткості пружини попереднього навантаження;

$K_{Ж2}$  – коефіцієнт жорсткості пружини золотника.

Коефіцієнт посилення гідравлічної передачі:

$$K_{ПД} = h_2/h_1 = 4/0,18 = 22,2.$$

З [18] відомо, що коефіцієнт жорсткості внутрішньої пружини  $K_{Ж2}$  діючої на золотник блоку управління подачею палива дорівнює 94,56 Н/мм, а коефіцієнт жорсткості  $K_{Ж1}$  пружини попереднього навантаження 10 Н/мм.

Згортання структури призводить до наступної передавальної функції п'єзостовпа з блоком управління подачею палива, що керується від джерела ЕРС:

$$W_{\delta}(p) = \frac{K_3 K_{ПД}}{\alpha m_{\Sigma} p^3 + (m_{\Sigma} + \alpha K_D) p^2 + (\alpha K_D + K_D + \alpha K_{Ж1} + \alpha K_{II} + \alpha \beta) p + K_{ПП} + K_{Ж1} + \beta}$$

де  $\alpha = R_{BT} C_0$ ,  $\beta = K_{ПД} K_{Ж2}$ .

Зробимо підстановку відповідних значень:

- $R_{BT} = 50$  Ом;
- $C_0 = 2$  мкФ;
- $m_{\Sigma} = 0,235$  кг;
- $K_D = 8,9 \cdot 10^{-3}$  кг/см<sup>2</sup>;
- $K_{Ж1} = 10$  Н/мм;
- $K_{Ж2} = 94,56$  Н/мм;
- $K_{ПД} = 22,2$ ;
- $K_{ПП} = 1,34 \cdot 10^8$  Н/м;
- $K_3 = K_{ПП} = 4,1$  Н/В

. В результаті підстановки значень отримаємо передавальну функцію



такого вигляду:

$$W_{\delta}(p) = \frac{89310}{2,351 \cdot 10^{-5} p^3 + 0,235 p^2 + 1,421 \cdot 10^4 p + 1,34 \cdot 10^8}$$

За отриманої передавальної функції в середовищі MathCad була отримана АЧХ, ФЧХ та імпульсна характеристика (рис. 2.10–2.12).

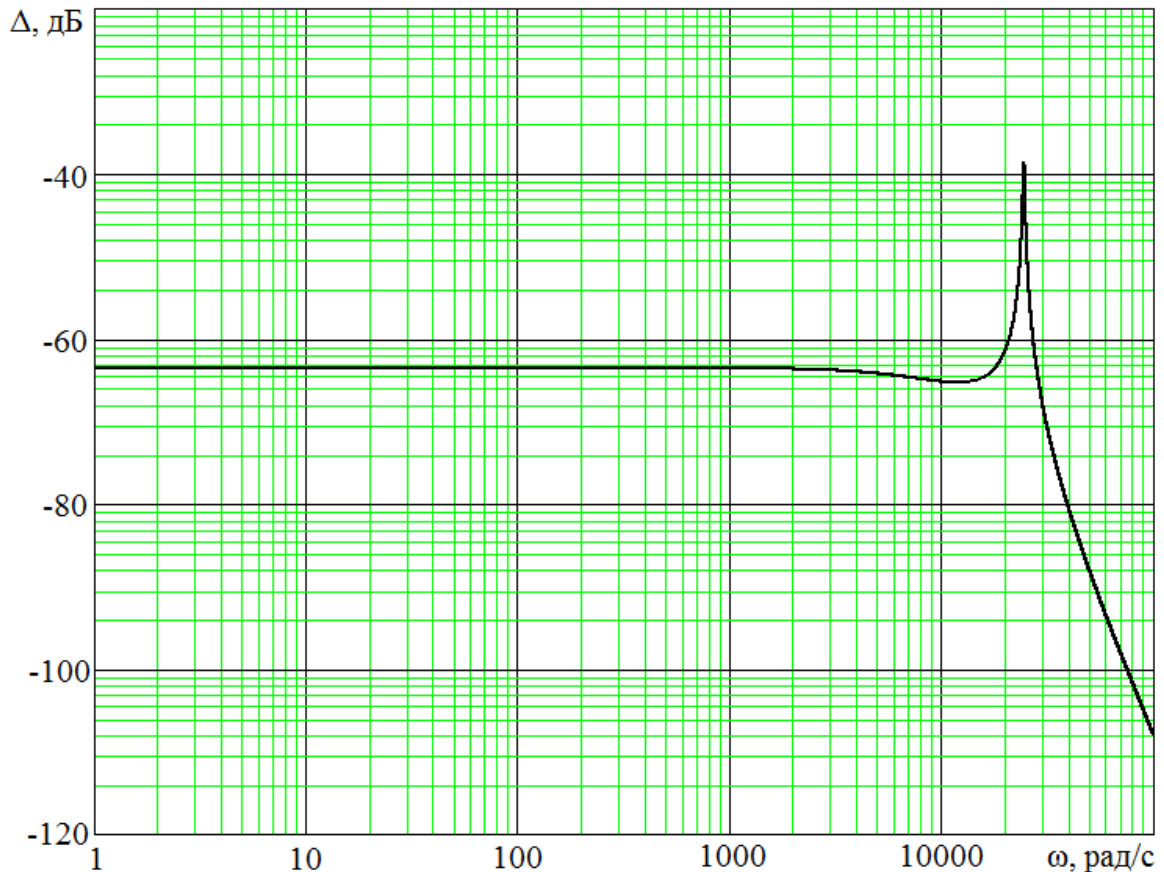


Рис. 2.10. Амплітудно-частотна характеристика моделі блоку управління подачею палива в циліндр з п'єзоприводи

Аналіз залежностей показав, що при використанні даної конструкції можна отримати необхідне переміщення при необхідному зусиллі, не перевищивши сучасних вимог по часу перехідного процесу, яке склало 0,7 мс при необхідних 6,5 мс. Крім того, лінійність АЧХ і відставання по фазі не більше ніж на  $0,5^\circ$  в діапазоні кутових швидкостей від 0 до 100 рад / с говорить про можливість використання даної конструкції на судових дизелях з частотою обертання до 960 хв-1.

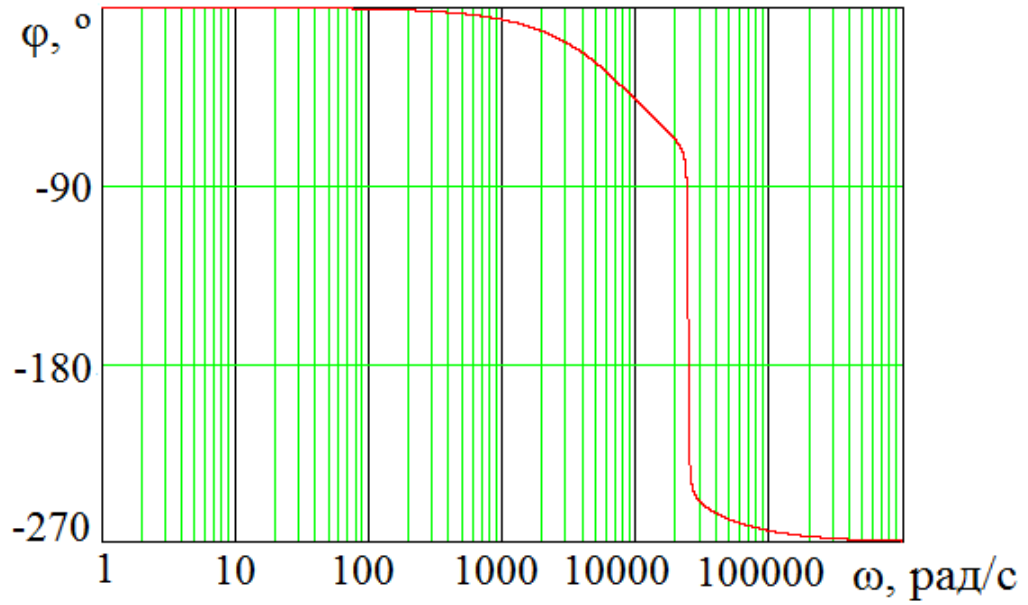


Рис. 2.11. Фазочастотна характеристика моделі блоку управління подачею палива в циліндр з п'єзоприводом

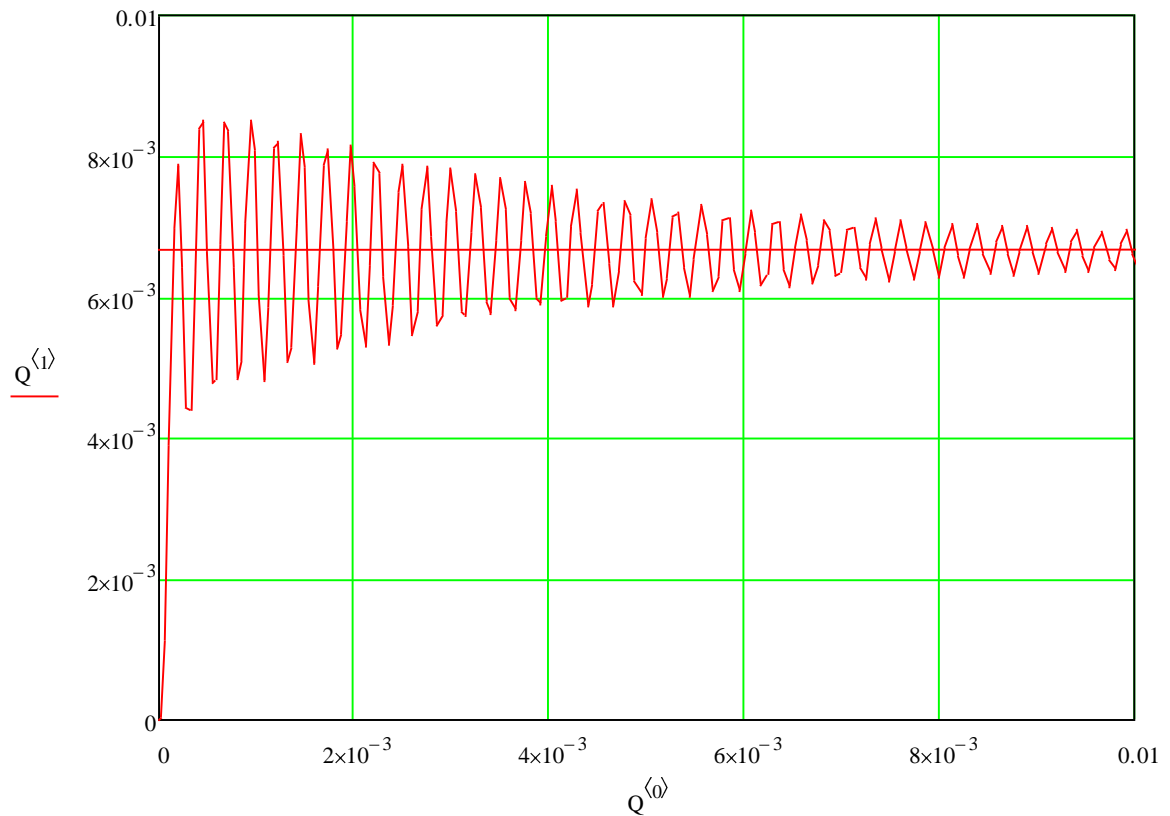


Рис. 2.12. Реакція моделі блоку управління подачею палива в циліндр з п'єзопривода на одиничний ступінчатий вплив

Таким чином, запропонована конструкція приводу золотника БУПП в складі системи управління подачею палива дозволяє скоротити кількість трубопроводів, виключивши масляні насоси і, відповідно, підвищити ефективність системи управління подачею палива.

Однак, як видно на рис. 2.12, через сильне внутрішнє демпфування п'єзокераміки перехідний процес має коливальний характер, що знижує точність підтримки заданого тиску палива перед форсункою, і як наслідок, знижує енергетичну та екологічну ефективність дизеля. Вирішення цієї проблеми буде розглянуто в розділі 3.

### **2.3. Модель блоку управління подачею палива з приводом від роторних п'єзодвигунів**

2.3.1. Основні вимоги до розробки приводу від роторних п'єзодвигунів. Розглянемо далі застосування п'єзодвигунів для створення п'єзоприводів на їх основі [11, 66, 72, 78]. Однак, як відомо, переміщення, що створюються п'єзоманіпуляторами, на порядок менше необхідного, тому для них необхідно застосовувати підсилювачі.

Лінійні п'єзодвигуни при створенні необхідного зусилля не можуть забезпечити необхідної швидкодії [12], тому в даній роботі розглядатися не будуть.

Застосування роторних п'єзодвигунів обмежене необхідністю застосування перетворювачів обертального руху в зворотньо-поступальний. Як варіант, можливе застосування черв'ячних редукторів, кривошипно-шатунного механізму, кулачкових шайб тощо.

Як вже було показано в розділі 2.1, для переміщення золотника блоку управління подачею палива необхідно розвинути зусилля 12,3 кН і забезпечити переміщення золотника на 4 мм за 1 мс.

У приводах найбільш підходять для використання кільцеві

п'єзоелементи з п'єзокераміки ЦТБС-3. Матеріал ЦТБС-3 – це особливий тип силової п'єзокераміки з основними хімічними компонентами цирконат-титанат-барію-свинцю. Даний матеріал призначений для виготовлення елементів, що працюють в режимі актуатора і (або) прийому в умовах впливу сильних електричних полів і механічних напружень в рекомендованому діапазоні температур  $-60 \dots + 850\text{C}$  [89].

Основні параметри кільцевих п'єзоелементів, що використані в роботі, з урахуванням розрахункових співвідношень з [89], матимуть вигляд:

$$\frac{\varepsilon_{33}^T}{\varepsilon_0} = 143,9 \cdot 10^9 \frac{C_0 L}{D^2 - d^2} = 143,9 \cdot 10^9 \cdot \frac{4,01 \cdot 10^{-8} \cdot 0,006}{0,057^2 - 0,016^2} = 2730$$

$$\rho_v = 0,785 \frac{D^2 - d^2}{L} R_v = 0,785 \cdot \frac{0,057^2 - 0,016^2}{0,006} \cdot 2,1 \cdot 10^{10} = 8,93 \cdot 10^9 \text{ Ом} \cdot \text{м};$$

$$V_1^\varepsilon = \frac{1,57}{t^*} D + d \cdot F_r = \frac{1,57}{1,11} \cdot 0,057 + 0,016 \cdot 32000 = 3,484 \cdot 10^3 \text{ м/с};$$

$$d_{31} = 2,68 \cdot 10^{-6} \eta \sqrt{\frac{\varepsilon_{33}^T \Delta f}{\varepsilon_0 \rho F_r^3 D + d^2}} = 2,68 \cdot 10^{-6} \cdot 0,91 \times$$

$$\times \sqrt{\frac{2730 \cdot 10}{7,2 \cdot 10^3 \cdot 32000 \cdot 0,057 + 0,016^2}} = 126 \cdot 10^{-10} \text{ К/Н};$$

де  $L$  – довжина, м;

$D$  – діаметр зовнішній, м;

$d$  – діаметр внутрішній, м;

$C_0$  – ємність статична, Ф;

$\rho$  – щільність, не менше  $7,2 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ ;

$\varepsilon_{33}^T / \varepsilon_0$  – відносна діелектрична проникність (в слабких полях при температурі  $296 \pm 5 \text{ К}$  знаходиться в: інтервалі  $1800 \dots 2800$ );

$\rho_v$  – питомий об'ємний електричний опір, Ом·м (не менше  $10^9$ );

$R_v$  – опір ізоляції, Ом·м;

$d_{31}$  – п'єзомодуль в динамічному режимі, (інтервал середніх значень при  $296 \pm 5\text{K}$  становить  $(158 \pm 33) \cdot 10^{-10}$ );

$F_r$  – частота резонанса (радіальних коливань);

$\Delta f$  – резонансний проміжок між частотою резонансу і антирезонанса;

$V_1^e$  – швидкість звуку, м/с (знаходиться в інтервалі  $3490 \pm 100$ );

$t^*$ ,  $\eta$  – поправки, що вводяться відповідно до графіків з [89].

2.3.2. Моделювання п'єзоелектричного двигуна блоку управління подачею палива з приводом від роторних п'єзодвигунів. Для моделювання процесів необхідно користуватися експериментальними даними, отриманими при випробуваннях і тестах, оскільки наявний математичний опис роторних п'єзоелектричних двигунів на сьогоднішній день не дозволяє будувати ефективні моделі.

Ще одна проблема полягає в тому, що існуючі маніпулятори та двигуни розраховувалися і моделювалися для застосування в області малих переміщень (0,1–5 мм) і відповідно невеликих зусиль (0,25–2 Н) [82].

У даній роботі вимоги, що пред'являються до двигуна, незрівнянно більші по відношенню до існуючих. Виходячи з вищевикладеного, скористаємося існуючою моделлю, яка була розроблена для моделювання процесів, що протікають в віскозиметрах, заснованих на п'єзоелектричних двигунах [59, 607, 75, 76].

Структурна схема моделі представлена на рис. 2.13.

Аналізуючи отримані графіки можна сказати, що п'єзодвигун розвиває момент практично миттєво (час розгону становить  $T_p = 0,08$  сек).

На рис. 2.14, а показаний момент на холостому ході двигуна, а на рис. 2.14, б – момент з урахуванням сили тертя і подолання зусилля для забезпечення робочого ходу плунжера паливного насоса високого тиску.

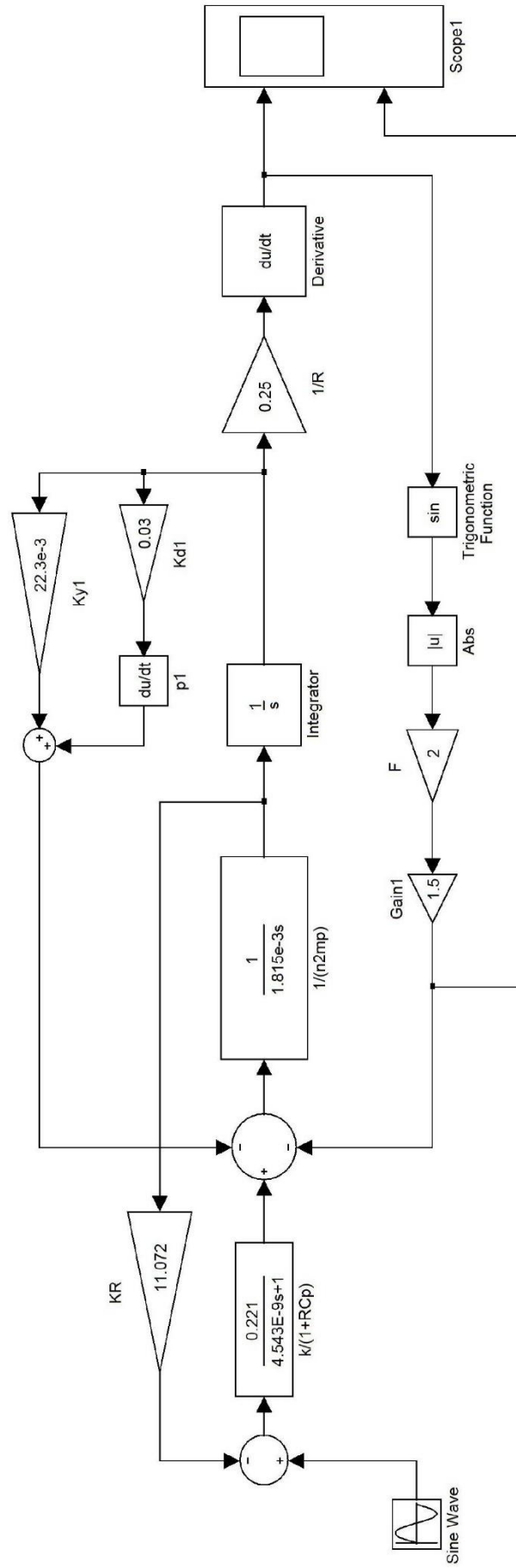
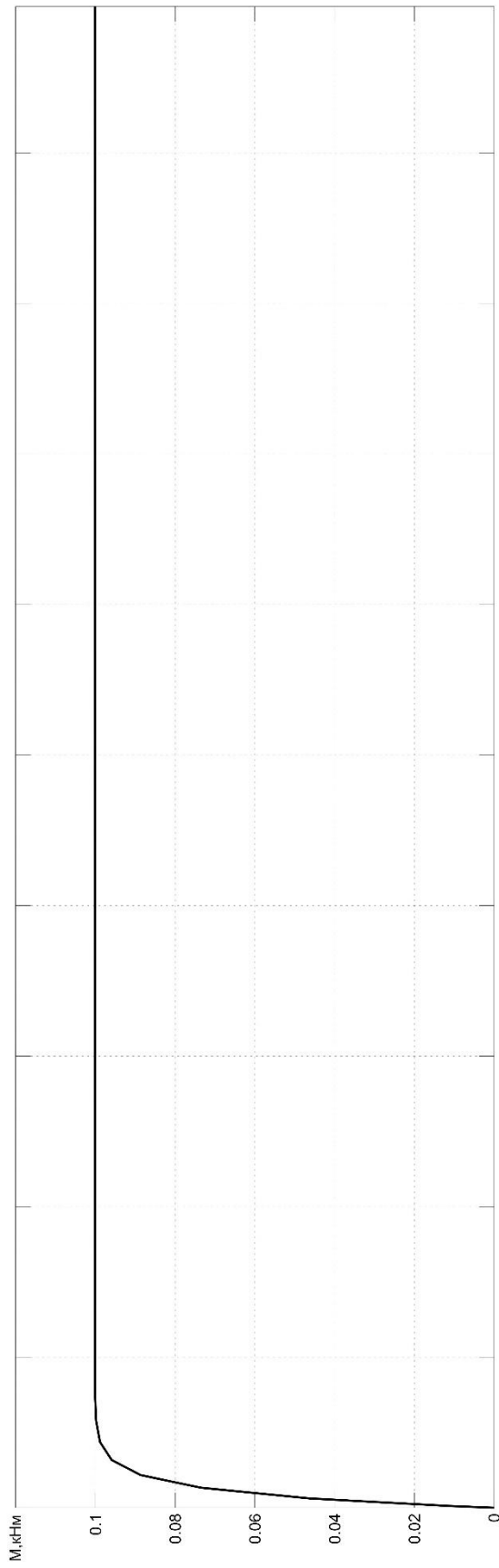
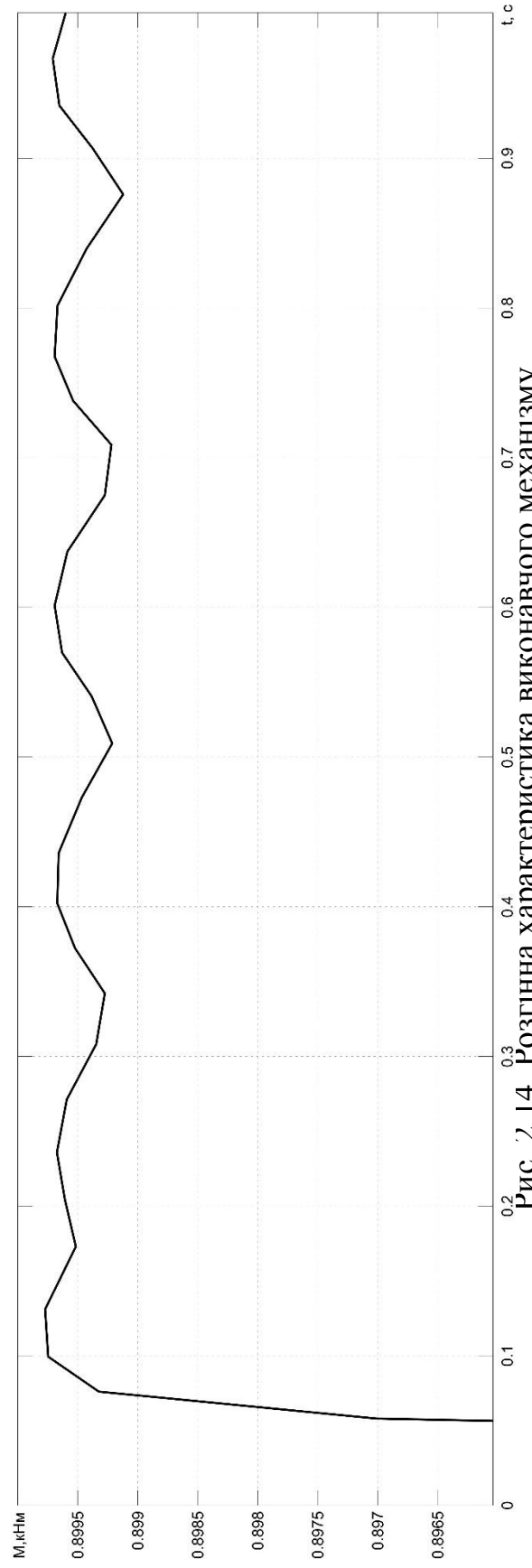


Рис. 2.13. Структурна схема в середовищі MatLab



а)



б)

Рис. 2.14. Розгінна характеристика виконавчого механізму

Отриманий результат задовольняє попереднім розрахункам. У разі, якщо розвивається момент недостатній для забезпечення роботи системи, необхідно на одному валу закріпити кілька осциляторів.

Як видно з графіка, один п'єзодвигун розвиває момент 0,89 кН м. Для різних модифікацій судових двигунів і паливних насосів високого тиску, а також для вирішення інших промислових і технологічних задач, потужність п'єзоелектричного двигуна буде підбиратися шляхом збільшення або зменшення кількості осциляторів на одному валу.

2.3.3. Режим роботи двигуна і система управління. Режим безперервного обертання здійснюється подачею на блок живлення постійної напруги  $U_{Ж}$ , при цьому на ПЕ буде подаватися безперервний гармонійний сигнал збудження  $U_{ЗБ}$  (рис. 2.15).

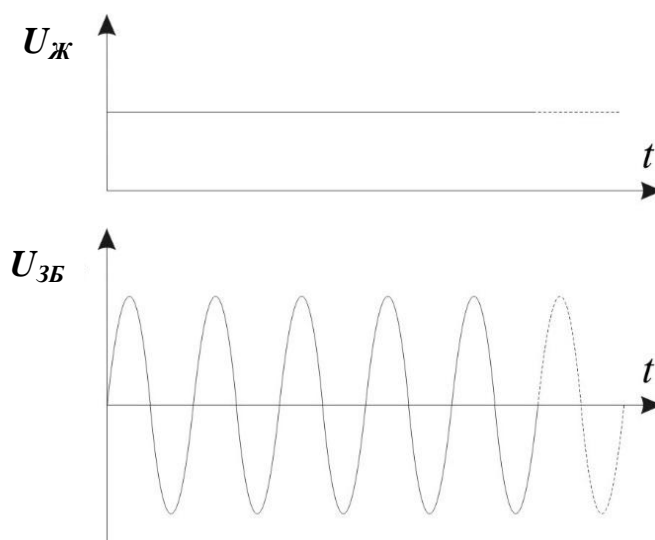


Рис. 2.15. Режим безперервного обертання п'єзодвигунів

Кроковий режим обертання здійснюється шляхом подачі імпульсів живлення, при цьому на п'єзоелемент надходять «пачки» гармонійного збудження тривалістю  $\tau_i$ , рис. 2.16.



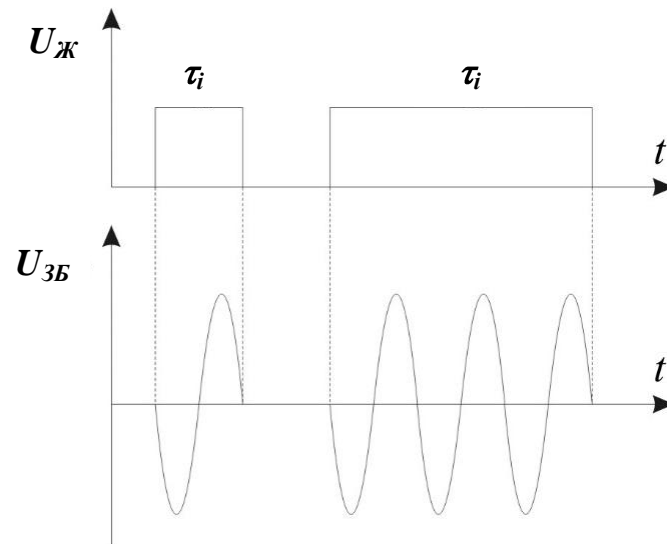


Рис. 2.16. Режим крокової (старт-стопного) обертання п'єзодвигунів

З огляду на особливості розроблюваної системи управління і з метою збільшення моторесурсу, який безпосередньо залежить від частоти обертання, було прийнято рішення використовувати шайбу з розташування кулачків через кожні  $120^{\circ}$ . Тому в нашому випадку доцільно використовувати схему управління в кроковому (старт-стопному) режимі. Блок-схема управління в такому режимі представлена на рис. 2.17.

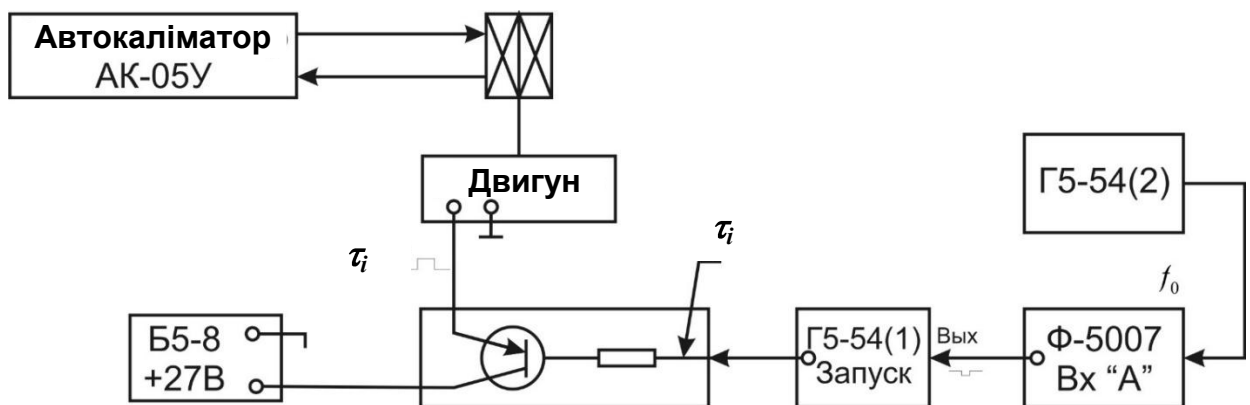


Рис. 2.17. Блок-схема управління двигуном в шаговому режимі

За допомогою генератора Г5-54, джерела живлення Б5-8 і керуючого ключа, здійснювалося формування імпульсу управління. За допомогою генератора Г5-54 формувалася частота  $f_0$  проходження імпульсів

управління  $\tau_i$ . За допомогою програмованого частотоміра Ф-5007 здійснювалося формування необхідної кількості  $N_0$  з частотою  $f_0$  а тривалістю  $\tau_i$ . Крок п'єзодвигуна  $\alpha_{III}$  розраховується із відношення:

$$\alpha_{III} = \frac{\varphi_N}{N_0}.$$

Поєднання оптичної схеми вимірювання з електричною дозволило виконати вимір кроку з точністю не гірше 0,5 кут.с.

## 2.4. Висновки до розділу 2

1. Сформовано вимоги до виконавчих механізмів паливної системи суднового дизеля.

2. Розроблено моделі компонентів системи подачі палива на базі п'єзоелектричних складальних стовпів, які довели можливість застосування п'єзоперетворювачів для отримання великих переміщень при необхідному зусиллі і часу перехідного процесу.

3. Показано, що для отримання великих переміщень необхідно використовувати підсилювачі. Як варіант, були розглянуті механічний важіль і система гідроциліндрів. Попередній розрахунок показав, що застосування важеля призводить до збільшення масо-габаритних показників через розміри самого важеля і необхідності збільшувати потужність приводу в рази. Застосування системи гідроциліндрів дозволяє значно знизити навантаження на привід і отримати необхідне переміщення.

3. Визначено, що сильне внутрішнє демпфіювання призводить до коливань системи, що негативно позначається на надійності компонентів системи, призводить до відхилення закону подачі палива від заданого вигляду, і як наслідок, до зниження економічності. Таким чином,

необхідно розробити методи усунення небажаних коливань.

4. Розроблено моделі компонентів системи подачі палива на базі п'єзоелектричних роторних двигунів, які довели можливість отримання великих переміщення при необхідному зусиллі і часу перехідного процесу. Проведено їх моделювання і розрахунок основних показників.

## РОЗДІЛ 3

### МЕТОДИ ПОКРАЩЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМ ПОДАЧІ ПАЛИВА НА БАЗІ П'ЄЗОПРИВОДІВ

У попередньому розділі було визначено, що сильне внутрішнє демпфірування призводить до коливань системи, що негативно позначається на надійності компонентів системи, призводить до відхилення закону подачі палива від заданого виду, і як наслідок, до зниження економічності.

У цьому розділі описані розроблені методи зменшення таких небажаних коливань, а також управління основними характеристиками систем подачі палива.

#### **3.1. Система позиціонування золотника блоку управління подачею палива з ПД-регулятором**

Способи управління переміщенням п'єзопривода подібні способам управління напругою в п'єзоелектричних трансформаторах. У ЛПІ ім. М. І. Калініна розроблена класифікація способів управління, згідно з якою всі способи поділяються на три основні групи за кількістю взаємопов'язаних дій [42]:

- одномірні (амплітудні, частотні, фазові);
- двовимірні (амплітудно-частотні, амплітудно-фазові, фазочастотні);
- багатовимірні (амплітудно-фазо-частотні).

Адаптивні способи управління займають особливе місце і застосовуються спільно з перерахованими.

Двовимірні способи управління мають переваги одновимірних способів і певною мірою позбавлені їх недоліків. Їх використання дозволяє

підвищити точність, але ускладнює схемотехнічну реалізацію через введення перехресних коригувальних каналів для правильної взаємодії основних каналів управління.

Вибір способу управління залежить в першу чергу від пред'явлених вимог до точності дотримання статичних і динамічних режимів. Найбільш ефективними є багатовимірні способи, потім двовимірні і одномірні. Однак, з огляду на взаємозв'язок дій, зайве ускладнення схеми керування небажано.

В синтезуємій системі привід повинен забезпечити роботу дизеля на всіх можливих режимах (від 0 до 250 об / хв) і переміщення виконавчого механізму на величину 0...4 мм по заданому закону. Таким чином, управління буде здійснюватися по амплітудному каналу, так як керування по частотному і фазовому утруднене через відмінності форми закону подачі палива від синусоїди.

Функціональна схема системи управління, що пропонується, представлена на рис. 3.1.

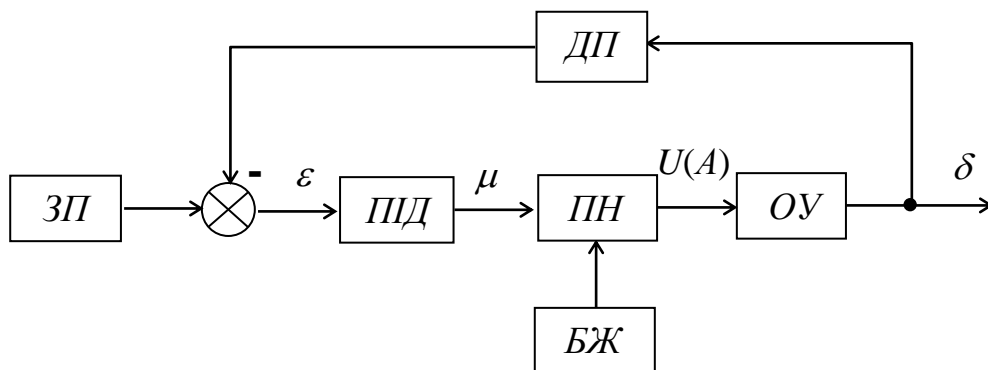


Рис. 3.1. Функціональна схема автоматизованої системи управління подачею палива з п'єзоприводом

На рис.3.1 вказані наступні блоки:

ЗП – задаючий пристрій;

ПД – ПД-регулятор;

ПН – перетворювач напруги;

БЖ – блок живлення;

ОУ – об'єкт управління;

ДП – датчик переміщення;

$A$  – амплітуда;

$U(A)$  – напруга.

Застосування системи позиціонування п'єзопривода з ПД-регулятором, при керуючому сигналі 1000 В, дозволило знизити амплітуду коливань (рис. 3.2), але не виключило їх повністю.

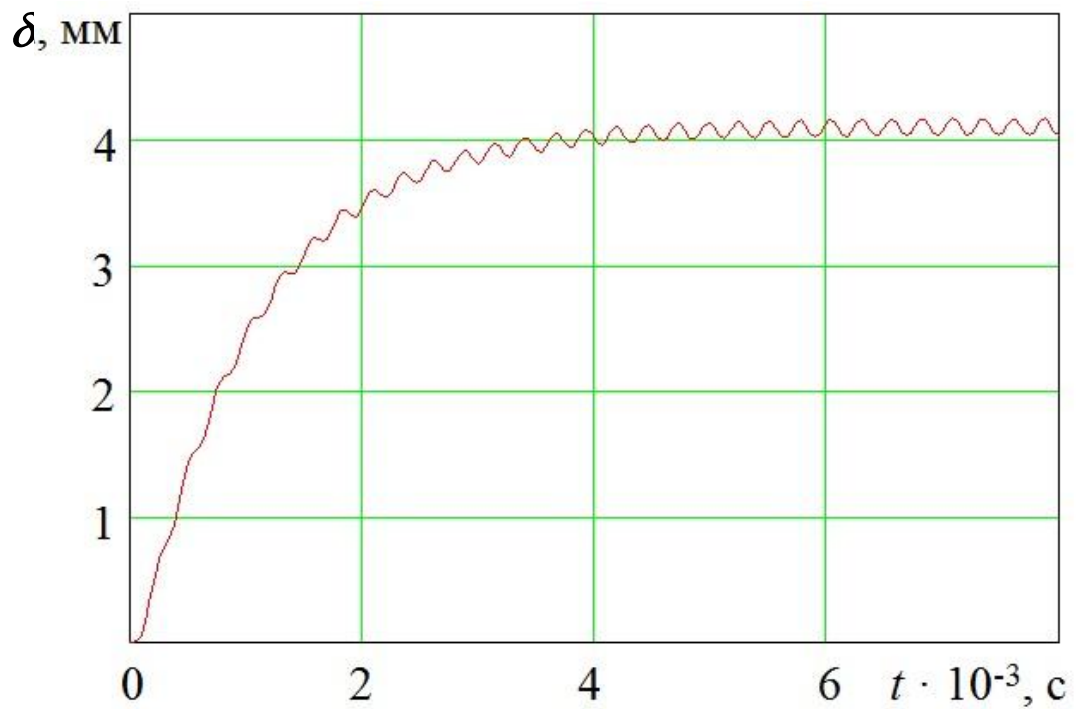


Рис. 3.2. Переміщення золотника блоку управління подачею палива в циліндр з п'єзоприводом при ступінчастій зміні завдання при застосуванні ПД-регулятора

### **3.2. Система позиціонування золотника блоку управління подачею палива з «нечітким» регулятором**

Однією з важливих проблем сучасної теорії управління є проблема оптимізації, яка дозволяє найкращим чином організувати управління [22, 23]. Залежно від повноти вихідних даних про об'єкт управління, його стану, зовнішніх впливів, можливі різні підходи до вирішення цієї проблеми – детермінований, стохастичний і адаптивний.

В сучасних автоматичних системах зазвичай не тільки заздалегідь не відомі рівняння керованих об'єктів і зовнішні впливи (детермінований підхід), але і з різних причин немає можливості попередньо визначити їх імовірнісні характеристики (стохастичний підхід).

У таких системах стикаються з часткою початкової невизначеності, тому в цих складних випадках застосовують адаптивний підхід. Застосування принципу адаптації дозволяє штучно створити ефект пристосування до умов, що змінюються в системах, що дозволяє істотно знизити вплив невизначеності на якість управління і компенсувати недолік початкової інформації про керований процес на стадії проектування.

Якщо початкова невизначеність велика, то єдина можливість якісного управління об'єктом заснована на раціональному використанні поточної інформації про стан і властивості об'єктів, яка повинна бути використана для усунення початкової невизначеності. Таким чином, адаптацію можна характеризувати як оптимізацію в умовах невизначеності.

Питаннями невизначеності займалися багато вчених [45, 51, 92, 93, 97], якими було отримано безліч цікавих рішень.

П'єзоприводи є багатозв'язними, багатовимірними об'єктами управління, процеси в яких характеризуються різноманіттям форм зв'язків, нелінійністю, складністю і недостатньою вивченістю. Динаміка нелінійних процесів в п'єзоприводах практично мало вивчена. Тому все це ускладнює аналітичний опис процесів в п'єзоприводах при зміні зовнішніх впливів.

Отже, п'єзоприводи мають специфічні особливості (розкид параметрів до  $\pm 40\%$ , дрейф характеристик при зміні умов роботи та ін.), які обмежують застосування відомих способів управління, що послужило причиною для створення нових способів управління і на їх основі високоефективних пристроїв адаптивного управління п'єзоприводом заснованих на принципах нечіткої логіки.

У той же час, в [81] показано, що застосування нечіткого регулятора призводить до практично повного виключення коливань в електромеханічній системі. Це послужило передумовою для створення нової автоматизованої системи управління п'єзоприводом (рис. 3.3), заснованої на принципах нечіткої логіки.

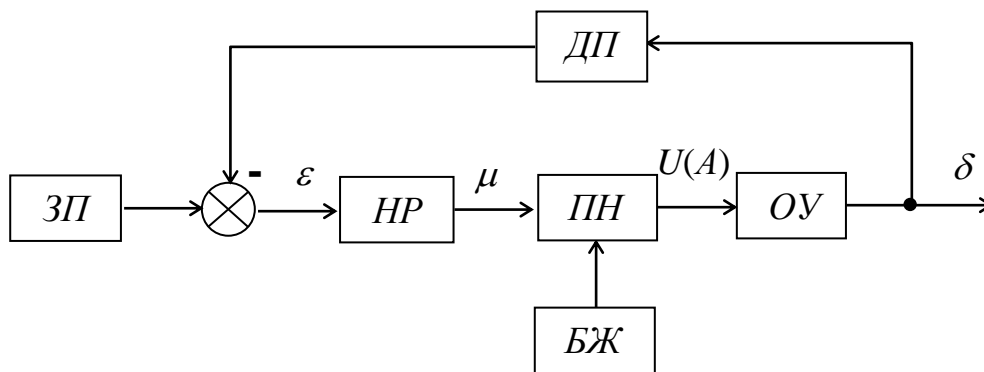


Рис. 3.3. Функціональна схема нечіткої системи позиціонування золотника блоку управління подачею палива з п'єзоприводом:

ЗП – задаючий пристрій, НР – нечіткий регулятор,

ПН – перетворювач напруги, БП – блок живлення, ОУ – об'єкт управління,

ДП – датчик переміщення, А – амплітуда,  $U(A)$  – напруга

Згідно [7], де описується мова нечіткого управління FCL (FuzzyControlLanguage), на рис. 3.3 представлена типова функціональна схема нечіткого регулятора (НР), яка містить вузли фазифікації, нечіткого виведення, бази правил нечіткої продукції і дефазифікації.



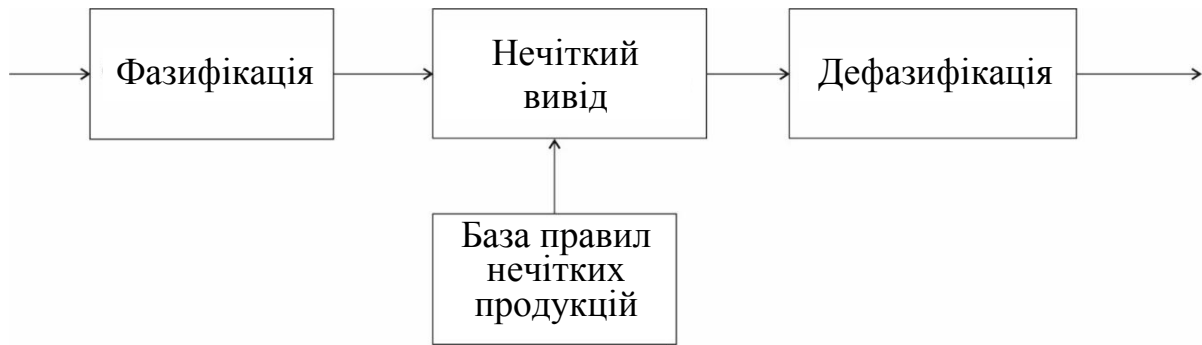


Рис. 3.4. Функціональна схема нечіткого регулятора

На етапі фазифікації (перетворення чітких вхідних змінних в їх нечіткі, лінгвістичні значення) допустимий діапазон  $D$  зміни вхідних змінних  $x$  розбивається на якісні безлічі-терми (мале негативне –  $NS$ , нульове –  $Z$ , мале позитивне –  $PS$  тощо), а ступінь приналежності змінних безлічі визначається функціями приналежності (ФП) безлічі  $\mu$ .

Фазифікація здійснюється не менше ніж для двох вхідних змінних. Перетворення результату в вихідний сигнал (дефазифікація) здійснюється визначенням «центру ваги»  $z$  у для  $\mu(y)$  [42].

Сучасні нечіткі МК (Ф.Ф. AdaptiveLogic, TexasInstruments ін.) мають повну підтримку введення / виведення змінних, системи команд для всіх етапів фазифікації, логічного висновку і дефазифікації і основна складність застосування нечіткого МК укладена в розробці ефективної бази правил. Число правил залежить від числа вхідних змінних і числа значень лінгвістичних змінних (нечітких множин). Наприклад, реалізація нечіткого ПД-регулятора вимагає записи тривимірної таблиці правил (кількість правил, при однаковому числі терм-елементів по входах, визначається як число лінгвістичних змінних в ступені числа вхідних змінних), що навіть за допомогою експертів надзвичайно складно здійснити для конкретного технологічного об'єкта управління [56, 103].

Функціональна схема пропонованої системи управління представлена на рис. 3.5.

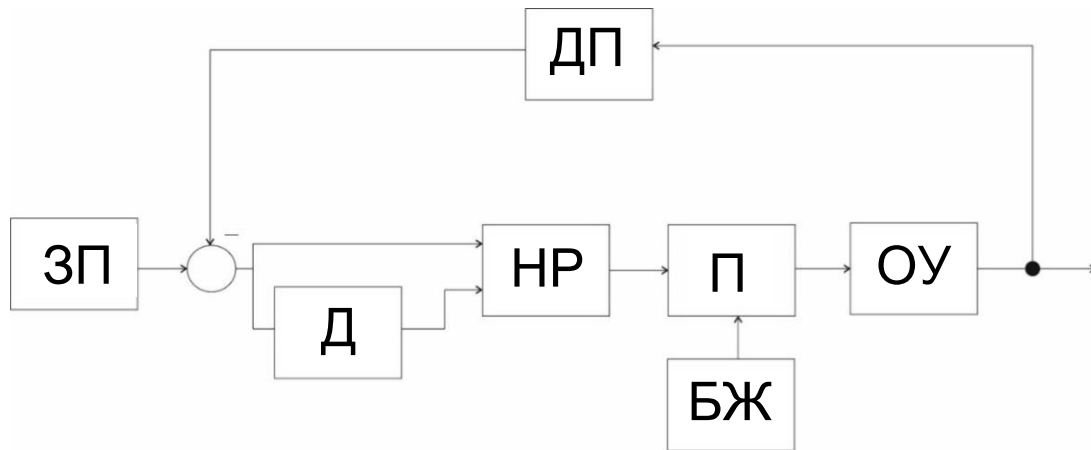


Рис. 3.5. Функціональна схема нечіткої системи управління п'єзоприводи:

ЗП – задаючий пристрій, НР – нечіткий регулятор,

П – перетворювач, БЖ – блок живлення, ОУ – об'єкт управління,

ДП – датчик переміщення, А – амплітуда,  $U(A)$  – напруга

Для забезпечення найкращої якості управління необхідно провести аналіз таблиці правил нечіткого регулятора, входними параметрами якого є відхилення від заданого значення переміщення  $h$  і швидкість зміни помилки  $\delta$ . У зв'язку з цим визначаються нечіткі множини для відхилення від заданого значення переміщення  $h$  і швидкість зміни помилки  $\delta$  керуючих впливів  $A_{\text{ком}}$  та  $f_{\text{ком}}$ .

Вищевказані нечіткі множини визначені за допомогою лінгвістичної мови:

$$F_1 = \text{ОБ} \overset{\Delta}{=} (f_m(t), \mu_1(f_m(t)));$$

$$F_2 = \text{ОС} \overset{\Delta}{=} (f_m(t), \mu_2(f_m(t)));$$

$$F_3 = \text{ОМ} \overset{\Delta}{=} (f_m(t), \mu_3(f_m(t)));$$

$$F_4 = \text{НО} \overset{\Delta}{=} (f_m(t), \mu_4(f_m(t)));$$

$$F_5 = \text{ПМ} \overset{\Delta}{=} (f_m(t), \mu_5(f_m(t)));$$

$$F_6 = \text{ПС} \overset{\Delta}{=} (f_m(t), \mu_6(f_m(t)));$$

$$F_7 = \text{ПБ}^{\Delta}(f_m(t), \mu_7(f_m(t)));$$

$$F_i \in F; i = \overline{1,7}; f(t) \in F,$$

де  $F$  – універсальна множина обурень;

$f_m(t)$  – поточне значення обуюючого впливу в певний момент часу;

$\mu_i(f(t))$  – функція приналежності до нечіткої множини  $f(t)$ , яка визначається як функція від  $f_m(t)$ ;

ОБ – негативно велике значення;

ОС – негативно середнє значення;

ОМ – негативно мале значення;

НО – нульове значення;

ПМ – позитивно мале значення;

ПС – позитивно середнє значення;

ПБ – позитивно велике значення.

Значення  $f(t)$  визначається від деякого номінального рівня обурення  $f_{\text{ср}}$ ,

$$f(t) = f_1(t) - f_{\text{ср}},$$

де  $f_1(t)$  – нормоване значення обурення.

Аналогічним чином на прийнятній мові визначаються нечіткі множини для швидкості зміни (похідною) обурення, помилки і швидкості її зміни, керуючого впливу (виходу регулятора), компенсуючого впливу (виходу компенсатора).

Функції приналежності нечітких множин неузгодженостей частоти  $f$  та амплітуди  $A$  компенсуючих впливів  $f_{\text{ком}}$  та  $A_{\text{ком}}$  визначені виходячи з досвіду управління конкретним об'єктом досвідченого оператора.

Функції аналогічного виду описують і інші нечіткі множини, які використовуються в системі управління.

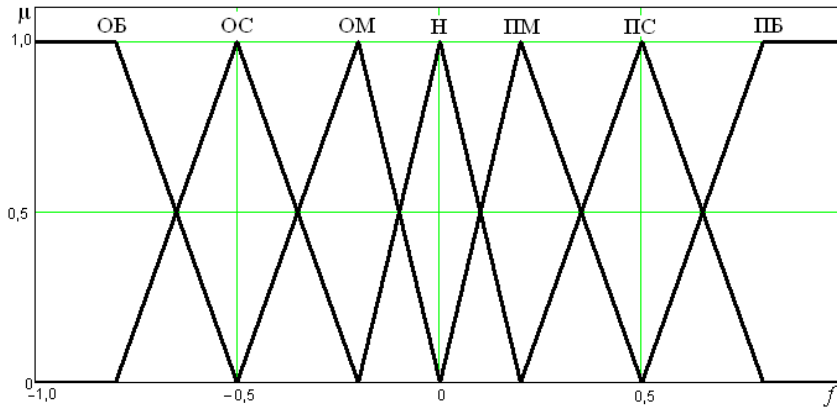


Рис. 3.6. Функції приналежності лінгвістичної змінної неузгодженостей частоти  $f$ : ОБ – негативно велика; ОС – негативно середня; Н – нульова; ПС – позитивно середня; ПБ – позитивна велика

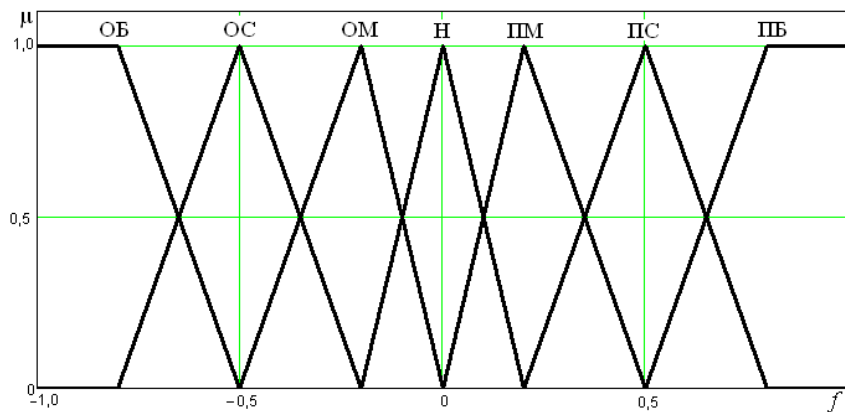


Рис. 3.7. Функції приналежності лінгвістичної змінної неузгодженостей амплітуди  $A$

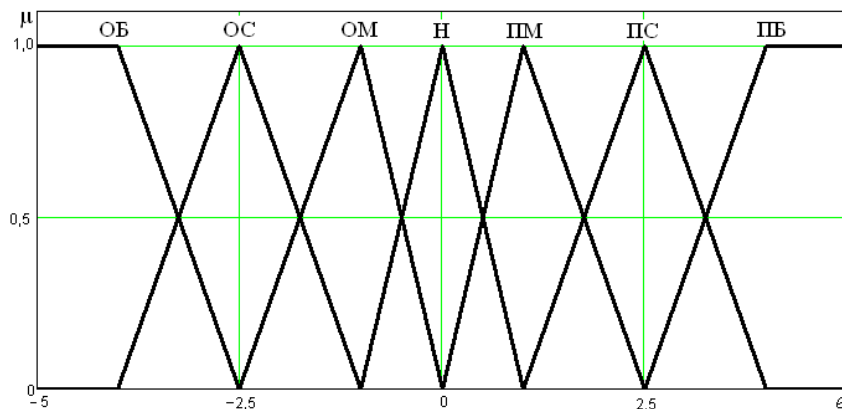


Рис. 3.8. Функції приналежності лінгвістичної змінної компенсуючого впливу  $f_{\text{ком}}$

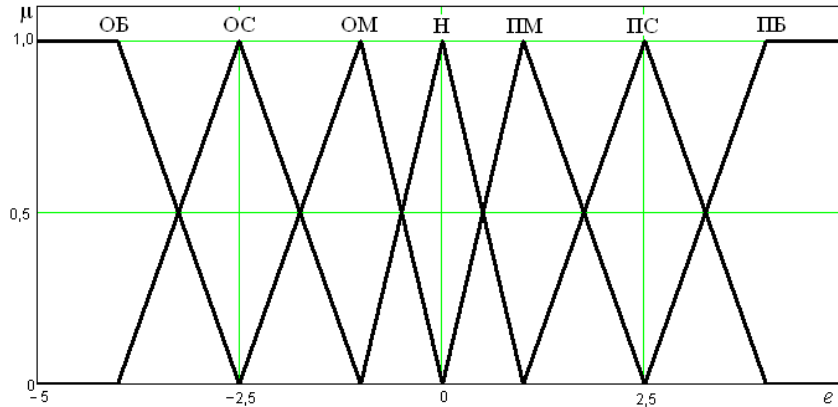


Рис. 3.9. Функції приналежності лінгвістичної змінної компенсуючого впливу  $A_{\text{ком}}$

На основі накопиченої апріорної інформації, досвіду управління технологічним процесом і якісних міркувань складені (у вигляді висловлювань) такі правила нечіткого алгоритму регулятора для частотного каналу:

$$\begin{aligned} &\text{ЯКЩО } f(t) \text{ ОБ, ТА } f'(t) \text{ ОБ, ТО } U_f(t) \text{ ОБ, ИНАКШЕ;} \\ &\text{ЯКЩО } f(t) \text{ ПБ, ТА } f'(t), \text{ ТО } U_f(t) \text{ ОМ тощо.} \end{aligned} \quad (3.1)$$

або у вигляді таблиці лінгвістичних правил (ТЛП) (табл. 3.1).

Таблиця 3.1 – Таблиця лінгвістичних правил для частотного каналу

Відхилення частоти $f$	Відхилення амплітуди $A$						
	ОБ	ОС	ОМ	Н	ПМ	ПС	ПБ
ОБ	ПБ	ПБ	ПС	ПС	Н	ОМ	ОС
ОС	ПС	ПС	ПС	ПМ	Н	ОМ	ОМ
ОМ	ПС	ПМ	ПМ	Н	Н	ОМ	ОМ
Н	ПС	ПМ	ПМ	Н	ОМ	ОМ	ОС
ПМ	ПС	ПМ	Н	Н	ОМ	ОМ	ОС
ПС	ПС	ПМ	ПМ	ОМ	ОС	ОС	ОС
ПБ	ПС	ПМ	Н	ОС	ОБ	ОБ	ОБ

Правила нечіткого регулятора для амплітудного каналу складені у вигляді наступних висловлювань:

$$\begin{aligned} &\text{ЯКЩО } e(t) \text{ ОМ, ТА } e'(t) \text{ ОМ, ТО } U_u(t) \text{ ОМ, ІНАКШЕ;} \\ &\text{ЯКЩО } e(t) \text{ ОБ, ТА } e'(t) \text{ ОБ, ТО } U_u(t) \text{ ОБ тощо. (табл. 3.2)} \end{aligned} \quad (3.2)$$

Таблиця 3.2 – Таблиця лінгвістичних правил для амплітудного каналу

Відхилення частоти $f$	Відхилення амплітуди $A$						
	ОБ	ОС	ОМ	Н	ПМ	ПС	ПБ
ОБ	ОБ	ОБ	ОБ	ОС	Н	ПМ	ПС
ОС	ОС	ОС	ОС	ОМ	ПМ	ПМ	ПС
ОМ	ОС	ОМ	ОМ	Н	Н	ПМ	ПС
Н	ОС	ОМ	ОМ	Н	ПМ	ПМ	ПС
ПМ	ОМ	ОМ	Н	Н	ПМ	ПМ	ПС
ПС	ОМ	ОМ	Н	ПМ	ПС	ПС	ПС
ПБ	ОС	ОМ	Н	ПС	ПС	ПБ	ПБ

Остаточні ТЛП компенсатора і регулятора отримані після деяких ітерацій, тобто вихідні правила вигляду (3.1) та (3.2) були піддані багаторазовій зміні, поки не забезпечилася необхідна якість процесів управління.

У табл. 3.1 і табл. 3.2 наведені правила визначення компенсуючих впливів  $f_{\text{ком}}$  та  $A_{\text{ком}}$  відповідно.

Налагодження алгоритму управління проведено в програмі Simulink.

Апробація запропонованої нечіткої системи позиціонування в середовищі Matlab (рис. 3.10) продемонструвала її ефективність. Так, коливання золотника блоку управління подачею палива практично виключені (рис. 3.11) при дотриманні вимог, що пред'являються, до швидкодії системи.

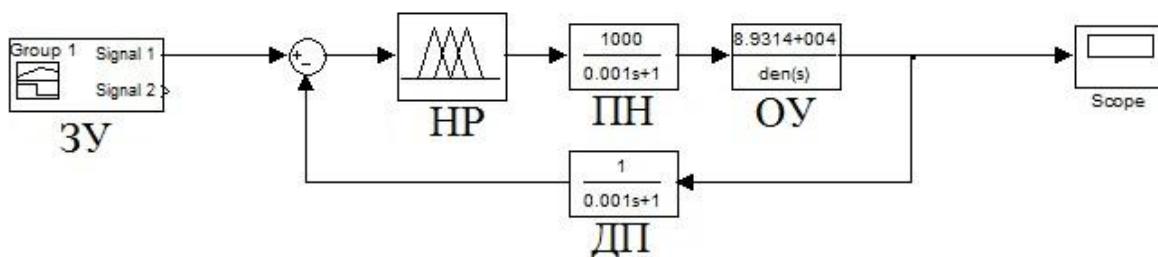


Рис. 3.10. Модель нечіткої системи позиціонування золотника блоку управління подачею палива з п'єзоприводом в середовищі Matlab

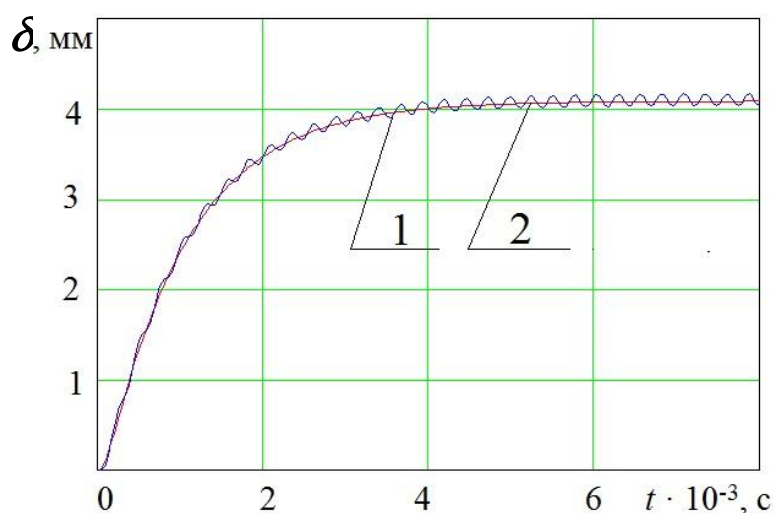


Рис. 3.11. Переміщення золотника блоку управління подачею палива в циліндр з п'єзоприводом при ступінчастій зміні завдання для систем:

1 – з ПД-регулятором; 2 – з нечітким регулятором

### 3.3. Використання негативного зворотного зв'язку для усунення коливань

Іншим рішенням усунення небажаних коливань системи на базі п'єзокерамічних перетворювачів є застосування від'ємний зворотний зв'язок.

Як відомо, одним із методів впливу на характеристики п'єзоелектричних елементів (ПЕ) є використання зворотного зв'язку. Ідея використання зворотного зв'язку в п'єзоелектричних перетворювачах є

досить перспективною і широко розглянута в роботах багатьох авторів [25, 26, 61, 62, 99–103].

Наприклад, позитивний зворотний зв'язок дозволяє збудити п'єзоперетворювачі резонансні коливання і побудувати на цій основі датчики різних фізичних величин, а від'ємний зворотний зв'язок (ВЗЗ) в резонансних п'єзоперетворювачах дає можливість лінеаризувати їх градувальні характеристики, зменшити небажані коливання тощо.

Схема п'єзоперетворювача з набором шайб з двох ПЕ з ВЗЗ показана на рис. 3.12 [80].

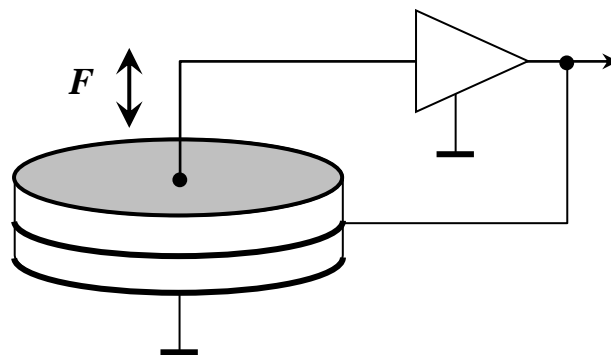


Рис. 3.12. Схема п'єзоперетворювача з набором шайб з двох ПЕ з ВЗЗ

Схемотехнічна модель досліджуваного перетворювача за рис. 3.12 з використанням пакета програм схемотехнічного моделювання показана на рис. 3.13.

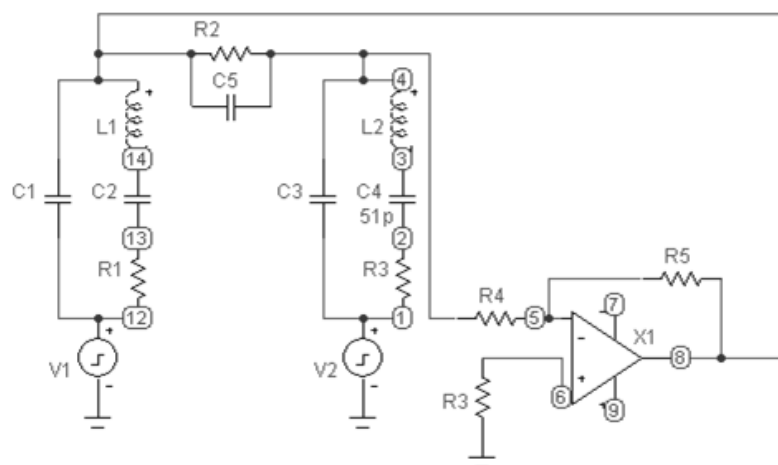


Рис. 3.13. Схемотехнічна модель п'єзоперетворювача з набором шайб з двох ПЕ з ВЗЗ



Функціональна модель цього ж перетворювача з використанням того ж пакета програм, з врахуванням моделі п'єзоелемента, зображена на рис. 3.14.

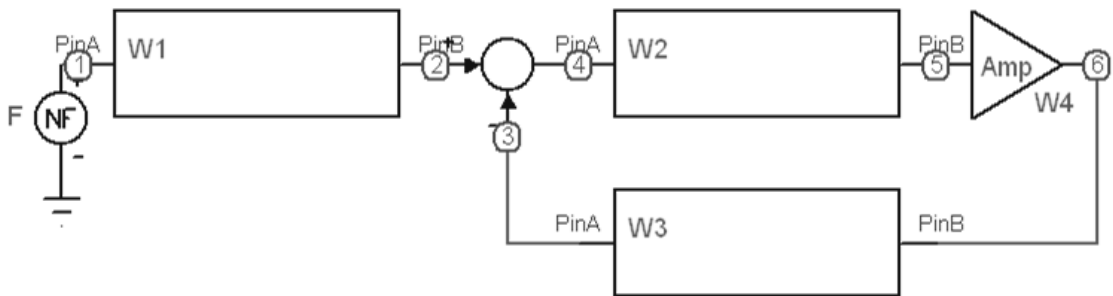


Рис. 3.14. Функціональна модель п'єзоперетворювача з набором шайб з двох ПЕ з В33

Отримання усіх ланок та їх передаточних функцій детально описано в роботі [62]. Загальна передаточна функція перетворювача має вигляд:

$$W_{В33} = \frac{W_1 W_2 W_4}{1 + W_2 W_3 W_4}.$$

Аналіз показує, що частотні та часові характеристики схем за рис. 3.13 та рис. 3.14 майже повністю ідентичні, що свідчить про адекватність побудованих моделей.

Отримані АЧХ и ФЧХ моделей перетворювачів за рис 3.13 (що відповідає, в тому числі, і перетворювачу за рис. 3.14) для набору шайб з двох ПЕ дискового типу з п'єзокераміки ЦТС-19 представлені на рис. 3.15. Перехідна характеристика – на рис. 3.16. Характеристики наведено для трьох значень коефіцієнта підсилення підсилювача А: 10, 100 та 1000, що відповідає різному рівню глибини В33.

Як видно з рис. 3.15 та рис. 3.16 за допомогою В33 вдається повністю усунути небажанні коливання п'єзоелементів, що свідчить про виконання поставленої в роботі задачі.

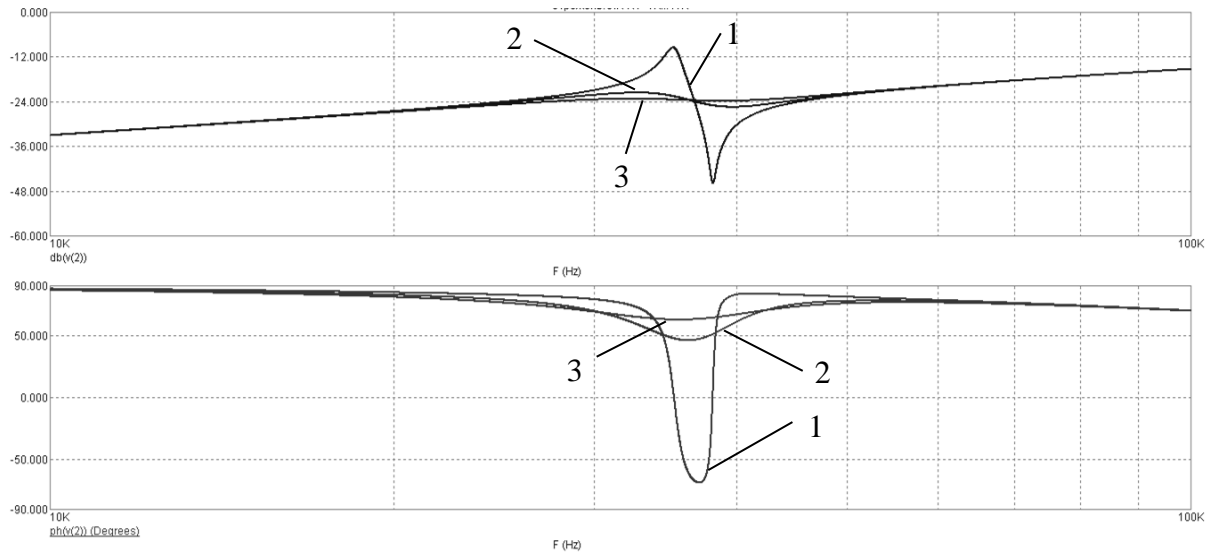


Рис. 3.15. АЧХ та ФЧХ п'єзоперетворювача з набором шайб  
з двох ПЕ з ВЗЗ: 1 –  $A = 10$ ; 2 –  $A = 100$ ; 3 –  $A = 1000$

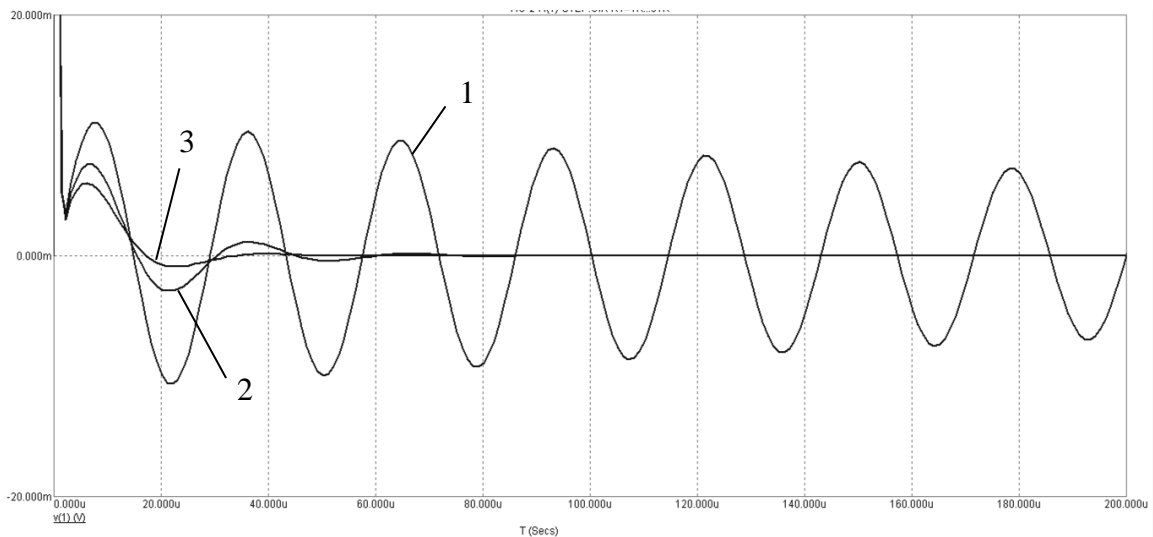


Рис. 3.16. Перехідна характеристика п'єзоперетворювача з набором шайб  
з двох ПЕ з ВЗЗ: 1 –  $A = 10$ ; 2 –  $A = 100$ ; 3 –  $A = 1000$

Таким чином, доведено, що задача зменшення небажаних коливань набору п'єзокерамічних шайб п'єзоприводу можлива за рахунок використання від'ємного зворотного зв'язку для покращення систем управління подачею палива суднових дизелів з електронним управлінням на базі п'єзоелектричних приводів.

### 3.4. Висновки до розділу 3

1. Розроблено систему позиціонування виконавчого механізму паливної системи двигуна з ПД-регулятором, яка дозволила зменшити коливальність, але не виключила їх повністю, що стало передумовою для розробки регулятора, заснованого на принципах нечіткої логіки

2. Розроблено систему позиціонування виконавчого механізму паливної системи двигуна з «нечітким» регулятором, яка дозволила майже повністю виключити коливальний системи зберігши швидкодію.

3. Розглянуто завдання зменшення небажаних коливань набору п'єзокерамічних шайб п'єзоприводу за рахунок використання від'ємного зворотного зв'язку. Наведено отримані схемотехнічні та функціональні моделі таких перетворювачів, АЧХ, ФЧХ, а також перехідні характеристики. Аналіз характеристик показав, що використання від'ємного зворотного зв'язку дозволяє повністю усунути небажані коливання п'єзоелементів п'єзоприводу.

## РОЗДІЛ 4

### РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЙ КОМПОНЕНТІВ КОМП'ЮТЕРНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ПОДАЧЕЮ ПАЛИВА СУДНОВОГО ДИЗЕЛЯ НА БАЗІ ПРИВОДУ ВИКОНАВЧИХ МЕХАНІЗМІВ З П'ЄЗОПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

В попередніх двох розділах розглядалися теоретичні положення розробки систем подачі палива судового дизеля на базі приводу виконавчих механізмів з п'єзоперетворювачів. Даний розділ присвячений опису розроблених конструкцій, в яких реалізовані усі попередні теоретичні досягнення, наведено результати експериментальних досліджень.

#### **4.1. Експериментальні дослідження п'єзоприводу зі складального стовпа п'єзоелектричних шайб**

Результати теоретичних досліджень розробки блока управління подачею палива з приводом зі складального стовпа п'єзоелектричних шайб наведено у підрозділі 2.2. В роботі було проведено експериментальна перевірка отриманих теоретичних положень.

Для перевірки теоретичних положень була виготовлена експериментальна установка, в якій використовувалися п'єзоелементи різних модифікацій. Так, на рис. 4.1 показана конструкція складального стовпа з 3-х п'єзокерамічних елементів – дисків діаметром 25 мм і висотою 1 мм з п'єзокераміки ЦТС-19.

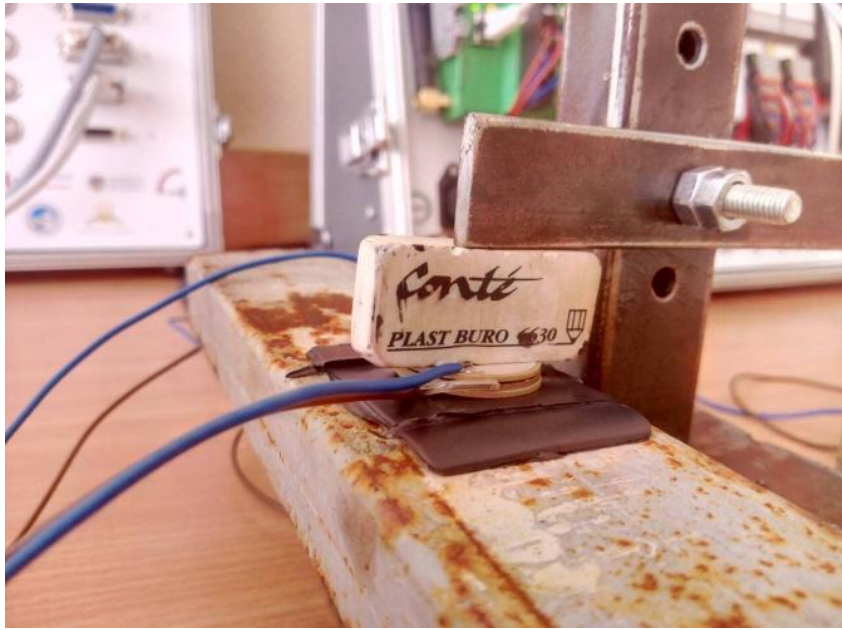


Рис. 4.1. Складальний стовп з трьох дискових п'єзоелементів

Крім того, в подальших експериментах були досліджені й інші типи складальних стовпів – з інших п'єзоелементів, а саме:

- 2-х дисків діаметром 20 мм та висотою 2 мм;
- 2 суцільні циліндри діаметром 20 мм та висотою 18 мм;
- 15 шайб діаметром 17,8 мм та висотою 0,7 мм.

Деякі з цих конструкцій показані на рис.4.2.

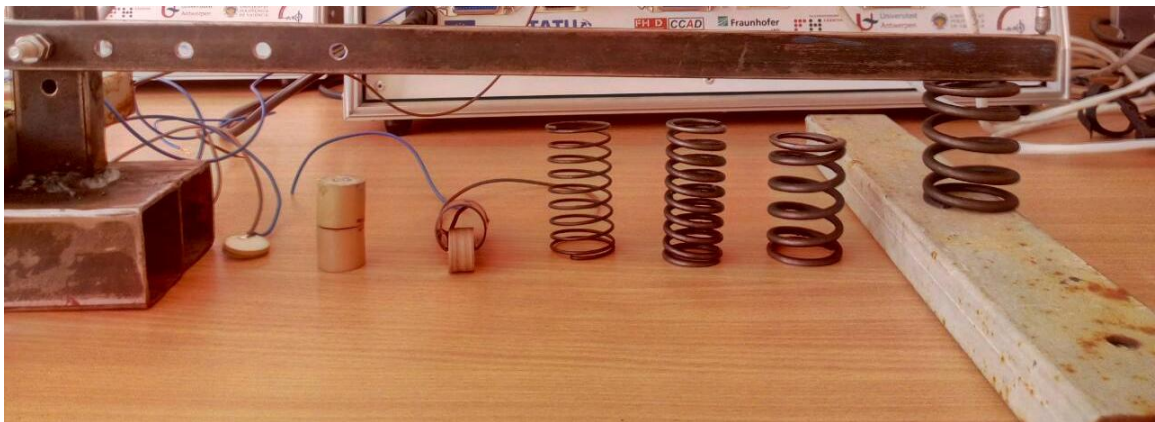


Рис. 4.2. Вигляд варіантів складальних стовпів та пружин

Для протипаги при проведенні експериментів було розглянуто чотири типи пружин, вигляд яких також показаний на рис.4.2, а їх параметри відображено в табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Параметри пружин

	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4
Діаметр проволоки $d$ , мм	1,5	3	4	4,6
Діаметр пружини $D$ , мм	29	26,3	32,5	38,5
Висота пружини $H$ , мм	55	58	52	51
Кількість активних витків	9	9	4	4
Жорсткість пружини $s$ , Н/мм	0,22	4,9	18,3	19,3

В якості вимірювального приладу був використаний індикатор часового типу [46] – індикатор японський MITUTOYO, діапазон 0,01-10 мм, серійний номер №2046-08. Фото індикатора показано на рис.4.3.

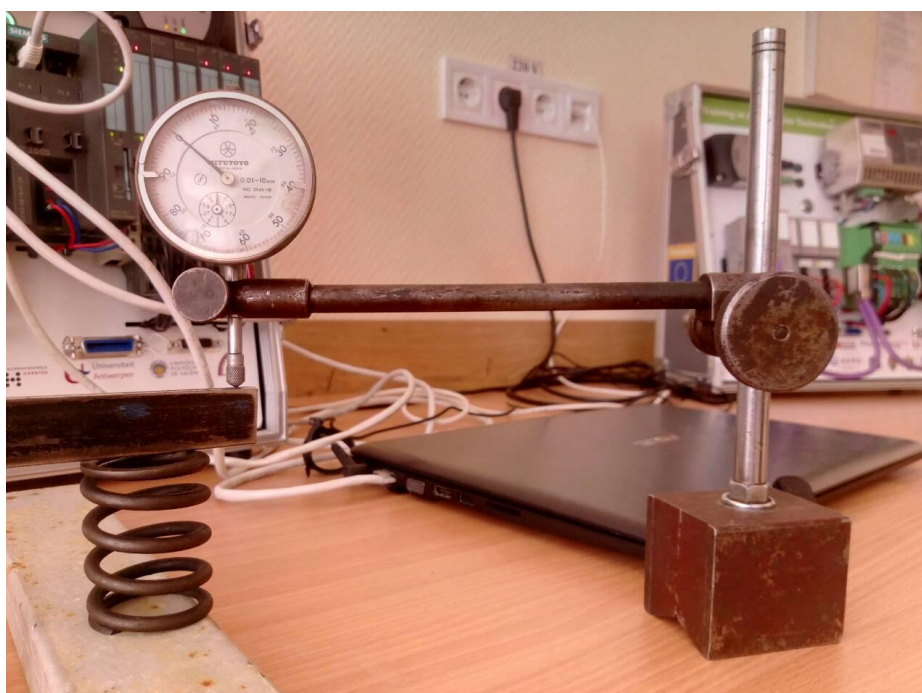


Рис. 4.3. Вигляд застосованого індикатора часового типу



В експерименті був використаний важіль першого роду, одне плече 42 см, а інше – 4 см, тобто співвідношення 1:10,5. Відношення пліч та висота важеля змінювалися при необхідності. Загальний вигляд установки показаний на рис.4.4.

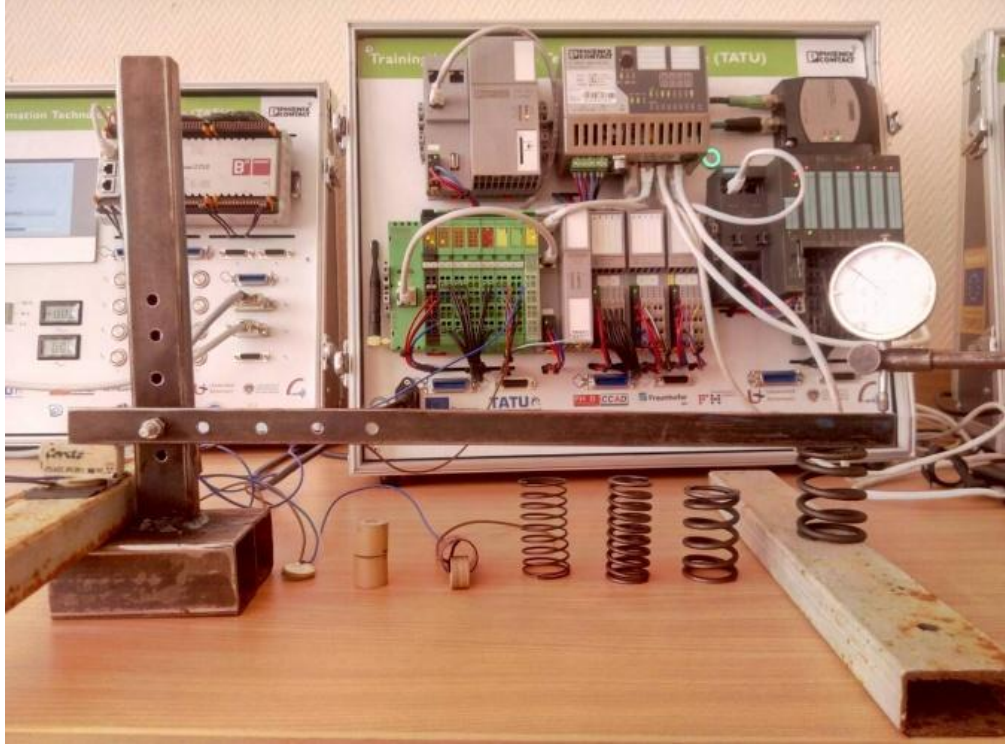


Рис. 4.4. Загальний вигляд установки

Для дослідження електричних параметрів п'єзопластин був використаний переносний стенд TSL (TATU Smart Lab, інтелектуальна лабораторія TATU), яка містить сучасні пристрої і модулі виробництва німецьких компаній Berghoff, Phoenix Contact и Siemens (рис.4.5) [74].

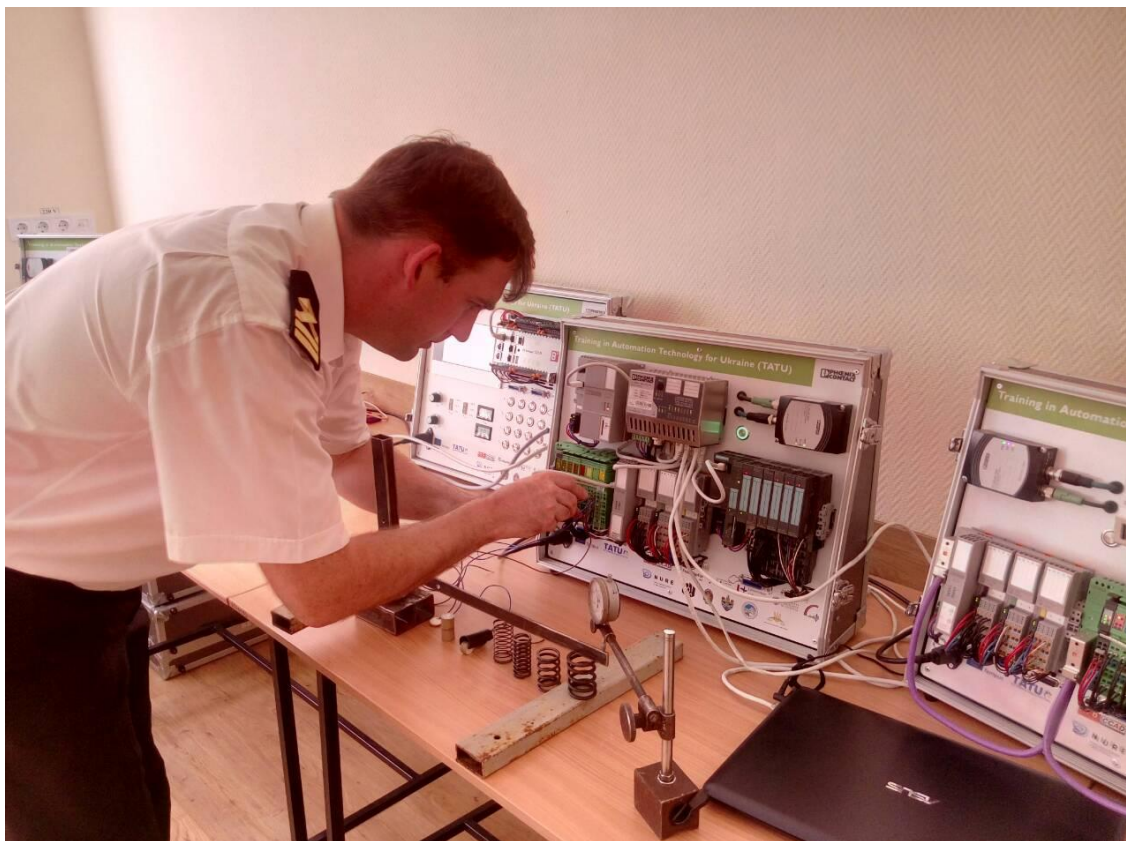


Рис. 4.5. Підключення до мікропроцесорного стенду

Стенд отриманий в рамках проекту TEMPUS 544010-TEMPUS-1-2013-1-DE-TEMPUS-JPHES TATU – "Trainings in Automation Technologies for Ukraine" (тренінги в області технологій автоматизації для України), в якій беруть участь: Донецький національний технічний університет, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Національний університет «Одеська морська академія», Одеський національний політехнічний університет і Харківський національний університет радіоелектроніки, а також п'ять західноєвропейських університетів: Hochschule Düsseldorf University of Applied Sciences;



Carinthia University of Applied Sciences; Polytechnic University of Valencia; University of Antwerpen; University of Limerick [40, 41].

TSL складається з трьох наборів апаратних модулів, кожен з яких розміщений в окремому переносному ящику (валізі) і може бути використаний як незалежно від інших, так і спільно з ними. Зовнішній вигляд модулів TSL показаний на рис. 4.6 [40, 41].

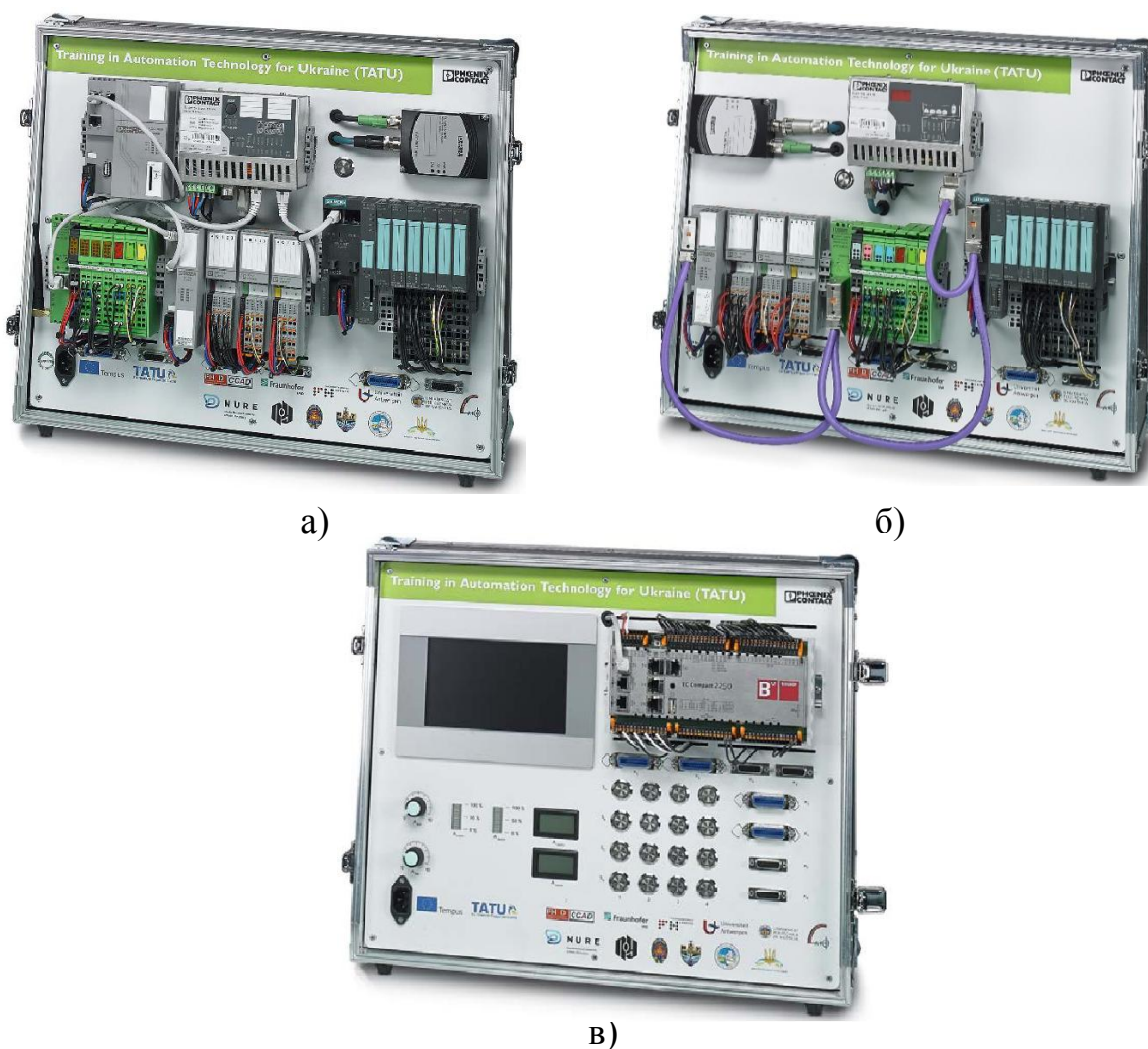


Рис. 4.6. Зовнішній вигляд модулів TSL: а) ПЛК та Profinet, б) Profibus, в) Process Simulation

Взаємодія модулів та їх з'єднання кабелем показані на рис. 4.7 [40].

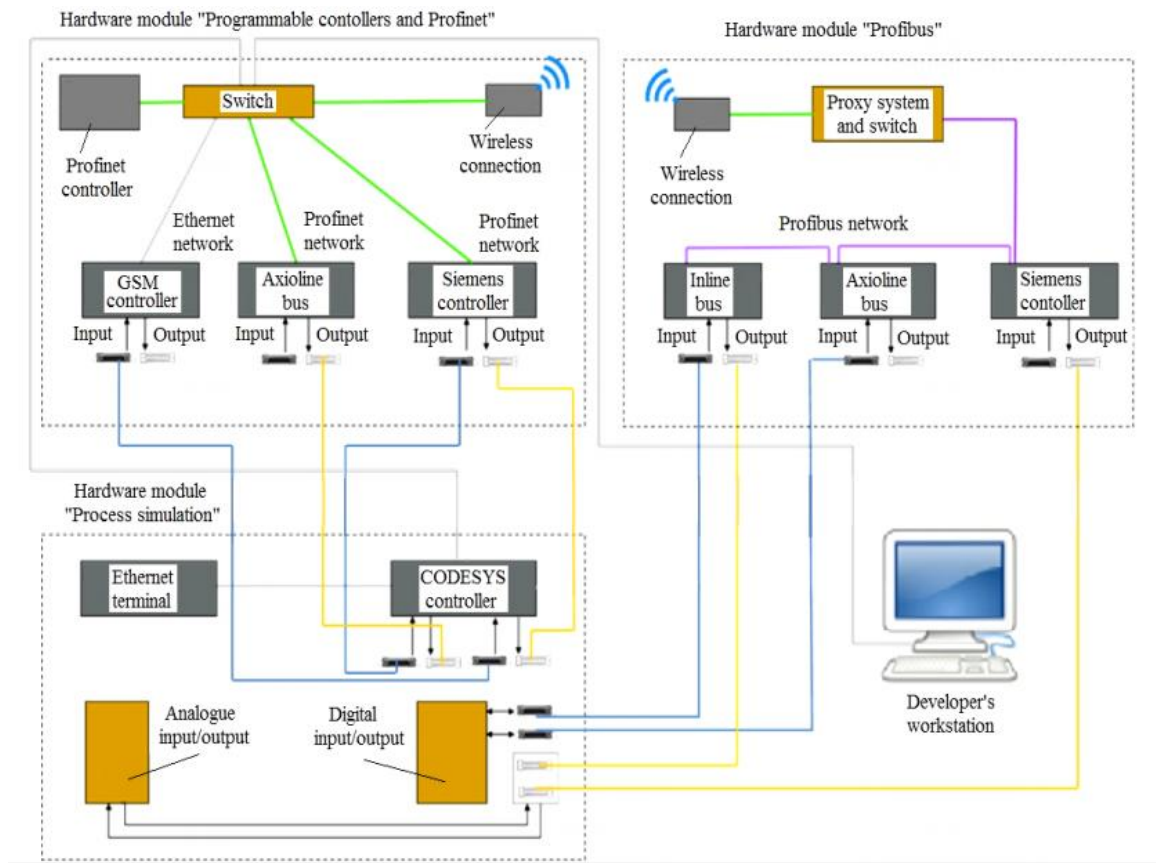


Рис. 4.7. Структура апаратних модулів TSL та їх підключення до комп'ютера [40]

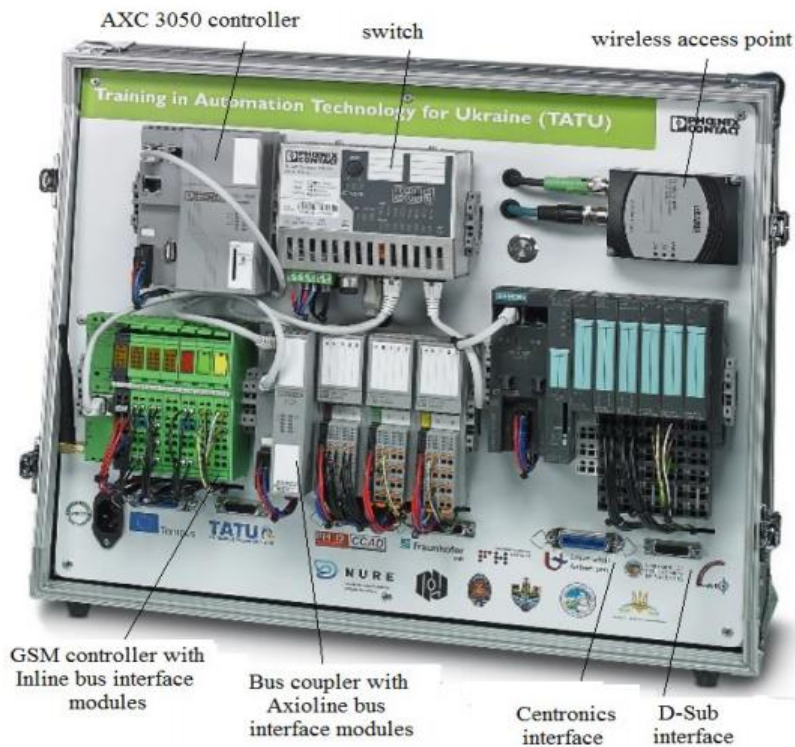


Рис. 4.8. Зовнішній вигляд першого апаратного модуля «Програмовані контролери та PROFINET» [40]

Перший апаратний модуль «Програмовані контролери та PROFINET» містить два програмовані контролери: AXC 3050 та ILC 151 GSM / GPRS, пристрої вводу-виводу PROFINET, керований мережевий комутатор та бездротовий зв'язок. Зовнішній вигляд показаний на рис. 4.8 [40].

Вигляд основних модулів показаний на рис. 4.9 [40].

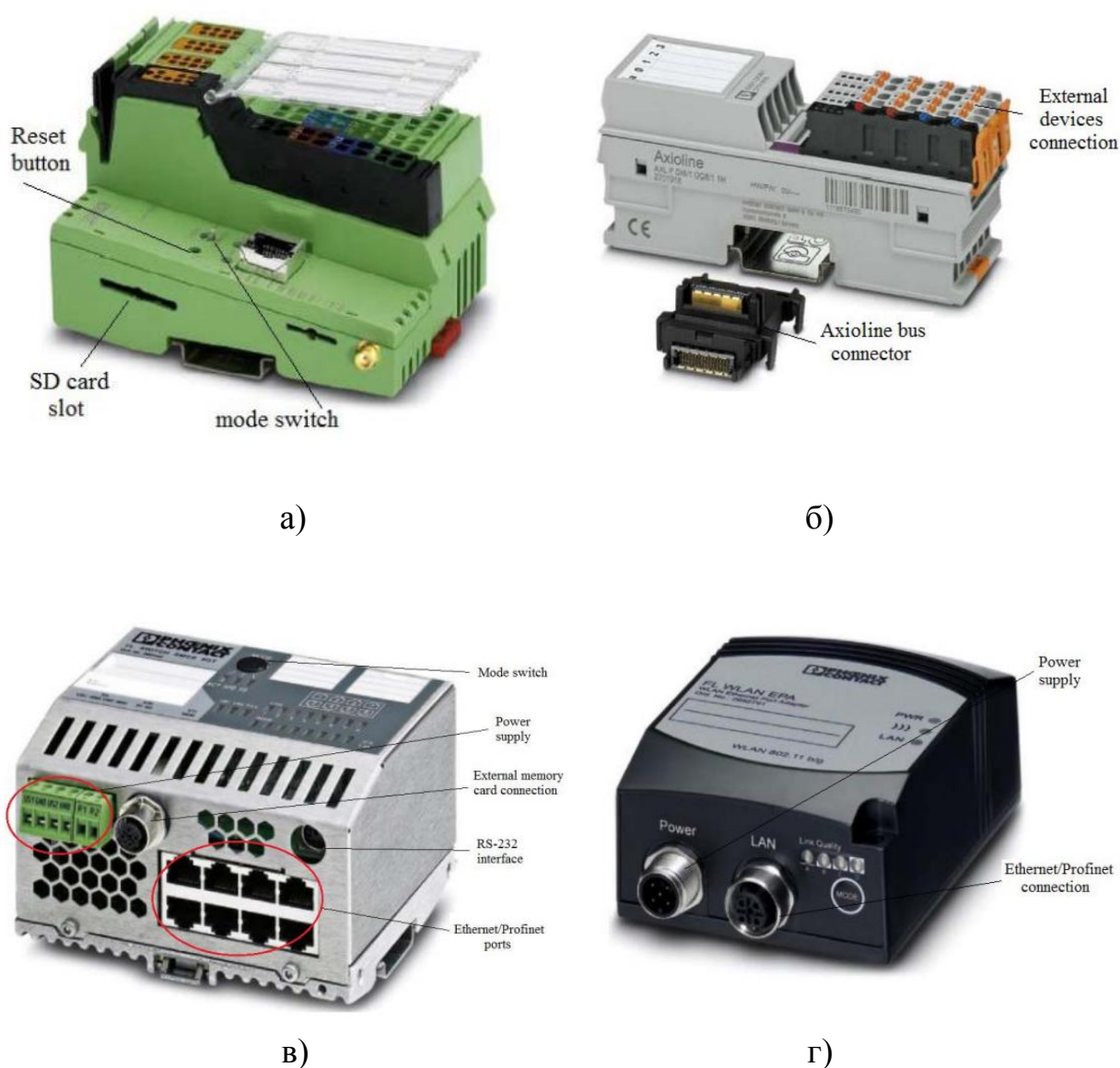


Рис. 4.9. Основні модулі, що вико ристовуються в апаратному модулі

«Програмовані контролери та PROFINET»:

а – ILC 151 GSM/GPRS контролер; б – AXL F DI8/1 DO8/1 1H;

в – FL SMCS 8TX-PN switch; г – Wireless Access Point FL WLAN EPA

Контролер GSM/GPRS ILC 151 (рис.4.9, а) є невеликим, масштабованим, модульним контролером з вбудованими портами для підключення мереж Ethernet, Interbus та інтегрований чотирьохдіапазонний модем. Контролер може бути налаштований та запрограмований у ПК Work за допомогою Ethernet з'єднання на всіх п'яти мовах програмування відповідно до IEC 61131-3. Для доступу до контролера використовуються протоколи передачі даних TCP/IP та UDP/IP. Рівні вводу-виводу підключені до контролера через шину Interbus. Контролер GSM / GPRS ILC 151 має лише два аналогових виходи. Для розширення можливостей контролера використовуються додаткові апаратні модулі.

Модуль AXL F DI8/1 DO8/1 1H (мал. 1.11) використовується для цифрового вводу та виводу, має 8 входів (24 В постійного струму) та 8 виходів (24 В постійного струму), максимальний струм 500 мА, побудований по технології одножильного зв'язку. Модуль призначений для роботи як частина станції Axioline F і використовується для отримання та виведення цифрових сигналів. Часові фільтри на входах підвищують захист від шуму. Мінімальний час оновлення модуля менше 100 мс. Наявна діагностика, присутні індикатори стану.

Основні характеристики підсистеми вводу:

- 8 вхідних сигналів;
- 24 В, 2,4 мА постійного струму;
- підключення датчиків з використанням одножильних технологій;
- часові фільтри можуть бути налаштовані на три можливі додаткові значення - менше 100 мс, 1000 мс і 3000 мс;
- максимальна частота входів становить 5 кГц.

Характеристики підсистеми виводу:

- 8 вихідних сигналів;
- 24 В, 500 мА постійного струму;
- з'єднання приводів на основі однопровідної схеми.

Модуль FL SMCS 8TX-PN (Smart Managed Compact Switch) – це



інтелектуальний компактний Ethernet промисловий стандартний перемикач (рис. 4.9, в). Пристрій не використовує вентилятор, що зменшує енергоспоживання. При цьому він відповідає всім галузевим стандартам з точки зору електромагнітної сумісності, температурних умов, механічного навантаження та забезпечення максимально можливого рівня доступності.

Бездротова точка доступу FLASH WLAN EPA (EPA - Ethernet Port Adapter) являє собою високопродуктивний інтерфейс між кабелем Ethernet, PROFINET та бездротовою мережею (рис 4.9, г). Протокол використовується для передачі даних на другий шар (L2) моделі OSI (семиступінчаста відкрита система взаємозв'язку). FL WLAN EPA сертифікована для сумісності з бездротовими локальними мережами IEEE стандарту 802.11b/g/n працює на частоті 2,4 ГГц.

Таким чином, апаратний модуль «Програмовані контролери та PROFINET» дозволяє вивчення широкого кола завдань: як базового програмування контролерів в PC Work для роботи з передачею даних, так і розроблені на основі технології Ethernet та технології бездротовою передачі даних. Два програмованих контролера можуть використовувати протоколи передачі даних TCP/IP або Modbus TCP.

Діаграма з'єднань пристроїв у першому модулі показана на рис. 4.10.

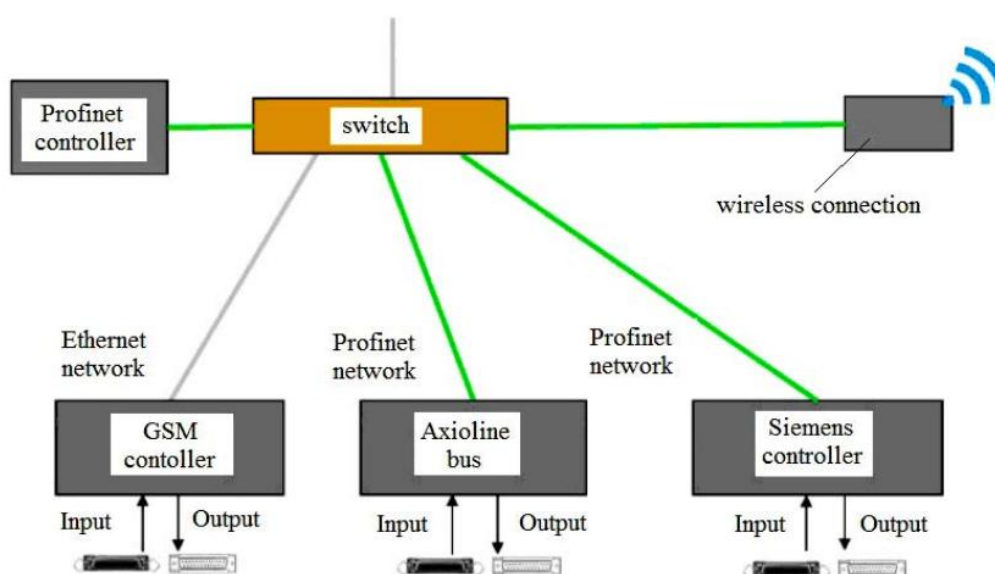


Рис. 4.10. Підключення пристроїв в першому апаратному модулі TSL «Програмовані контролери та PROFINET» [40]

Другий апаратний модуль містить три пристрої PROFIBUS I/O, PROFINET проксі для вводу/виводу інформації для технології PROFIBUS DP з інтегрованим перемикачем і бездротова точка доступу (рис. 4.11). Цей модуль може бути використаний для вивчення технології PROFIBUS. Його можна використовувати в поєднанні з першим апаратним модулем або безпосередньо з контролером, який працює на PROFINET або PROFIBUS технології.

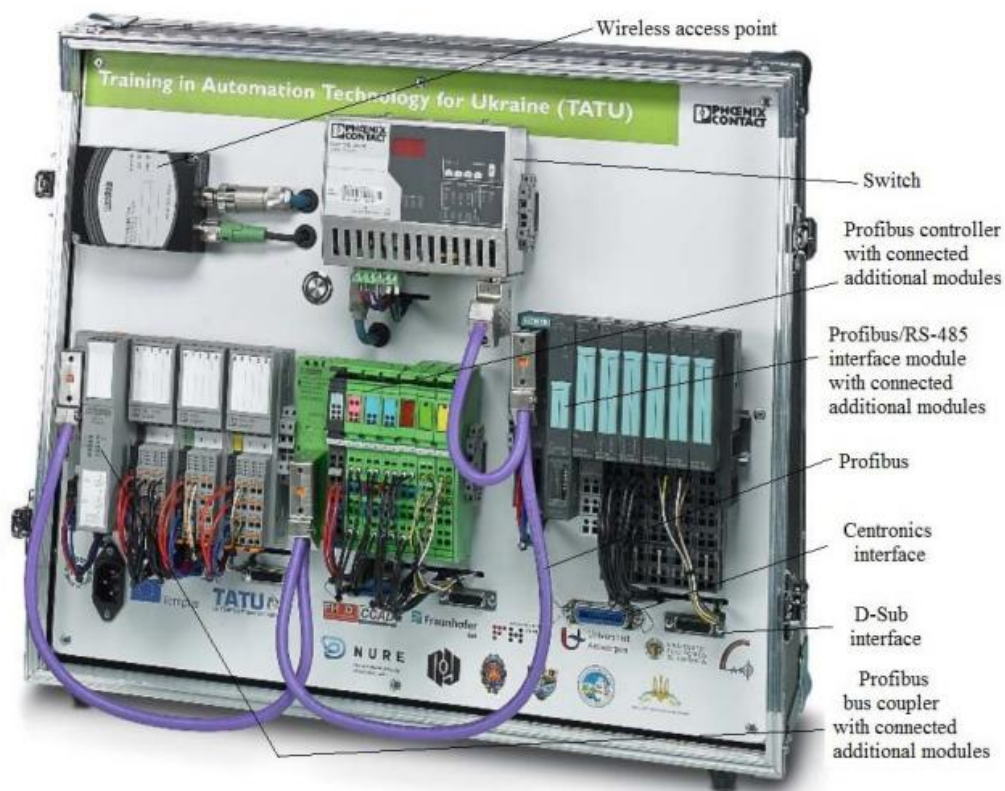


Рис. 4.11. Другий апаратний модуль TSL «PROFIBUS»

Схема з'єднань пристроїв у другому модулі TSL «PROFIBUS» показана на рис. 4.12.

Нарешті останній, третій апаратний модуль, призначений для моделювання технологічних процесів (рис. 4.13). Моделі повинні бути розроблені в CoDeSys версії 3.x і завантажені в контролер EtherCAT EC2250. Для візуалізації також можливо використовувати вбудований графічний термінал Ethernet ET1007 WT. Крім того, цей модуль дозволяє вивчати програмування контролерів у CoDeSys версії 3.x.

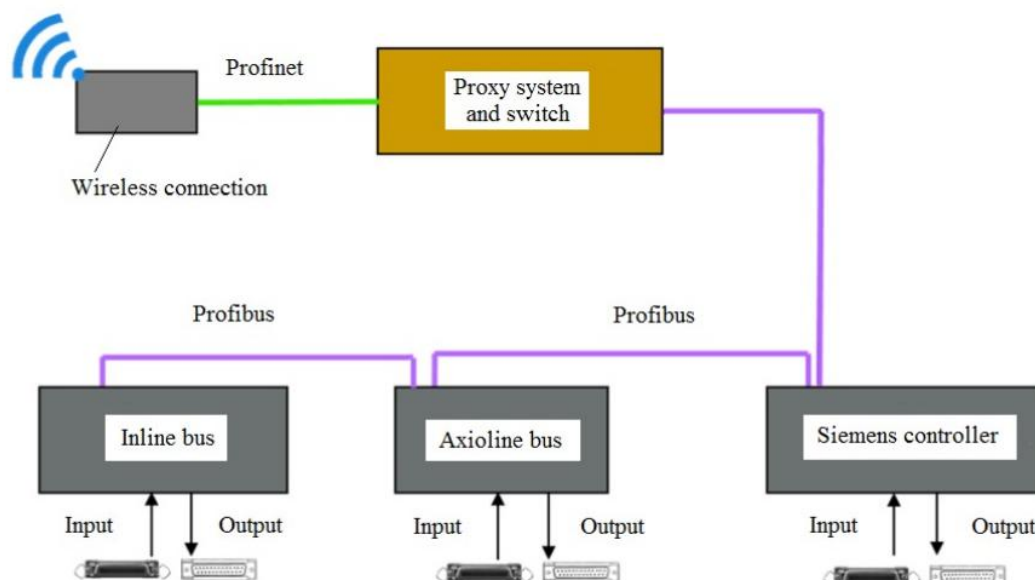


Рис. 4.12. Схема з'єднань пристроїв у другому апаратному модулі TSL«PROFIBUS»

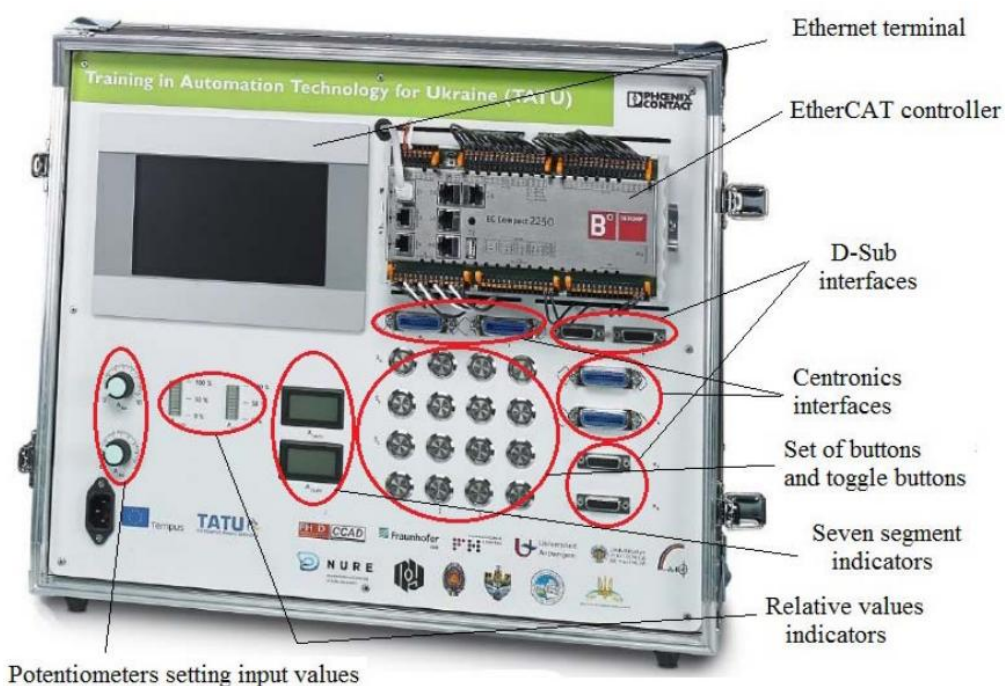


Рис. 4.13. Третій апаратний модуль TSL «Процес моделювання»

Результати проведених експериментальних досліджень підтвердили отримані теоретичні положення, що були викладені у попередніх розділах. Для прикладу на рис. 4.14 показана залежність переміщень приводу для

різних типів пружин згідно таблиці 4.1 для конструкції за рис. 4.1 – складального стовпа з 3-х п'єзокерамічних елементів (дисків діаметром 25 мм і висотою 1 мм з п'єзокераміки ЦТС-19).

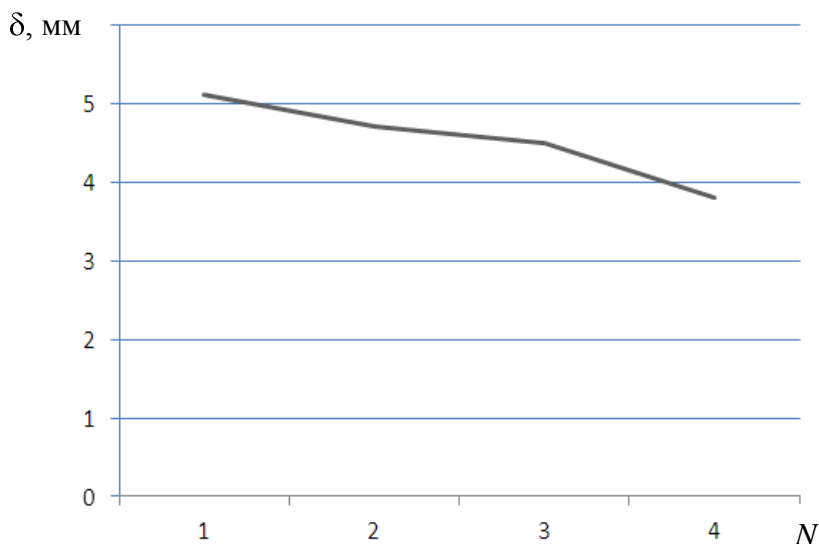


Рис. 4.14. Значення переміщення приводу для різних типів пружини за номером ( $N$ ) з таблиці 4.1

Співвідношення для важеля першого роду дорівнювало 1:10,5 (одне плече 42 см, інше – 4 см). До п'єзоелементів від генератора подавалася змінна напруга з амплітудою 10 В на резонансній частоті, яка для даних п'єзоелементів дорівнювала 78,3 кГц.

Як видно з рис. 4.14, для всіх типів пружин окрім останньої (найжорсткішої) було досягнуто необхідне значення переміщення, що дорівнює 4 мм.

Необхідне значення було досягнуто для всіх типів складальних стовпів, що розглядалися в роботі. При тому, найбільші значення були отримані для набору з 15 шайб діаметром 17,8 мм та висотою 0,7 мм, коли вдалося досягти значення переміщення в 7 мм.

В експерименті задавалося наступне значення резонансних частот:

- 97,4 кГц для дисків діаметром 20 мм та висотою 2 мм;
- 101,2 кГц для циліндрів діаметром 20 мм та висотою 18 мм;



- 114,1 кГц для шайб діаметром 17,8 мм та висотою 0,7 мм.

Таким чином, в роботі були отриманні необхідні переміщення плеча (до 4 мм) для всіх типів п'єзоелементів, що розглядалися в роботі. Це дозволяє стверджувати достовірність висунутої в роботі гіпотези щодо можливості побудови приводів виконавчих механізмів для систем подачі палива суднового дизеля на базі п'єзоелектричних перетворювачів.

#### **4.2. Розробка блоку управління подачею палива з приводом від складального стовпа п'єзоелектричних шайб**

Результати теоретичних досліджень розглянуті у підрозділі 2.2, експериментальні – у підрозділі 4.1. Розглянемо, як отримані положення реалізуються у конструкціях.

Один з варіантів такої конструкції наведений на рис.4.15. Система управління подачею палива "інтелектуального" двигуна містить датчики, блок управління подачею палива та п'єзопривід, контрольований мікропроцесорною системою керування. Крім того, до неї введено систему керування блоком управління подачею палива на базі регульованого перетворювача напруги, сигнал з якого подається на п'єзопривід зі складального стовпа п'єзокерамічних шайб, жорстко встановлений на основі і який за допомогою коромисла забезпечує переміщення золотника блока управління подачею палива [83].

За рис. 4.15 блок управління подачею палива 1 з'єднано за допомогою чотирьох болтів, два з яких показано на кресленні, з основою 2, на іншому боці якої встановлена опора 3, що з'єднана з основою за допомогою двох болтів, один з яких зображено на кресленні, з коромислом 4, яке з одного кінця приєднано до золотника БУПП за допомогою шарніру, а з іншого до складального стовпа п'єзокерамічних шайб 5, який встановлено у особистий стакан і з'єднано з блоком керування, до якого поступають

сигнали від датчика положення колінчатого валу 6 та датчику кількості упорснутого палива 7.

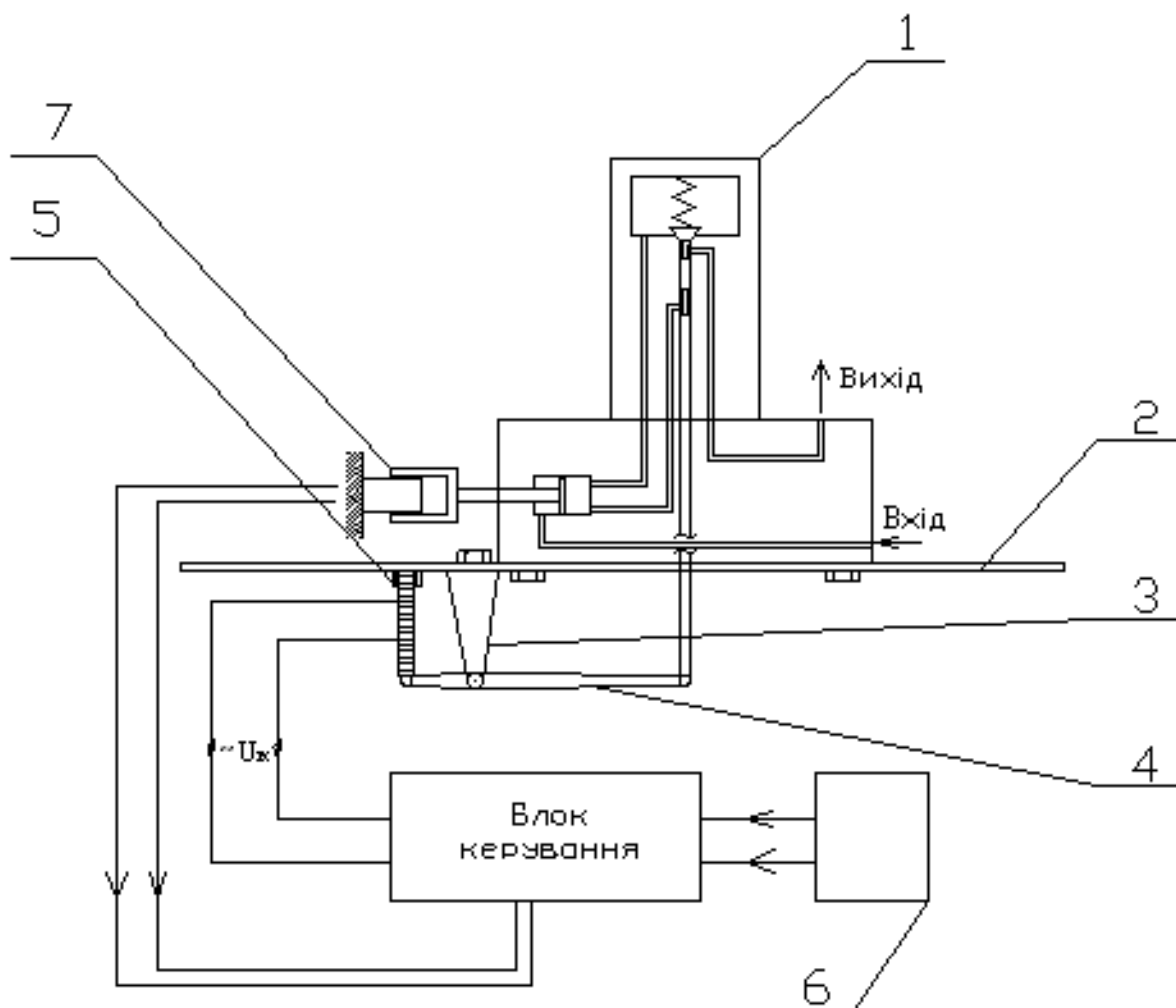


Рис. 4.15. Блок управління подачею палива з п'єзоприводом: 1 – блок управління подачею палива; 2 – основа; 3 – опора; 4 – коромисло; 5 – наборний стовп п'єзоелектричний шайб; 6 – датчик положення колінчастого валу; 7 – датчик кількості упорснутого палива

У вихідному стані при зупиненому двигуні золотник БУПШ знаходиться під впливом внутрішньої пружини у нижньому положенні, при якому прохід палива закрито. Паливо подається через вхідний отвір під постійним тиском, а на виході паливо відсутнє. При запуску двигуна блок керування отримує сигнал від датчика положення колінчатого валу та датчика кількості упорснутого палива, згідно з якими здійснюється

управління упорскуванням палива, і формує імпульс на п'єзопривід, який повертає коромисло проти часової стрілки. При цьому коромисло переміщує золотник БУПП в верх, і відкривається прохід палива. При отриманні сигналу з датчика кількості упорснутаго палива о проході необхідної кількості палива через БУПП блок керування знімає імпульс з п'єзоприводу і золотник повертається в початкове положення під дією внутрішньої пружини БУПП [20, 32, 33, 35, 49, 104].

В даній конструкції стовп п'єзокерамічних шайб забезпечує:

- високий пусковий момент та швидкодію;
- високу надійність і ресурс (більш 50000 ч);
- стабільну роботу при температурі до 150°C;
- мале енергоспоживання; іскровибухонебезпечність;
- відсутність випромінюваних магнітних полів;
- безшумну роботу;
- меншу металоємкість системи у порівнянні з гідравлічною;
- порівняльно низьку початкову вартість.

З метою зменшення кількості масляних трубопроводів, в роботі була розроблена конструкція приводу, що зображена на рис. 4.16, яка складається з двох гідроциліндрів різного діаметру і яка приводиться в дію складальним стовпом п'єзоелектричних шайб [84].

Система керування подачею палива двигуна за рис.4.8 містить датчики, блок керування подачею палива та п'єзопривід, контрольований мікропроцесорною системою керування. До цієї мікропроцесорної системи введено систему керування блоком керування подачею палива на базі регульованого перетворювача напруги, сигнал з якого подається на п'єзопривід зі складального стовпа п'єзокерамічних шайб, встановлений в повідному гідроциліндрі більшого діаметра та попередньо навантажений пружиною, і який за допомогою гідравлічного трубопроводу забезпечує переміщення сприймаючого поршня гідроциліндра меншого діаметра, і як наслідок – золотника блока керування подачею палива.

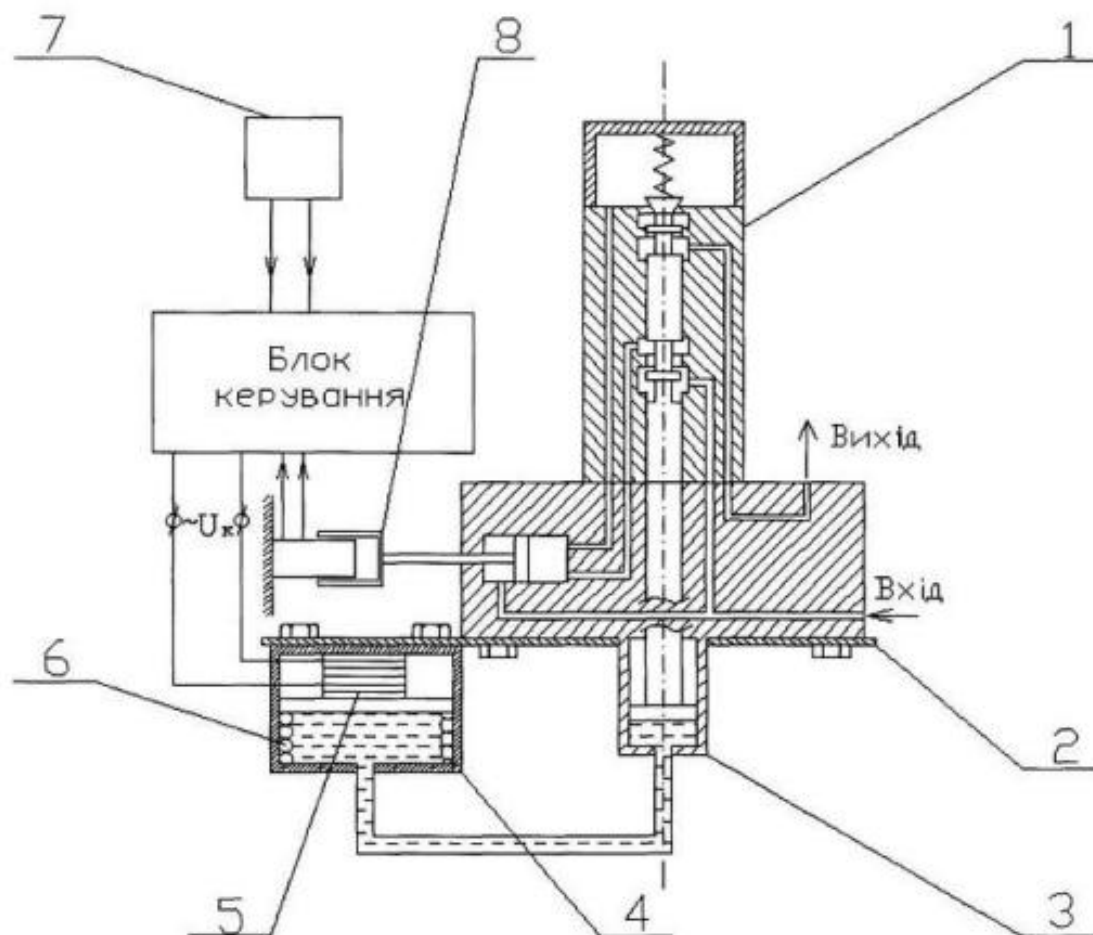


Рис. 4.8. Блок управління подачею палива з п'єзоприводом: 1 – блок управління подачею палива; 2 – основа; 3 – ведений гідроциліндр; 4 – провідний гідроциліндр; 5 – складальний стовп п'єзоелектричний шайб; 6 – пружина попереднього навантаження; 7 – датчик частоти обертання; 8 – датчик кількості уприснуто палива

Принцип роботи блоку управління подачею палива ідентичний роботі, що описана для блоку за рис.4.7.

### 4.3. Розробка блока управління подачею палива з приводом від роторних п'єзодвигунів

Результати теоретичних досліджень за цією тематикою описано у підрозділі 2.3. Розглянемо, як отримані положення реалізуються у конструкціях.

Застосування роторних п'єзодвигунів обмежено необхідністю застосування перетворювачів обертального руху в зворотно-поступальний рух. Як варіант, можливе застосування черв'ячних редукторів, кривошипно-шатунного механізму, кулачкових шайб тощо.

Були отримані патенти [85, 86] на конструкції з черв'ячною передачею (рис. 4.9) і кулачковою шайбою (рис. 4.10). У приводах використовуються кільцеві п'єзоелементи з п'єзокераміки ЦТБС-3. Матеріал ЦТБС-3 особливий тип силової п'єзокераміки з основними хімічними компонентами цирконат-титанат-барію-свинцю. Даний матеріал призначений для виготовлення елементів, що працюють в режимі випромінювання і (або) прийому в умовах впливу сильних електричних полів і механічних напружень в рекомендованому діапазоні температур  $-60...+85^{\circ}\text{C}$ .

Система керування подачею палива "інтелектуального" двигуна за рис.4.9. містить датчики, блок керування подачею палива та п'єзопривід, що контролюється мікропроцесорною системою керування, систему керування блоком керування подачею палива на базі регульованого перетворювача напруги, роторний п'єзодвигун, що жорстко встановлений на основі [85].

Конструкція за рис.4.9 містить блок керування подачею палива 1, який з'єднано за допомогою чотирьох болтів, два з яких показано на кресленні, з основою 2, всередині якої на двох підшипниках встановлено шнек 3 з'єднаний за допомогою шліців з одним кінцем вала ротаційного п'єзодвигуна 4, аз іншого кінця встановлено диск з мітками 5 та оптичний

датчик (6 – джерело, 7 – приймач), який реєструє положення ротора при перетинанні мітки оптичного каналу, сигнал з якого також як сигнал датчика положення колінчатого валу 8 та датчика кількості упрснутого палива 9 поступає до блока керування, який змінює частоту обертання п'єзодвигуна.

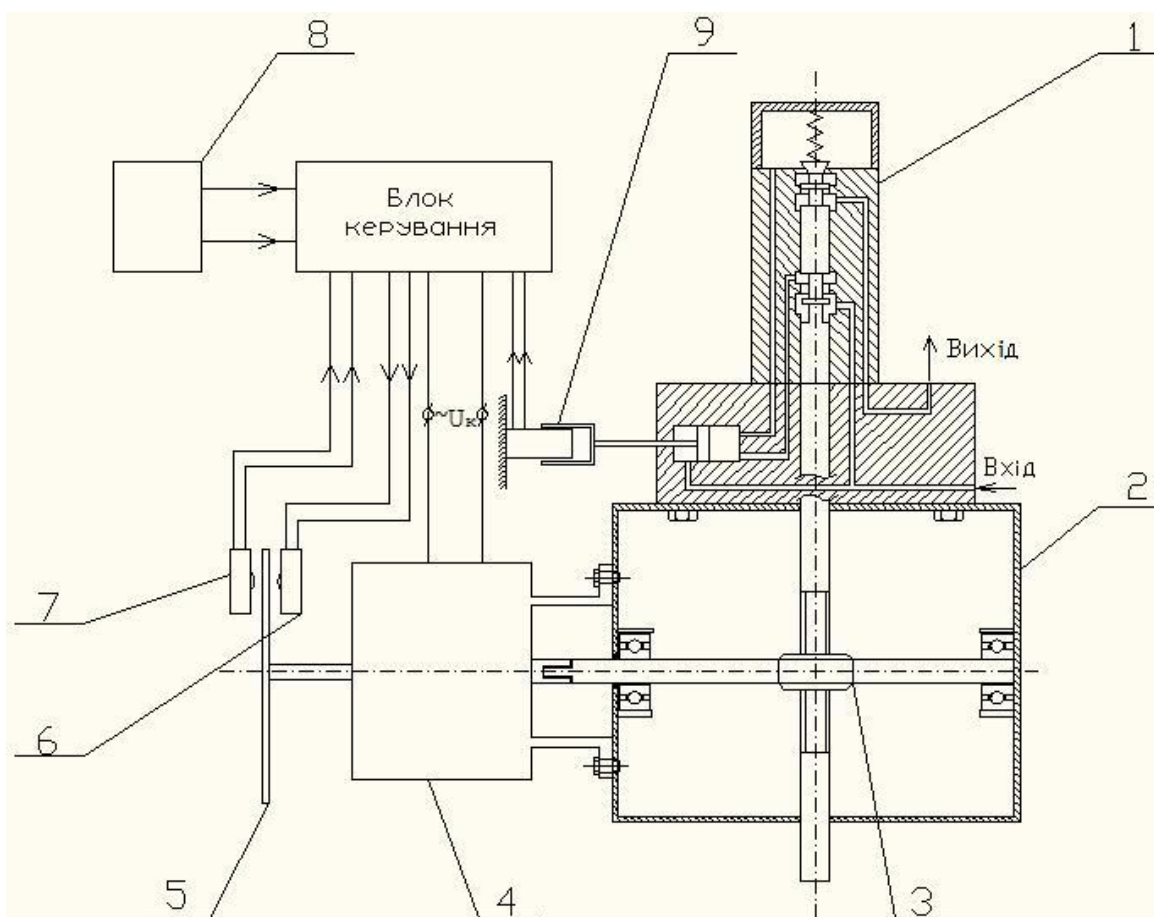


Рис. 4.9. Конструкція блоку управління подачею палива з системою позиціонування на базі роторного п'єзодвигуна з черв'ячною передачею

У вихідному стані при зупиненому двигуні золотник БУПШ знаходиться під впливом внутрішньої пружини у нижньому положенні, при якому прохід палива закрито. Паливо подається через вхідний отвір під постійним тиском, а на виході паливо відсутнє. При запуску двигуна блок керування отримує сигнал від датчика положення колінчатого валу та

датчика кількості упорснутого палива, згідно з якими здійснюється керування упорскуванням палива, і формує сигнал на п'єзопривід, який обертає шнек. При цьому шнек переміщує золотник БУПП вверху, і відкривається прохід палива. При отриманні сигналу з датчика кількості упорснутого палива о проході необхідної кількості палива через БУПП блок керування формує зворотній сигнал на п'єзопривід і золотник повертається в початкове положення під дією внутрішньої пружини БУПП.

Перевагами такого рішення є:

- відсутність коромисла;
- відсутність допоміжних пружин попереднього навантаження;
- високий пусковий момент та швидкодію;
- висока надійність і ресурс (більш 50000 ч);
- мале енергоспоживання;
- іскровибухонебезпечність;
- відсутність випромінюваних магнітних полів;
- безшумна робота;
- менша металоємкість системи у порівнянні з гідравлічною;
- порівняльна низька початкова вартість.

Конструкція за рис. 4.10 наближена за описом до конструкції за рис.4.9 і містить блок керування подачею палива 1, який з'єднано за допомогою чотирьох болтів, два з яких показано на кресленні, з основою 2, всередині якої на двох підшипниках встановлено вал 3 з кулачковою шайбою з'єднаний за допомогою шліців з одним кінцем вала ротаційного п'єзодвигуна 4, а з іншого кінця встановлено диск з мітками 5 та оптичний датчик (6 – джерело, 7 – приймач), який реєструє швидкість обертання ротора при перетинанні мітки оптичного каналу, сигнал з якого також як і сигнал датчика положення колінчатого валу 8 та датчика кількості упорснутого палива 9 поступає до блока керування, який змінює частоту обертання п'єзодвигуна.

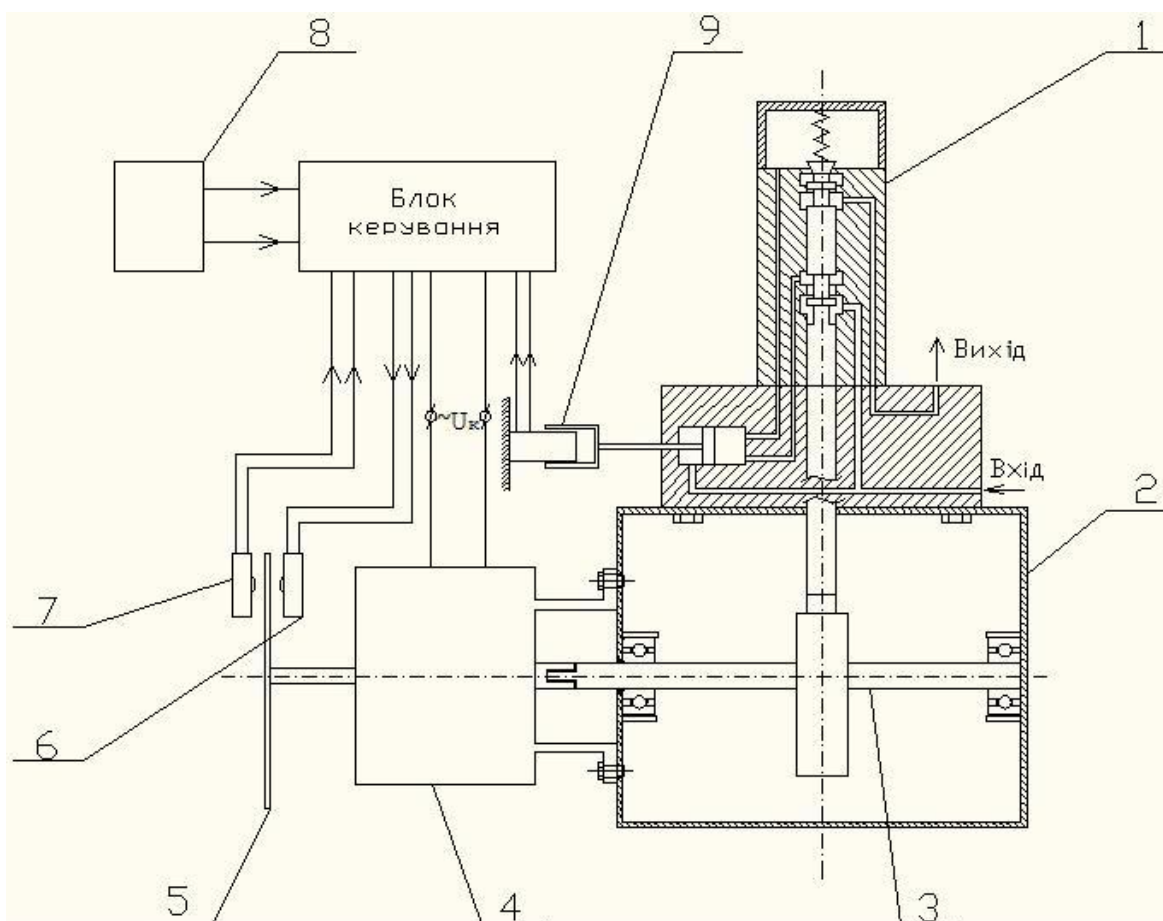


Рис. 4.10. Конструкція блоку управління подачею палива з системою позиціонування на базі роторного п'єзодвигуна з кулачковою шайбою

У вихідному стані при зупиненому двигуні золотник БУПШ знаходиться під впливом внутрішньої пружини у нижньому положенні, при якому прохід палива закрито. Паливо подається через вхідний отвір під постійним тиском, а на виході паливо відсутнє. При запуску двигуна блок керування отримує сигнал від датчика положення колінчатого валу та датчика кількості упорснутого палива, згідно з якими здійснюється керування упорскуванням палива, і встановлює частоту обертання п'єзоприводу, який за допомогою кулачкової шайби переміщує золотник, тим самим відкриває, чи закриває прохід палива [86].

Слід зазначити, що наявність кулачковою шайби не дозволяє забезпечити зміну закону подачі палива, без заміни шайби. Черв'ячна передача дозволяє забезпечити велике зусилля, що в сукупності з високою



кутовою швидкістю п'єзодвигуна забезпечить роботу системи позиціонування.

Як вже було показано в розділі 2.1, для переміщення золотника блоку управління подачею палива необхідно розвинути зусилля 12,3 кН і забезпечити переміщення золотника на 4 мм за 1 мс, що і було досягнуто в отриманих конструктивних рішеннях.

Крім того, слід зазначити, що на базі п'єзоелектричних перетворювачів для потреб судна можуть бути реалізовані й інші компоненти двигунів. Так, зокрема, автором була розглянута та запатентована [88] конструкція суднового дизеля з п'єзогенератором, де з п'єзокераміки була виготовлена циліндрична кришка, що дозволило виробляти додаткову електроенергію для судових потреб [67]. Також деякі рішення розглянуті в іншому патенті автора [82], що відноситься до конструкції віскозиметра, який необхідний для виміру в'язкостей рідин на судні. Проте через непряме відношення результатів розробок в цих патентах до створення переміщень п'єзоприводів надалі в роботі їх не розглядається.

#### **4.4. Порівняння розроблених систем управління подачею палива з відомими рішеннями**

Відома класифікаційна схема основних типів паливних систем високого тиску була представлена в п. 1.1 на рис. 1.1. Беручи до уваги розроблені в даній дисертаційній роботі нові конструктивні рішення, вона може бути тепер розширена за рахунок впровадження нового типу приводу виконавчого механізму на базі п'єзоелектричних перетворювачів.

Нова класифікаційна схема показана на рис.4.11. Нові два блоки виділені на рисунку товстими лініями і відповідним шрифтом.

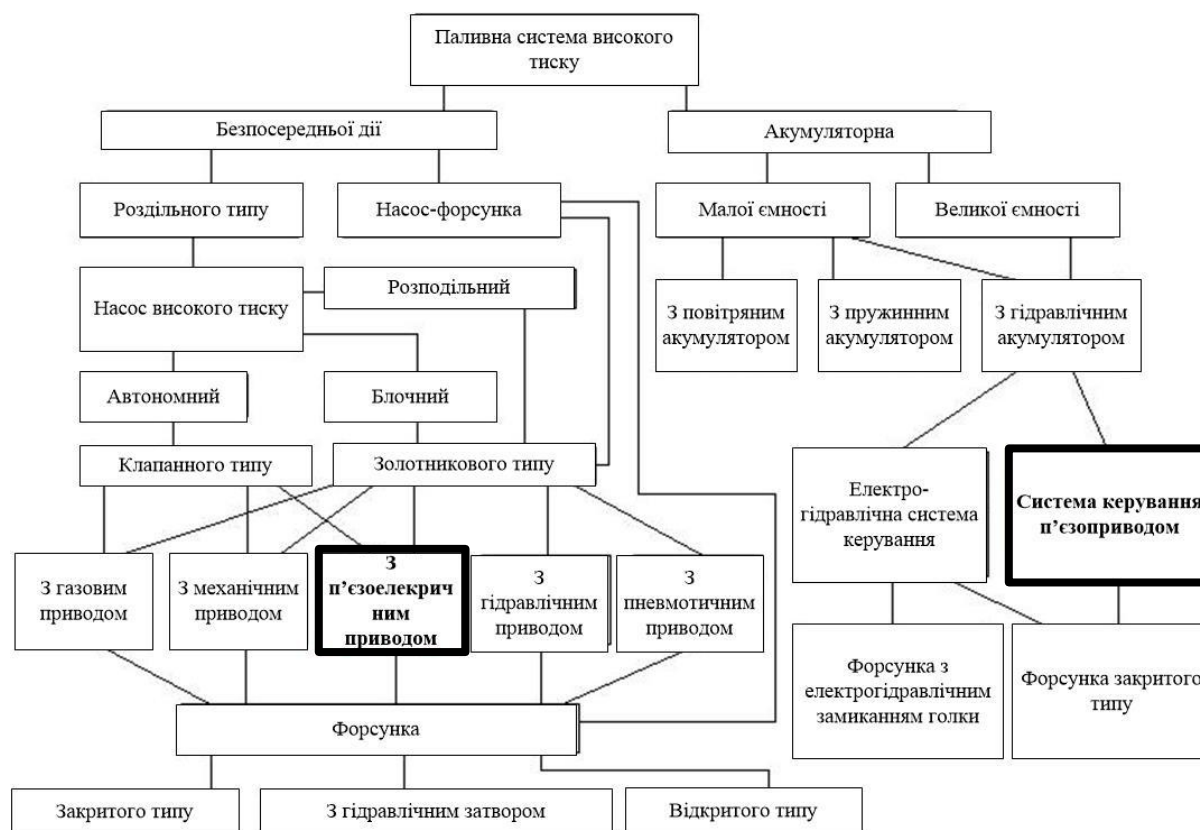


Рис. 4.11. Нова класифікаційна схема паливних систем високого тиску

Розроблені конструкції (за рис. 4.7 – 4.10) за характеристиками наближені до систем подачі палива 2-х тактних дизелів. Система подачі палива розроблених «інтелектуальних двигунів» спроектована подібним чином, але на відміну від дизелів з розподіленим валом, вона може бути оптимізована для роботи на різних режимах.

Місце розроблених п'єзоприводів у комп'ютерній системі управління подачі палива на прикладі модернізації системи WECS9520 з мікропроцесорним блоком FCM-20 показана на рис.4.12 (за основу взятий рисунок з [17]).

Переваги розробленого п'єзоприводу, як це вже зазначалося в п.1.2, впливають з його конструктивних рішень [53, 64, 89]:

- відсутність обмоток і простота технології виготовлення.
- високі пусковий момент і питома потужність;

- великий ККД (до 54%);
- не боїться короткого замикання на механічній стороні (не потрібна муфта);
- плавна зміна швидкості без редуктора;
- лінійна механічна характеристика.

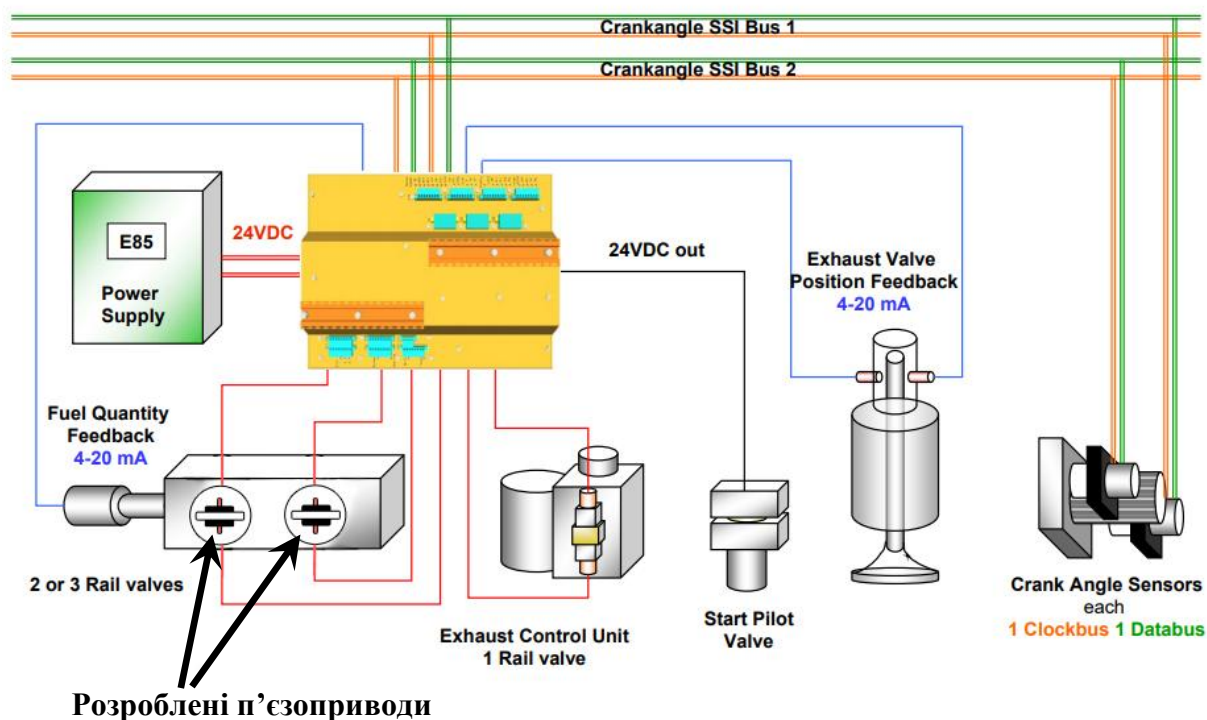


Рис. 4.12. Місце розроблених п'єзоприводів у комп'ютерній системі управління подачею палива на прикладі модернізації системи WECS9520 з мікропроцесорним блоком FCM-20

Одночасне протікання прямого і зворотного п'єзо ефектів забезпечує високу чутливість до зміни моменту навантаження, що дозволяє оцінити ступінь навантаження двигуна.

Порівняльна характеристика відомих і запропонованого приводу наведена в табл.4.2.

Таблиця 4.2 – Порівняльна характеристика приводів

На базі електромеханічного перетворювача	$F_{max}/S_0, 10^4$ Па
На базі електродвигуна постійного струму і крокової двигуна загальнопромислового призначення	1 – 5
На базі електромагніту	95 – 240
На базі розробленого п'єзоприводу	200 – 2100

З табл. 4.2 видно, що максимальне зусилля розвиває запропонований в роботі п'єзоелектричний привод.

Ще одна перевага застосування п'єзоелектричного приводу - відсутність будь-яких кінематичних передач, призначених для зміни швидкостей. При використанні п'єзокерамічних маніпуляторів і двигунів діапазон активно відпрацьовуються приводом частот і може бути розширений до декількох кілогерц. За рахунок цього значно підвищується діапазон зміни швидкостей.

Таким чином, розроблені в роботі п'єзоприводи мають наступні переваги в порівнянні з відомими електромеханічними, пневмо- і гідроприводами:

- збільшена енергетична і екологічна ефективність двигуна;
- повністю виключено або зменшено велике число масляних трубопроводів під тиском;
- зменшені масо-габаритні показники;
- знижена вартість системи управління двигуном.

Отже загальна таблиця порівняння відомих систем, що були описані як прототипи у першому розділі, та розробленої в роботі системи на основі п'єзоприводу наведено в табл. 4.3.

Аналізуючи зазначені вище переваги, можна стверджувати, що поставлена в роботі мета досягнута.

Таблиця 4.3 – Порівняльна таблиця відомих та розробленої системи

	MAN-B&W	WARTSILA	Розроблена система
Можливість зміни тиску палива перед форсункою протягом циклу подачі палива	Є	Немає	Є
Можливість відключення окремих форсунок на режимах малого ходу	Немає	Є	Є
Привідна потужність паливних і масляних насосів, що навішені на двигун	Масляні $\approx 3100$ кВт Паливні – немає	Масляні $\approx 500$ кВт Паливні $\approx 500$ кВт	Паливні $\approx 500$ кВт (на даному етапі масляні повністю виключити неможливо через використання у приводах випускного клапану)
Переміщення виконавчого органу подачі палива	Плунжер ПНВТ – 5...15 см	Золотник БУПП – 4 мм	Золотник БУПП – 4 мм
Кількість акумуляторів	1	3	2
Експертна оцінка надійності	Висока	Середня	Висока

#### 4.5. Висновки до розділу 4

1. Виготовлена експериментальна установка дослідження п'єзоприводів зі складальних стовпів п'єзоелектричних елементів, в якій використовувалися ПЕ різних модифікацій. Проведені експериментальні дослідження підтвердили отримані теоретичні положення.
2. Наведено розроблені і запатентовані конструкції і моделі

компонентів системи подачі палива на базі п'єзоелектричних складальних стовпів, які довели можливість застосування п'єзоперетворювачів для отримання великих переміщення при необхідному зусиллі і часу перехідного процесу.

3. Наведено розроблені і запатентовані конструкції і моделі компонентів системи подачі палива на базі п'єзоелектричних роторних двигунів, які довели можливість отримання великих переміщення при необхідному зусиллі і часу перехідного процесу.
4. Проведено порівняння розроблених систем з відомими, яке показано перевагу і перспективність використання запропонованих рішень. Це дозволяє стверджувати, що поставлена в роботі мета досягнута.

## ВИСНОВКИ

У дисертації на основі виконаних автором досліджень вирішено важливу науково-технічну задачу покращення системи подачі палива суднових дизелів, яка сприяє підвищенню безпеки судноплавства.

У результаті виконаних автором досліджень було виявлено ряд закономірностей, аналіз яких дозволяє стверджувати, що сформульовані в роботі задачі можуть вважатися виконаними. При виконанні роботи були використані коректні і достовірні методи дослідження.

У роботі отримані наступні основні наукові та практичні результати.

1. Проведено аналіз поточного стану комп'ютеризованих систем управління подачею палива, який показав, що подальше підвищення ефективності таких систем управління можливо за рахунок удосконалення виконавчого механізму, шляхом виключення гідроприводу. Проведений подальший аналіз існуючих типів приводів показав безперспективність їх подальшого вдосконалення в конструкторсько-технологічному напрямі. При цьому в роботі була показана можливість використання п'єзоелектричних приводів в якості виконавчих механізмів паливних систем високого тиску; зазначені недоліки п'єзоперетворювачів, що стримували застосування їх в якості п'єзопроводів в суднових двигунах. Виходячи із зазначених обставин, сформульовано мету та задачі дослідження, які спрямовані на створення теоретичних та практичних положень, що дозволять розробляти п'єзоелектричні приводи виконавчих механізмів паливних систем високого тиску.

2. За рахунок впровадження вперше запропонованого приводу виконавчих механізмів на базі п'єзоперетворювачів для суднового дизеля дістало подальшого розвитку метод удосконалення комп'ютерної системи управління подачею палива, що дозволило збільшити економічність паливної системи.

3. Вперше отримані моделі конструкцій компонентів комп'ютерної системи управління подачею палива на основі приводу виконавчих механізмів на базі п'єзоелектричних складальних стовпів, що дозволило отримати великі переміщення клапана в блоці управління подачею палива при необхідному зусиллі і часі перехідного процесу.

4. Вперше отримані моделі конструкцій компонентів комп'ютерної системи управління подачею палива на основі приводу виконавчих механізмів на базі п'єзоелектричних роторних двигунів, що дозволило збільшити переміщення клапана в блоці управління подачею палива. Проведено їх моделювання та розрахунок основних показників. В результаті аналізу моделей конструкцій компонентів комп'ютерної системи управління подачею палива на основі приводу виконавчих механізмів на базі п'єзоперетворювачів виявлено коливальний характер системи, що негативно позначається на надійності компонентів системи, призводить до відхилення закону подачі палива від заданого виду, і як наслідок, до зниження економічності. Виходячи із зазначених обставин поставлена задача розробки методів усунення небажаних коливань виконана.

5. Для виконання задачі усунення коливань системи дістало подальшого розвитку модель позиціонування золотника блоку управління подачею палива за рахунок використання нечіткого регулятора, що дозволило зменшити внутрішні коливання системи, тим самим збільшити гарантовану безпеку системи подачі палива.

6. Отримали подальший розвиток моделі п'єзоперетворювачів зі зворотним зв'язком за рахунок вперше отриманих схемотехнічних і функціональних моделей складальних стовпів п'єзоперетворювачів зі зворотним зв'язком, що дозволило проектувати системи подачі палива без внутрішніх коливань системи, тобто зі збільшеною її надійністю.

7. Розроблено та запатентовано конструкції приводів виконавчих механізмів на базі п'єзоелектричних складальних стовпів та п'єзоелектричних роторних двигунів, проведено експериментальні



дослідження.

8. Здійснено впровадження результатів дисертаційного дослідження в навчальному процесі Національного університету «Одеська морська академія» кафедр автоматизації дизельних і газотурбінних установок і теорії автоматичного управління та обчислювальної техніки.

**СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ**

1. Bunker price // MER (Marine engineers review). – 2007. – № 5. – P. 21.
2. Electro-hydraulics pumps increase engine efficiency // MER (Marine engineers review). – 2011. – № 10. – P. 32.
3. Engine failure on container vessel Savannah Express and subsequent contact with linkspan / Marine Accident Investigation Branch. – Report No 8/2006. – March 2006.
4. Estan A. Fernandez. Marine electrical technology. – New Delhi: Autor&Publishes, 2012. – 498 p.
5. John M. Prousalidis, Christos Th. Kourtesis. Ship electric energy systems: design & operation principles. – London: IMarEST, 2013. – 112 p.
6. Hans Klein Woud, DouweStapersma. Design of propulsion and electric power generation systems, – London: IMarEST, 2003.
7. IEC 1131-7. PROGRAMMABLE CONTROLLERS. Part 7 – Fuzzy Control Programming, 1997.
8. International maritime organization [Електронний ресурс] / MARPOL. – Режим доступу: <http://www.imo.org/>.
9. MAN ME Engine. Operating Manual. – Copenhagen, Denmark 2012. – 607 p.
10. MAN ME Training course. Training documentation. – Copenhagen, Denmark, 2014.
11. Ozhenko Y. M. Increase the intelligent engine's automation control system reliability / Y. M. Ozhenko, V. V. Nikolskiy // Вісник Черкаського державного технологічного університету. – 2009. – Спецвипуск. – Черкаси: ЧДТУ. – С. 80–82.
12. PiezoelectricCeramics, PiezoActuators, PiezoMotors, PZTCeramics, PiezoAssemblies, PiezoTransducer [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://www.piceramic.de>.
13. Ship&Bunker [Електронний ресурс] – Режим доступу:

<http://shipandbunker.com/prices>

14. Sorensen P. & Sunn P. Pedersen «The Intelligent Engine and Electronic Products – A Development Status» / Proceedings of the 22nd CIMAC International Congress on Combustion Engines, Copenhagen 18–21 May 1998. – P. 551–564.
15. Wartsila 2-stroke engines Manual “Operator flexView” – Switzerland: Wartsila, 2008, – P. 152.
16. Wartsila RT-Flex. Operating Manual. – Switzerland, 2013. – 460 p.
17. Wartsila RT-Flex. Training [Электронный ресурс] / Wartsila. – Режим доступа: [http://hmstc.or.kr/file/BBS1/40\\_RT-flex\\_Control-System%20Rev01.pdf](http://hmstc.or.kr/file/BBS1/40_RT-flex_Control-System%20Rev01.pdf).
18. Wartsila RT-Flex. Training documentation. – Shanghai, China, 2015.
19. Wartsila RT-flex82C Operating manual “Marine” – Switzerland: Wartsila, 2009, revision 2.3.1 – P. 42.
20. Wartsila Technical Bulletin RT-124. Troubleshooting & maintenance on Injection Control Unit [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://wartsila.com>
21. Автоматизированные системы управления судовыми техническими средствами [Электронный ресурс] / Хелпикс.Орг. – Режим доступа: <https://helpiks.org/6-8250.html>.
22. Алиев Р. А. Производственные системы с искусственным интеллектом / Р. А. Алиев, Н. М. Абдикеев, М. М. Шахназаров. – М.: Радио и связь, 1990. – 264 с.
23. Алиев Р. А. Управление производством при нечеткой исходной информации / Р. А. Алиев, А. Э. Церковный, Г. А. Мамедова. – М.: Энергоиздат, 1991. – 234 с.
24. Антонов А. В. Системный анализ: учебник для вузов / А. В. Антонов. – М.: Высшая школа, 2004. – 454 с.
25. Базіло К.В. Збудження коливань згину в циліндричних п'єзоелементах / К. В. Базіло // Вісник Хмельницького національного університету,

- Хмельницький. – 2014. – № 5. – с. 182–184.
26. Базіло К. В. П'єзоелектричні перетворювачі для роботехніки / К. В. Базіло, Ж. В. Сотула, В. В. Туз // Вісник Хмельницького національного університету, Хмельницький. – 2015. – № 1. – С. 190–192.
  27. Баранов А. П. Автоматическое управление судовыми электротехническими установками / А. П. Баранов. – М.: Транспорт, 1981. – 255 с.
  28. Берков К. И., Кортиков К.П., Васильев В.Н. Справочник электромеханика по судовым электрическим машинам / К. И. Берков, К. П. Кортиков, В. Н. Васильев. – Одесса: Маяк, 1979. – 239 с.
  29. Брук М. А. Режимы работы судовых дизелей / М. А. Брук, А. А. Рихтер. – Л.: Судпромгиз, 1963. – 484 с.
  30. Бусленко Н. П. Лекции по теории сложных систем / Н. П. Бусленко, В. В. Калашников, Н. Н. Коваленко. – М.: Сов. радио, 1973. – 440 с.
  31. Варбанец Р. А. Системы компьютерной диагностики судовых дизелей / Р. А. Варбанец // Судходство. – 2004. – № 6. – С. 24–27.
  32. Возницкий И. В. Судовые двигатели внутреннего сгорания / И. В. Возницкий. – М.: Моркнига, 2007. – 284 с.
  33. Возницкий И. В. Судовые двигатели внутреннего сгорания / И. В. Возницкий, А. С. Пунда. – М.: Моркнига, 2008. – 470 с.
  34. Возницкий И. В. Топливная аппаратура судовых дизелей – конструкция, проверка состояния и регулировка / И. В. Возницкий. – СПб.: Файндер-плюс, 2005. – 133 с.
  35. Волошин В. Н. Сравнительный анализ современных систем управления и мониторинга главных судовых двигателей / В. Н. Волошин, А. Р. Миська // Двигатели внутреннего сгорания. – 2011. – № 2. – С. 134–137.

36. Гарбер Е. Д. Автоматическое управление судовыми дизельными установками с ВРШ / Е. Д. Гарбер и др. – Л.: Судостроение, 1967. – 168 с.
37. Гемке Р. Г. Неисправности электрических машин / Р. Г. Гемке. – 9-е изд. перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат, 1989. – 336 с.
38. Головской В. И. Выбор оптимальных режимов работы главных двигателей в зависимости от условий плавания / В. И. Головской // Судовые силовые установки: Научно-технический сборник УУЗ. – Л.: Транспорт, 1967. – С. 24–30.
39. Головской В. И. Расчет оптимальных режимов работы главных двигателей судов / В. И. Головской // Судовые машины и механизмы: Научно-технический сборник. – Одесса: ОИИМ, 1967. – С. 18–27.
40. Горб С. И. Programmingcontrollers in the integrated development environment: trainingmanual. Practice / S. I. Gorb, V. V. Nikolskyi, V. F. Shapo, S. H. Khniunin. – Odessa: National University "Odessa MaritimeAcademy", 2017. – 164 p.
41. Горб С. И. Техническое обеспечение подготовки судовых инженеров по системам автоматизации с программируемыми контроллерами / С. И. Горб, В. В. Никольский, С. Г. Хнюнин, В. Ф. Шапо // Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сб. – 2016. – Вып. 22. Одесса: НУ "ОМА". – С. 39–46.
42. Давлеталиев Д.А. Исследование пьезодвигателей и разработка устройств адаптивного управления на их основе: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.05. – Ленинград, 1985. – 217 с.
43. Джагунов Р. Г. Измерительные преобразователи / Р.Г. Джагунов, Е.Б. Плавинский, В.В. Никольский, А.М. Веретенник. – Одесса: Астропринт, 2002. – 216 с.
44. Джагунов Р. Г. Пьезоэлектрические элементы в приборостроении и автоматике / Р. Г. Джагунов, А. А. Ерофеев. – Л.: Машиностроение, 1986. – 256 с.

45. Заде Л. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений / Л. Заде. – М. : Мир, 1976. – 165 с.
46. Индикатор часового типа [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://mdld.lcg.tpu.ru/mod/book/print.php?id=1802&chapterid=796>
47. Исерлис Э. Системное проектирование двигателей внутреннего сгорания / Э. Исерлис, В. В. Мирошников. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1981. – 255 с.
48. Козьминых А. В. Оптимальное управление судовыми энергетическими установками / А. В. Козьминых, Р. А. Севастьянов. – М.: Изд. ЦР11А МОРФЛОТ, 1978. – 40 с.
49. Козырев И. А. Моряк, учи матчасть! / И. А. Козырев // Судостроение. – 1996. – № 6. – С. 23.
50. Конкс Г. А. Мировое судовое дизелестроение. Концепции конструирования, анализ международного опыта / Г. А. Конкс, В. А. Лашко. – М.: Машиностроение, 2005. – 512 с.
51. Кутковецкий В. Я. Проектування півмостового тиристорного перетворювача енергії з нечітким керуванням для збудження синхронного генератора / В. Я. Кутковецкий // Збірка наукових праць НУК ім. адмірала Макарова. – Миколаїв, №1. – 2011.
52. Кутьин Л. И. Автоматизация судовых дизельных и газотурбинных установок / Л. И. Кутьин. – Л.: Судостроение, 1973. – 382 с.
53. Лавриненко В. В. Пьезоэлектрические двигатели / В. В. Лавриненко, И. А. Карташев, В. С. Вишневский. – М.: Энергия, 1980. – 112 с.
54. Лаханин В. В. Моделирование процессов в судовых поршневых двигателях и машинах / В. В. Лаханин. – Л.: Судостроение, 1967. – 272 с.
55. Левин М. И. Автоматизация судовых дизельных установок / М. И. Левин. – Л.: Судостроение, 1969. – 468 с.
56. Леоненков А. Ю. Нечеткое моделирование в среде Matlab и fuzzyTech / А. Ю. Леоненков. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 736 с.

57. Миська А. Р. Информационный подход к мониторингу технического состояния судовых дизель-генераторных установок / А. Р. Миська, А. О. Дранкова, Н. И. Муха // *Авиационно-космическая техника и технология: Научнотехнический журнал*. – Харьков: ХАИ. – 2010. – № 8(75).
58. Миусов М. В. Электронные системы управления главными судовыми двигателями: учебное пособие / М. В. Миусов, В. И. Ланчуковский, Е. М. Оженко. – Одесса: ОНМА, 2013. – 98 с.
59. Михайленко В. С. Нечеткая система автоматизированного регулирования давления пара судовой котельной установки / В. С. Михайленко, Е. М. Оженко // *Холодильна техніка и технологія*. – 2008, № 5 (115). – Одеса: ОДАХ. – С. 69–73.
60. Михайленко В. С. Экспертная система диагностики судового оборудования / В. С. Михайленко, Е. М. Оженко // *Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сб.* – 2008. – Вып. 14. – Одесса: ОНМА. – С. 64–68.
61. Мусяненко М. П. Полиморфные пьезокерамические преобразователи давления с пространственной электромеханической отрицательной обратной связью: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.05. – Одесса, 2001. – 172 с.
62. Мусяненко М. П. Теоретические основы, методы и средства структурно-энергосилового преобразования на основе полиэлектродных пьезокерамических элементов для систем управления: диссертация д-ра техн. наук: 05.13.05. – Одесса, 2006. – 495 с.
63. Небеснов В. И. Оптимальные режимы работы судовых комплексов / В. И. Небеснов. – М.: Транспорт, 1974. – 200 с.
64. Никольский А.А. Точные двухканальные следящие электроприводы с пьезокомпенсаторами. - М.: Энергоатомиздат, 1988. – 160 с.
65. Никольский В. В. Применение пьезоэлектрического исполнительного

- механизма для повышения эффективности автоматизированной системы управления подачей топлива / В. В. Никольский, Е. М. Оженко // Судовые энергетические установки. – 2015. – № 36. – Одеса: ОНМА. – С. 130–140.
66. Никольский В. В. Оценка возможности использования вентильного двигателя, как привода блока управления подачей топлива / В. В. Никольский, Е. М. Оженко, С. С. Павленко, А. К. Сандлер // Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сб. – 2010. – Вып. 16. – Одесса: ОНМА. – С. 83–86.
67. Никольский В. В. Оценка возможности применения пьезогенератора в составе судового дизеля / В. В. Никольский, Е. М. Оженко, В. Е. Лысенко, М. В. Никольский // Судовые энергетические установки. – 2012. – № 30. – Одеса: ОНМА. – С. 92–97.
68. Никольский В. В. Повышение качества регулирования вязкости топлива на судне / В. В. Никольский, Е. М. Оженко, И. Г. Уранковский // Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сб. – 2007. – Вып. 12. – Одесса: ОНМА. – С. 95–107.
69. Никольский В. В. Повышение надежности АСУ «Интеллектуального двигателя» / В. В. Никольский, Е. М. Оженко, С. И. Горб // Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сб. – 2010. – Вып. 16. – Одесса: ОНМА. – С. 77–82.
70. Никольский В. В. Повышение надежности АСУ судового двигателя с электронным управлением подачей топлива / В. В. Никольский, Е. М. Оженко // Матеріали XVIII міжнародної конференції з автоматичного управління (Автоматика – 2011), 28–30 вересня 2011. – Львів: Львівська політехніка. – 2011. – С. 266.
71. Никольский В. В. Повышение надежности АСУ судовыми двигателями внутреннего сгорания с электронным управлением впрыска топлива / В. В. Никольский, Е. М. Оженко // Матеріали XVII міжнародної конференції з автоматичного управління (Автоматика –



- 2010), 27–29 вересня 2010. – Том 1. – Харків: ХНУРЕ. – 2010. – С. 258–259.
72. Никольский В. В. Совершенствование системы управления частоты вращения дизель-генератора / В. В. Никольский, Е. М. Оженко, В. С. Свинобой, С. Г. Хнюнин // Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сб. – 2010. – Вып. 16. – Одесса: ОНМА. – С. 87–92.
73. Никольский В. В. Усовершенствование АСУ подачи топлива судового двигателя с электронным управлением / В. В. Никольский, Е. М. Оженко // Матеріали ХІХ міжнародної конференції з автоматичного управління (Автоматика – 2012), 26–28 вересня 2012. – Київ: НУХТ. – 2012. – С. 233–234.
74. Оженко Е. М. Trace Mode в информационном обеспечении СЭУ / Е. М. Оженко, В. В. Никольский // Матеріали ХІV міжнародної конференції з автоматичного управління (Автоматика – 2007), 10–14 вересня 2007. – Севастополь: СНУЯЄтаП, 2007. – С. 158–159.
75. Оженко Е. М. Вискозиметр для измерения динамической вязкости тяжелого топлива / Е. М. Оженко, В. В. Никольский // Вісник Черкаського державного технологічного університету. – 2007. – Спецвипуск. – Черкаси: ЧДТУ. – С. 218–220.
76. Оженко Е. М. Вискозиметр для измерения динамической вязкости тяжелого топлива / Е. М. Оженко, В. В. Никольский // Матеріали ІV міжнародної науково-технічної конференції «Датчики, прилади та системи – 2008», 19–23 вересня 2008. – Черкаси: ЧДТУ. – 2008. – С. 93–94.
77. Оженко Е. М. Оценка возможности применения пьезоэлектрического исполнительного механизма для повышения эффективности автоматизированной системы управления подачей топлива / Е. М. Оженко // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия «Морская техника и технология». –

№ 2. – Астрахань: АГТУ, 2013. – С. 137–142.

78. Оженко Е. М. Повышение надежности АСУ «интеллектуального двигателя» / Е. М. Оженко, В. В. Никольский, В. С. Михайленко // Матеріали XV міжнародної конференції з автоматичного управління (Автоматика – 2008), 23–26 вересня 2008. – Одеса: ОНМА. – 2008. – С. 390–391.
79. Оженко Е. М. Повышение надежности АСУ «Интеллектуального двигателя» / Е. М. Оженко, С. И. Горб, Л. В. Вишневский, В. В. Никольский // Матеріали XVI міжнародної конференції з автоматичного управління (Автоматика – 2009), 22–25 вересня 2009. – Чернівці: Книги. – 2009. – С. 198–199.
80. Оженко Є. М. Зменшення механічних коливань набору п'єзокерамічних шайб п'єзоприводу за допомогою використання від'ємного зворотнього зв'язку / Є. М. Оженко // Наукові праці: Науково-методичний журнал. Серія «Комп'ютерні технології». – Вип. 296, Т. 308. – Миколаїв: ЧНУ ім. Петра Могили, 2017. – С. 146–149.
81. Онищенко О. А. Научное обоснование и разработка автоматизированных систем управления холодильно-компрессорными установками малой производительности: дис. ... докт. техн. наук: 05.13.07. – Одесса, 2010. – 244 с.
82. Пат. 37258 Україна, МПК (2006) G01N11/10. Віскозиметр / В. В. Нікольський, Є. М. Оженко. – № u200806748; заявл. 16.05.2008; опубл. 25.11.2008, Бюл. № 22.
83. Пат. 43426 Україна, МПК (2009) G01N11/10. Система управління подачею палива «інтелектуального» двигуна / В. В. Нікольський, Є. М. Оженко. – № u200904249; заявл. 29.04.2009; опубл. 10.08.2009, Бюл. № 15.
84. Пат. 54256 Україна, МПК (2009) G01N11/10. Система керування подачею палива «інтелектуального» двигуна / В. В. Нікольський, Є. М. Оженко. – № u201000962; заявл. 01.02.2010; опубл. 10.11.2010,

- Бюл. № 21.
85. Пат. 54257 Україна, МПК (2009) G01N11/10. Система керування подачею палива «інтелектуального» двигуна / В. В. Нікольський, Є. М. Оженко. – № u201000963; заявл. 01.02.2010; опубл. 10.11.2010, Бюл. № 21.
86. Пат. 54258 Україна, МПК (2009) G01N11/10. Система керування подачею палива «інтелектуального» двигуна / В. В. Нікольський, Є. М. Оженко. – № u201000966; заявл. 01.02.2010; опубл. 10.11.2010, Бюл. № 21.
87. Пат. 55019 Україна, МПК (2009) G01N11/00. Система керування подачею палива «інтелектуального» двигуна / В. В. Нікольський, Є. М. Оженко. – № u201000959; заявл. 01.02.2010; опубл. 10.12.2010, Бюл. № 23.
88. Пат. 78425 Україна, МПК (2013.01) B63B 17/00. Судновий дизель з п'езогенератором / В. В. Нікольський, Є. М. Оженко, В. Є. Лисенко, М. В. Нікольський. – № u201202943; заявл. 13.03.2012; опубл. 25.03.2013, Бюл. № 6.
89. Петренко С. Ф. Пьезоелектрический двигатель в приборостроении / С. Ф. Петренко. – Монографія, 2001. – 100 с.
90. Пипченко А. Н. Электрооборудование, электронная аппаратура и системы управления: учебное пособие / А. Н. Пипченко, В. В. Пономаренко, Ю. И. Теплов, А. В. Романенко. – Одессе: ТЭС, 2011. – 370 с.
91. Пипченко А. Н. Судовые автоматизированные механические установки: учебное пособие / А. Н. Пипченко, В. В. Пономаренко, В. А. Шевченко. – Одессе: ТЭС, 2015. – 366 с.
92. Ротштейн А. П. Интеллектуальные технологии идентификации: нечеткие множества, генетические алгоритмы, нейронные сети / А. П. Ротштейн. – Винница : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 1999. – 320 с.

93. Рутковская Д. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / Д. Рутковская, М. Пилинский, Л. Рутковский. – М. : Горячая линия – Телеком, 2004. – 452 с.
94. Суворов П. С. Управление режимами главных судовых дизелей / П. С. Суворов. – Одесса: ЛАТСТАР, 2000. – 238 с.
95. Судовой механик: в 3 т. / Под общей редакцией А. А. Фока – Одесса: Астропринт, 2008. – 1568 с.
96. Топливо и топливные системы судовых дизелей / Ю. А. Пахомов, Ю. П. Коробков, Е. В. Дмитриевский, Г. Л. Васильев; под ред. Ю. А. Пахомова. – М.: ТрансЛит, 2007. – 469 с.
97. Турти М. В. Теорія однозначних нечітких систем та нейронні мережі: монографія: в 2 ч. / М. В. Турти. – Миколаїв: Вид-во Європ. ун-ту, Миколаївська філія, 2007. – Ч. 1. – 141 с. ; Ч. 2. – 114 с.
98. Устюжанина Е. В. Научная школа как структурная единица научной деятельности / Е. В. Устюжанина, С. Г. Евсюков, А. Г. Петров и др. – М.: ЦЭМИ РАН, 2011. – 73 с.
99. Шарапов В.М., Мусиенко М.П. и др. Пьезоэлектрические преобразователи с пьезоэлементом в цепи обратной связи усилителя напряжения // Вісник Черкаського державного технологічного університету. – 2004. – №2. – С. 132–136.
100. Шарапов В. М. Пьезокерамические преобразователи с дополнительным каналом обратной связи / В. М. Шарапов, М. П. Мусиенко и др. // Вісник Черкаського державного технологічного університету. – 2004. – №3. – С. 101–107.
101. Шарапов В. М. Пьезоэлектрические преобразователи с комбинированной обратной связью / В. М. Шарапов, М. П. Мусиенко, А. В. Бублей // Вісник Черкаського державного технологічного університету. – 2005. – №4. – С. 131–136.

102. Шарапов В. М. Пьезоэлектрические датчики: монография / В. М. Шарапов, М. П. Мусиенко, Е. В. Шарапова // Под ред. В.М.Шарапова. – Москва: Техносфера, 2006. – 632 с.
103. Штовба С. Д. Проектирование нечетких систем средствами Matlab / С. Д. Штовба. – М.: Горячая линия – Телеком, 2007. – 288 с.
104. Щербаков В. И. Электронные схемы на операционных усилителях: справочник / В. И. Щербаков, Г. И. Грездов. – К.: Техніка, 1983. – 213с.

**ДОДАТОК А**  
**АКТИ ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЙНОГО**  
**ДОСЛІДЖЕННЯ**

ЗАТВЕРДЖУЮ

Перший проректор Національного  
університету «Одеська морська академія»  
Дю.н., професор



О.М. Шемякін

01 2018 р.

**А К Т**

про використання результатів дисертаційної роботи  
Оженка Євгена Михайловича на тему «Методи, моделі та засоби покращення  
системи подачі палива суднового дизелю на базі п'єзоелектричних  
перетворювачів»  
в навчальному процесі університету

Ми, що нижче підписались, начальник навчального відділу університету Пархоменко М.М., декан факультету автоматики доцент Кар'янський С.А. та завідувач кафедри «Автоматизації дизельних та газотурбінних установок» професор Міусов М.В. склали цей акт у тому, що результати дисертаційної роботи Оженка Є.М. «Методи, моделі та засоби покращення системи подачі палива суднового дизелю на базі п'єзоелектричних перетворювачів» впровадженні у навчальному процесі кафедри «Автоматизації дизельних і газотурбінних установок» в курсі практичних занять по дисциплінам «Автоматизація технологічних процесів та виробництв» (4-й курс факультету автоматики) та «Автоматизація суднових енергетичних установок» (5-й курс судномеханічного факультету). Впроваджена методика відповідно до підготовленого Оженко Є.М. навчального посібника «Електронні системи управління головними судновими двигунами».

Начальник навчального відділу  
Національного університету  
«Одеська морська академія»

М.М. Пархоменко

Декан факультету автоматики  
к.т.н., доцент

С.А. Кар'янський

Завідувач кафедри АДіГТУ,  
д.т.н, професор

М.В. Міусов



ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з наукової роботи Національного  
університету «Одеська морська академія»  
д.т.н., професор

  
В.А. Голіков

01 \_\_\_\_\_ 2018 р.

**А К Т**

про використання результатів дисертаційної роботи Оженка Євгена Михайловича на тему «Методи, моделі та засоби покращення системи подачі палива суднового дизелю на базі п'єзоелектричних перетворювачів» в наукових дослідженнях, які виконуються в університеті

Ми, що нижче підписались, начальник науково-дослідної частини університету Савчук В.Д. та завідувач кафедри АДіГТУ Міюсов М.В. склали цей акт у тому, що результати дисертаційної роботи Оженка Є.М. ввійшли складовою частиною в звіт по науково-дослідній роботі «Розробка п'єзоелектричного приводу широкого призначення», НУ «ОМА», Одеса – 2010 р. (№ ДР 0109U001538, науковий керівник професор Міюсов М.В., розділ 1, 2 та 3).

Начальник науково-дослідної частини НУ «ОМА»,  
к.т.н., с.н.с., професор

  
В.Д. Савчук

Завідувач кафедри АДіГТУ,  
д.т.н., професор

  
М.В. Міюсов



**ДОДАТОК Б**  
**ПАТЕНТИ НА КОРИСНІ МОДЕЛІ**

УКРАЇНА

UKRAINE



ПАТЕНТ

НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

№ 55019

СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ПОДАЧЕЮ ПАЛИВА  
"ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО" ДВИГУНА

Видано відповідно до Закону України "Про охорону прав на винаходи і корисні моделі".

Зареєстровано в Державному реєстрі патентів України на корисні моделі **10.12.2010**.

Голова Державного департаменту  
інтелектуальної власності

М.В. Паладій



(11) **55019**(19) **UA**(51) МПК (2009)  
G01N 11/00

<p>(21) Номер заявки: <b>а 2010 00959</b></p> <p>(22) Дата подання заявки: <b>01.02.2010</b></p> <p>(24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: <b>10.12.2010</b></p> <p>(46) Дата публікації відомостей про видачу патенту та номер бюлетеня: <b>10.12.2010, Бюл. № 23</b></p>	<p>(72) Винахідники: <b>Нікольський Віталій Валентинович, UA, Оженко Євген Михайлович, UA</b></p> <p>(73) Власники: <b>Нікольський Віталій Валентинович, вул. Варламова, 20-б, кв. 77, м. Одеса, 65009, UA, Оженко Євген Михайлович, вул. Кримська, 72, кв. 255, м. Одеса, 65117, UA</b></p>
--	--

(54) Назва корисної моделі:

**СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ПОДАЧЕЮ ПАЛИВА "ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО" ДВИГУНА**

(57) Формула корисної моделі:

Система керування подачею палива двигуна, що містить датчики, блок керування подачею палива та п'єзопривід, контрольований мікропроцесорною системою керування, яка відрізняється тим, що до неї введено систему керування блоком керування подачею палива на базі регульованого перетворювача напруги, сигнал з якого подається на п'єзопривід з набірною стовпа п'єзокерамічних шайб, встановлений в відповідному гідроциліндрі більшого діаметра та попередньо навантажений пружиною, і який за допомогою гідравлічного трубопроводу забезпечує переміщення сприймаючого поршня гідроциліндра меншого діаметра, і як наслідок - золотника блока керування подачею палива.



УКРАЇНА

 (19) UA (11) 55019 (13) U  
 (51) МПК (2009)  
 G01N 11/00

 МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ  
 І НАУКИ УКРАЇНИ

 ДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ  
 ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ  
 ВЛАСНОСТІ

**ОПИС  
 ДО ПАТЕНТУ  
 НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ**

 видається під  
 відповідальність  
 власника  
 патенту

**(54) СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ПОДАЧЕЮ ПАЛИВА "ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО" ДВИГУНА**

1

(21) a201000959  
 (22) 01.02.2010  
 (24) 10.12.2010  
 (46) 10.12.2010, Бюл.№ 23, 2010 р.  
 (72) НІКОЛЬСЬКИЙ ВІТАЛІЙ ВАЛЕНТИНОВИЧ,  
 ОЖЕНКО ЄВГЕН МИХАЙЛОВИЧ  
 (73) НІКОЛЬСЬКИЙ ВІТАЛІЙ ВАЛЕНТИНОВИЧ,  
 ОЖЕНКО ЄВГЕН МИХАЙЛОВИЧ  
 (57) Система керування подачею палива двигуна,  
 що містить датчики, блок керування подачею палива та п'єзопривід, контрольований мікропроцесорною системою керування, яка відрізняється

2

тим, що до неї введено систему керування блоком керування подачею палива на базі регульованого перетворювача напруги, сигнал з якого подається на п'єзопривід з набірною стовпа п'єзокерамічних шайб, встановлений в повідному гідроциліндрі більшого діаметра та попередньо навантажений пружиною, і який за допомогою гідравлічного трубопроводу забезпечує переміщення сприймаючого поршня гідроциліндра меншого діаметра, і як наслідок - золотника блока керування подачею палива.

Корисна модель відноситься до систем керування, приводом яких служить п'єзоелектричний двигун, і може бути використаний в автоматизованих системах управління двигунами внутрішнього згоряння, зокрема судовими енергетичними установками, для управління упорскуванням палива [1, 2].

Відома акумуляторна система керування упорскуванням палива, яка містить, датчики, електронно-гідравлічну систему керування на мікропроцесорі, регульований паливний насос, гідроакумулятор, та форсунку, з'єднану з акумулятором-паливопроводом через блок управління подачею палива (БУПП) [3]. Паливо подається в акумулятор під тиском (~100 МПа) регульованим насосом. В потрібний час мікропроцесор подає команду на соленоїдний клапан, який відкриває подачу сервомасла до БУПП, який відкриває шлях паливу до форсунки. Упорскування здійснюється при незмінному тиску палива. Після цього закривається подача сервомасла до БУПП і зупиняється подача палива у циліндр.

Технічний результат досягається завдяки тому, що електронно-гідравлічна система управління забезпечує:

- постійний тиск упорскування;
- плавне регулювання кута випередження упорскування;
- незалежність кількості упорснутого палива, начала та кінця подачі палива від швидкості руху

плунжера паливного насоса, який залежить від частоти обертів двигуна.

Недоліки системи, які обумовлені використанням електронно-гідравлічної системи:

багаторазове перетворення управляючого імпульсу з одного виду енергії на інший, як слід зменшення точності та надійності;

нещільності, які призводять до протічки сервомасла;

ненадійність гідравлічної частини системи керування [4];

велика металоемкість системи, та як слід висока початкова ціна.

Найбільш близькою за технічною сутністю та результатом, що досягається, до корисної моделі, що пропонується, є система управління подачею палива "інтелектуального" двигуна, яка містить датчики, блок управління подачею палива та п'єзопривід, контрольований мікропроцесорною системою керування, яка відрізняється тим, що до неї введено систему керування блоком управління подачею палива на базі регульованого перетворювача напруги, сигнал з якого подається на п'єзопривід з наборною стовпа п'єзокерамічних шайб, жорстко встановлений на основі і який за допомогою коромисла забезпечує переміщення золотника блока управління подачею палива [5].

Технічний результат досягається завдяки тому, що набірний стовп п'єзокерамічних шайб забезпечує:

- високий пусковий момент та швидкодію;

(19) UA (11) 55019 (13) U



високу надійність і ресурс (більш 50000 ч);  
 мале енергоспоживання;  
 іскровибухонебезпечність;  
 відсутність випромінюваних магнітних полів;  
 безшумну роботу;  
 меншу металоемкість системи у порівнянні з  
 гідравлічною;

порівняльна низька початкова вартість.

Недоліки системи, які обумовлені використанням коромисла:

через мале переміщення приводу необхідно використовувати коромисло з великим відношенням пліч, що збільшує масу та габарити системи, через що необхідно вирішувати питання вдалого розташування її частин;

необхідність використання додаткових пружин, для попереднього навантаження стовпа п'єзокерамічних шайб.

Задачею корисної моделі є створення електронної системи керування, у якій використовується наборний стовп п'єзокерамічних шайб та допоміжна гідравлічна система, у якості приводу блока управління подачею палива, що дозволяє виключити необхідність використання коромисла та вирішити питання вдалого розташування приводу.

Поставлена задача вирішується тим, що система управління подачею палива "інтелектуального" двигуна, яка містить датчики, блок керування подачею палива та п'єзопривід, контрольований мікропроцесорною системою керування, згідно з корисною моделлю містить систему керування блоком управління подачею палива на базі регульованого перетворювача напруги, сигнал з якого подається на п'єзопривід з наборного стовпа п'єзокерамічних шайб, встановлений в повідному гідроциліндрі більшого діаметра та попередньо навантажений пружиною, і який за допомогою гідравлічного трубопроводу забезпечує переміщення сприймаючого поршня гідроциліндра меншого діаметра, і як наслідок - золотника блока управління подачею палива.

Технічний результат досягається завдяки тому, що наборний стовп п'єзокерамічних шайб та гідравлічна система забезпечують:

відсутність коромисла, та як наслідок можливість розташування повідного гідроциліндра у будь якому місці;

попереднє навантаження наборного стовпа п'єзокерамічних шайб;

стабільну роботу при температурі до 150°C;

високий пусковий момент та швидкодію;

високу надійність і ресурс (більш 50000 ч);

мале енергоспоживання;

іскровибухонебезпечність;

відсутність випромінюваних магнітних полів;

безшумну роботу;

меншу металоемкість системи у порівнянні з гідравлічною;

порівняльна низька початкова вартість.

На Фіг. зображено блок керування подачею палива з п'єзоприводом: 1 - блок керування подачею палива, 2 - основа, 3 - сприймаючий гідроциліндр, 4 - повідний гідроциліндр, 5 - п'єзопривід (наборний стовп п'єзокерамічних шайб), 6 - пружина,

7 - датчик положення колінчатого вала, 8 - датчик кількості упорснугого палива.

Корисна модель містить блок керування подачею палива 1, який з'єднано за допомогою чотирьох болтів, два з яких показано на кресленні, з основою 2, та який має сприймаючий гідроциліндр меншого діаметра 3, з'єднаний з повідним гідроциліндром 4, в якому встановлено наборний стовп п'єзокерамічних шайб 5 попередньо навантажений пружиною 6 та з'єднаний з блоком керування, до якого поступають сигнали від датчика положення колінчатого вала 7 та датчику кількості упорснугого палива 8.

У вихідному стані при зупиненому двигуні золотник БУПП знаходиться під впливом внутрішньої пружини у нижньому положенні, при якому прохід палива закрито. Паливо подається через вхідний отвір під постійним тиском, а на виході паливо відсутнє.

При запуску двигуна блок керування отримує сигнал від датчика положення колінчатого вала та датчика кількості упорснугого палива, згідно з якими здійснюється управління упорскуванням палива, і формує імпульс на п'єзопривід, який переміщує поршень повідного гідроциліндра більшого діаметра і витискає рідину у сприймаючий гідроциліндр меншого діаметра. При цьому поршень сприймаючого гідроциліндра переміщує золотник БУПП уверх, і відкривається прохід палива. При отриманні сигналу з датчика кількості упорснугого палива про прохід необхідної кількості палива через БУПП блок керування знімає імпульс з п'єзоприводу і золотник повертається в початкове положення під дією внутрішньої пружини БУПП.

Елементи корисної моделі може бути реалізовано згідно з відомими схемами:

наборний стовп п'єзоелектричних шайб - [6, 7];

перетворювач напруги - [7, 8];

блок управління подачею палива - [3];

датчики - [9];

гідравлічна система - [10].

Джерела інформації:

1. Возницкий И.В. Топливная аппаратура судовых дизелей. - СПб.: Моркнига, 2005. - 133с.

2. Топливо и топливные системы судовых дизелей / Ю.А. Пахомов, Ю.П. Коробков, Е.В. Дмитриевский, Г.Л. Васильев; под ред. Ю.А. Пахомова. - М.: Транслит, 2007. - 496с.

3. Wartsila [електронний ресурс] - <http://www.wartsila.com/>

4. Козырев, И.А. Моряк, учи матчасть! // Судостроительство. - 1996. - №6. - С.23.

5. Пат. 43426 Україна, МПК G01N 11/10. Система управління подачею палива "інтелектуального" двигуна / В.В. Нікольський, СМ. Оженко; заявл. 29.04.09; опубл. 10.08.09; Бюл. №15.

6. Piezoelectric Ceramics, Piezo Actuators, Piezo Motors, PZT Ceramics, Piezo Assemblies, Piezo Transducer [Електронний ресурс] / - [www.pic ceramic.de](http://www.pic ceramic.de).

7. Никольский А.А. Точные двухканальные следящие электроприводы с пьезокомпенсаторами. - М.: Энергоатомиздат, 1988. - 160с.

5

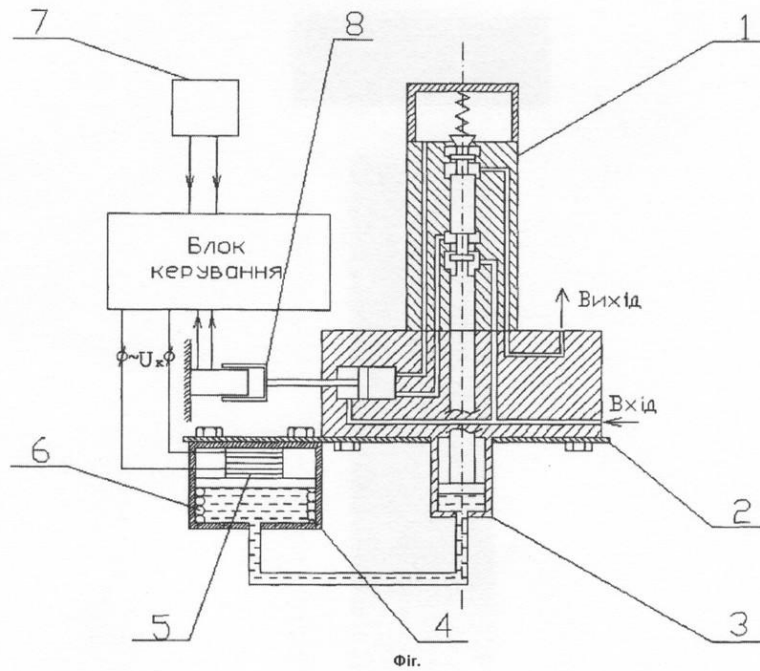
55019

6

8. Щербаков В.И., Грездов Г.И. Электронные схемы на операционных усилителях: Справочник. - К.: Техніка, 1983. - 213с.

9. Измерительные преобразователи / Р.Г. Джагунов, Е.Б. Плавинский, В.В. Никольский, А.М. Веретенник. - Одесса: Астропринт, 2002. - 216с.

10. Судовой механик: в 3 т. / Под общей редакцией А.А. Фока - Одесса: Астропринт, 2008. - 1568с.



Комп'ютерна верстка Л. Ціхановська

Підписне

Тираж 26 прим.

Міністерство освіти і науки України

Державний департамент інтелектуальної власності, вул. Урицького, 45, м. Київ, МСП, 03680, Україна

ДП "Український інститут промислової власності", вул. Глазунова, 1, м. Київ – 42, 01601

УКРАЇНА

UKRAINE



ПАТЕНТ

НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

№ 43426

СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ ПОДАЧЕЮ ПАЛИВА  
"ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО" ДВИГУНА

Видано відповідно до Закону України "Про охорону прав на винаходи і корисні моделі".

Зареєстровано в Державному реєстрі патентів України на корисні моделі **10.08.2009**.

Голова Державного департаменту  
інтелектуальної власності

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "M.V. Paladiy".

М.В. Паладій





(11) **43426**(19) **UA**(51) МПК (2009)  
G01N 11/10(21) Номер заявки: **u 2009 04249**(22) Дата подання заявки: **29.04.2009**(24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: **10.08.2009**(46) Дата публікації відомостей про видачу патенту та номер бюлетеня: **10.08.2009, Бюл. № 15**(72) Винахідники:  
**Нікольський Віталій  
Валентинович, UA,  
Оженко Євген Михайлович,  
UA**(73) Власники:  
**Нікольський Віталій  
Валентинович,  
вул. Варламова, 20-б, кв. 77,  
м. Одеса, 65078, Україна, UA,  
Оженко Євген Михайлович,  
вул. Кримська, 72, кв. 255,  
м. Одеса, 65117, UA**

(54) Назва корисної моделі:

**СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ ПОДАЧЕЮ ПАЛИВА "ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО" ДВИГУНА**

(57) Формула корисної моделі:

Система управління подачею палива "інтелектуального" двигуна, яка містить датчики, блок управління подачею палива та п'єзопривід, контрольований мікропроцесорною системою керування, яка **відрізняється** тим, що до неї введено систему керування блоком управління подачею палива на базі регульованого перетворювача напруги, сигнал з якого подається на п'єзопривід з набірною стовпа п'єзокерамічних шайб, жорстко встановлений на основі і який за допомогою коромисла забезпечує переміщення золотника блока управління подачею палива.





УКРАЇНА

(19) UA (11) 43426 (13) U  
 (51) МПК (2009)  
 G01N 11/10

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ  
 І НАУКИ УКРАЇНИ

ДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ  
 ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ  
 ВЛАСНОСТІ

**ОПИС  
 ДО ПАТЕНТУ  
 НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ**

видається під  
 відповідальність  
 власника  
 патенту

**(54) СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ ПОДАЧЕЮ ПАЛИВА "ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО" ДВИГУНА**

1

2

(21) u200904249  
 (22) 29.04.2009  
 (24) 10.08.2009  
 (46) 10.08.2009, Бюл. № 15, 2009 р.  
 (72) НІКОЛЬСЬКИЙ ВІТАЛІЙ ВАЛЕНТИНОВИЧ,  
 ОЖЕНКО ЄВГЕН МИХАЙЛОВИЧ  
 (73) НІКОЛЬСЬКИЙ ВІТАЛІЙ ВАЛЕНТИНОВИЧ,  
 ОЖЕНКО ЄВГЕН МИХАЙЛОВИЧ  
 (57) Система управління подачею палива "інтелектуального" двигуна, яка містить датчики, блок

управління подачею палива та п'єзопривід, контрольований мікропроцесорною системою керування, яка відрізняється тим, що до неї введено систему керування блоком управління подачею палива на базі регульованого перетворювача напруги, сигнал з якого подається на п'єзопривід з набірного стовпа п'єзокерамічних шайб, жорстко встановлений на основі і який за допомогою коромисла забезпечує переміщення золотника блока управління подачею палива.

Корисна модель відноситься до систем керування, приводом яких служить п'єзоелектричний двигун, і може бути використана в автоматизованих системах управління двигунами внутрішнього згорання, зокрема судовими енергетичними установками, для управління упорскуванням палива [1, 2].

Відома система упорскування палива безпосередньої дії, яка містить паливний насос високого тиску, у виді плунжерної пари, плунжер якого робить зворотно-поступальний рух під впливом кулачкової шайби жорстко насадженої на розподільний вал і закритої форсунки, яка упорскує певну порцію палива у строго визначений момент, з'єднаних між собою паливопроводом високого тиску [2].

Недоліки системи, які обумовлені використанням в якості управляючого органу розподільного валу:

подача палива плунжерною парою починається з низького тиску покою та закінчується при зниженні тиску до нуля, що обумовлює погану якість упорскування та розпливання у початку та кінці кожного циклу упорскування;

відсутність можливості плавного регулювання кута випередження упорскування палива;

залежність кількості упорснутото палива, начала та кінця подачі палива від швидкості руху плунжера паливного насоса, який залежить від частоти обертів двигуна;

великі металомісткість, габарити та маса;  
 висока початкова ціна.

Найбільш близьким за технічною сутністю та результатом, що досягається, до корисної моделі,

що пропонується, є акумуляторна система керування упорскуванням палива, яка містить, датчики, електронно-гідролічну систему керування на мікропроцесорі, регулюємиий паливний насос, гідроакумулятор, та форсунку, з'єднану з акумулятором-паливопроводом через блок управління подачею палива (БУПП) [3]. Паливо подається в акумулятор під тиском (~100МПа) регулюємиим насосом. В потрібний час мікропроцесор подає команду на соленоїдний клапан, який відкриває подачу сервомаєла до БУПП, який відкриває путь паливу до форсунки. Упорскування здійснюється при незмінному тиску палива. Після цього закривається подача сервомаєла до БУПП і зупиняється подача палива у циліндр.

Технічний результат досягається завдяки тому, що електронно-гідролічна система управління забезпечує:

постійний тиск упорскування;  
 плавне регулювання кута випередження упорскування;

незалежність кількості упорснутото палива, начала та кінця подачі палива від швидкості руху плунжера паливного насоса, який залежить від частоти обертів двигуна.

Недоліки системи, які обумовлені використанням електронно-гідролічної системи:

багаторазове перетворення управляючого імпульсу з одного виду енергії на інший, як слід зменшення точності та надійності;

нешцільності, які призводять до протічки сервомаєла;

ненадійність гідролічної частини системи керування [4];

(13) U  
 (11) 43426  
 (19) UA

велика металоемкість системи, та як слід висока початкова ціна.

Задачею корисної моделі є створення електронної системи керування, у якій використовується наборний стовп п'єзокерамічних шайб, у якості приводу БУПП, що дозволяє виключити гідравлічну систему та несприятливі процеси, що можуть призвести до аварії.

Поставлена задача вирішується тим, що в систему управління подачею палива «інтелектуального» двигуна, яка містить датчики, блок управління подачею палива та п'єзопривід, контрольований мікропроцесорною системою керування, яка відрізняється тим, що до неї введено систему керування блоком управління подачею палива на базі регульованого перетворювача напруги, сигнал з якого подається на п'єзопривід з наборного стовпа п'єзокерамічних шайб, жорстко встановлений на основі і який за допомогою коромисла забезпечує переміщення золотника блока управління подачею палива.

Технічний результат досягається завдяки тому, що наборний стовп п'єзокерамічних шайб забезпечує:

високий пусковий момент та швидкодію;  
високу надійність і ресурс (більш 50000ч);  
стабільну роботу при температурі до 150°C;  
мале енергоспоживання;  
іскровибухонебезпечність;  
відсутність випромінюваних магнітних полів;  
безшумну роботу;  
меншу металоемкість системи у порівнянні з гідравлічною;

порівняльна низька початкова вартість.

На Фіг. зображено блок управління подачею палива з п'єзоприводом: 1 - блок управління подачею палива, 2 - основа, 3 - опора коромисла, 4 - коромисло, 5 - п'єзопривід (наборний стовп п'єзокерамічних шайб), 6 - датчик положення колінчатого валу, 7 - датчик кількості упорснутото палива.

Корисна модель містить блок управління подачею палива 1, який з'єднано за допомогою чотирьох болтів, два з яких показано на кресленні, з основою 2, на іншому боці якої встановлена опора 3, з'єднана з основою за допомогою двох болтів, один з яких зображено на кресленні, з коромислом 4, яке з одного кінця приєднано до золотника БУПП за допомогою шарніру, а з іншого до наборного стовпа п'єзокерамічних шайб 5, який встановлено у особистий стакан і з'єднано з блоком керування, до якого поступають сигнали від датчика положення колінчатого валу 6 та датчику кількості упорснутото палива 7.

У вихідному стані при зупиненому двигуні золотник БУПП знаходиться під впливом внутрішньої пружини у нижньому положенні, при якому прохід палива закрито. Паливо подається через вхідний отвір під постійним тиском, а на виході паливо відсутнє.

При запуску двигуна блок керування отримує сигнал від датчика положення колінчатого валу та датчика кількості упорснутото палива, згідно з якими здійснюється управління упорскуванням палива, і формує імпульс на п'єзопривід, який повертає коромисло проти часової стрілки. При цьому коромисло переміщує золотник БУПП вгору, і відкривається прохід палива. При отриманні сигналу з датчика кількості упорснутото палива о проході необхідної кількості палива через БУПП блок керування знімає імпульс з п'єзоприводу і золотник повертається в початкове положення під дією внутрішньої пружини БУПП.

Елементи корисної моделі може бути реалізовано згідно з відомими схемами:

наборний стовп п'єзоелектричних шайб - [5, 6];  
перетворювач напруги - [6, 7];  
блок управління подачею палива - [3];  
датчики - [8];  
коромисло з опорою - [9].

Джерела інформації:

1. Возницкий И.В. Топливная аппаратура судовых дизелей. -СПб.: Моркнига, 2005. - 133с.

2. Топливо и топливные системы судовых дизелей /Ю.А. Пахомов, Ю.П. Коробков, Е.В. Дмитриевский, Г.Л. Васильев; под ред. Ю.А. Пахомова. - М.: ТрансЛит, 2007. -496с.

3. Wartsila [електронний ресурс]/ - <http://www.wartsila.com/>

4. Козырев, И.А. Моряк, учи матчать! //Судоходство. - 1996. -№6. -С.23.

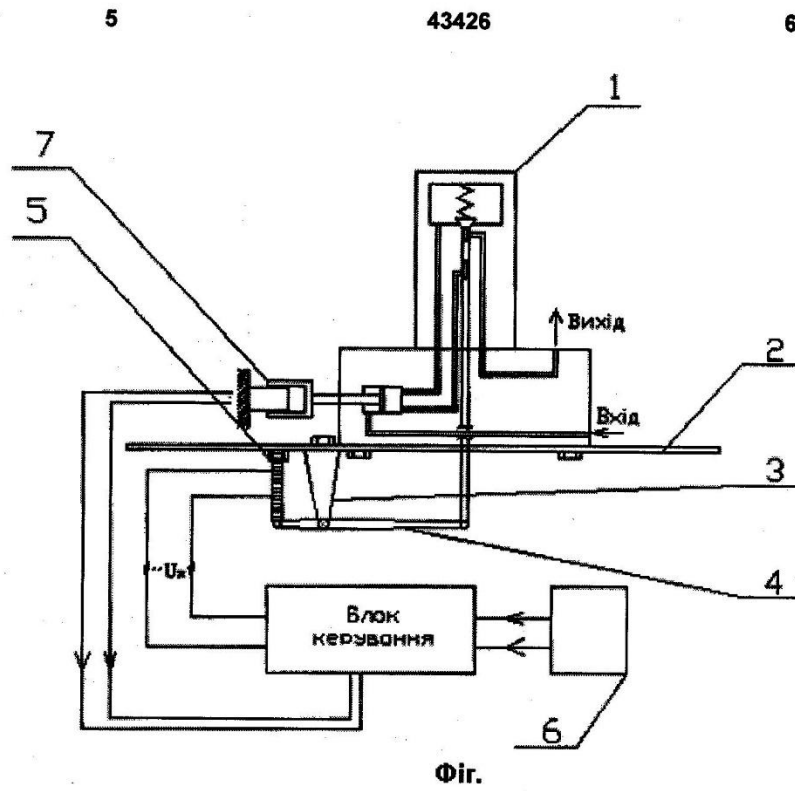
5. Piezoelectric Ceramics, Piezo Actuators, Piezo Motors, PZT Ceramics, Piezo Assemblies, Piezo Transducer [Электронный ресурс] /- [www.piceramic.de](http://www.piceramic.de).

6. Никольский А.А. Точные двухканальные следящие электроприводы с пьезокомпенсаторами. -М.: Энергоатомиздат, 1988. -160с.

7. Щербakov В.И., Грездов Г.И. Электронные схемы на операционных усилителях: Справочник. -К.: Техніка, 1983. -213с.

8. Измерительные преобразователи /Р.Г. Джагунов, Е.Б. Плавинский, В.В. Никольский, А.М. Веретенник. -Одесса: Астропринт, 2002. -216с.

9. Судовой механик: в 3 т. /Под общей редакцией А.А. Фока -Одесса.: Астропринт, 2008. - 1568с.







(11) **54257**(19) **UA**(51) МПК (2009)  
G01N 11/10

- |  |  |
|--|--|
| <p>(21) Номер заявки: <b>а 2010 00963</b></p> <p>(22) Дата подання заявки: <b>01.02.2010</b></p> <p>(24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: <b>10.11.2010</b></p> <p>(46) Дата публікації відомостей про видачу патенту та номер бюлетеня: <b>10.11.2010, Бюл. № 21</b></p> | <p>(72) Винахідники:<br/><b>Нікольський Віталій<br/>Валентинович, UA,<br/>Оженко Євген Михайлович,<br/>UA</b></p> <p>(73) Власники:<br/><b>Нікольський Віталій<br/>Валентинович,<br/>вул. Варламова, 20-б, кв. 77,<br/>м. Одеса, 65009, UA,<br/>Оженко Євген Михайлович,<br/>вул. Кримська, 72, кв. 255, м.<br/>Одеса, 65117, UA</b></p> |
|--|--|

(54) Назва корисної моделі:

**СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ПОДАЧЕЮ ПАЛИВА "ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО" ДВИГУНА**

(57) Формула корисної моделі:

Система керування подачею палива двигуна, яка містить датчики, блок керування подачею палива та п'єзопривід, контрольований мікропроцесорною системою керування, яка відрізняється тим, що містить систему керування блоком керування подачею палива на базі регульованого перетворювача напруги, сигнал з якого подають на ротаційний п'єзодвигун, жорстко встановлений на основі, який за допомогою шнекового механізму забезпечує переміщення золотника блока керування подачею палива.



УКРАЇНА

(19) UA (11) 54257 (13) U  
 (51) МПК (2009)  
 G01N 11/10

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ  
 І НАУКИ УКРАЇНИ

ДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ  
 ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ  
 ВЛАСНОСТІ

## ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

видається під  
 відповідальність  
 власника  
 патенту

(54) СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ПОДАЧЕЮ ПАЛИВА "ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО" ДВИГУНА

1

2

(21) а201000963  
 (22) 01.02.2010  
 (24) 10.11.2010  
 (46) 10.11.2010, Бюл.№ 21, 2010 р.  
 (72) НІКОЛЬСЬКИЙ ВІТАЛІЙ ВАЛЕНТИНОВИЧ,  
 ОЖЕНКО ЄВГЕН МИХАЙЛОВИЧ  
 (73) НІКОЛЬСЬКИЙ ВІТАЛІЙ ВАЛЕНТИНОВИЧ,  
 ОЖЕНКО ЄВГЕН МИХАЙЛОВИЧ  
 (57) Система керування подачею палива двигуна,  
 яка містить датчики, блок керування подачею па-

лива та п'єзопривід, контрольований мікропроцесорною системою керування, яка відрізняється тим, що містить систему керування блоком керування подачею палива на базі регульованого перетворювача напруги, сигнал з якого подають на ротаційний п'єзодвигун, жорстко встановлений на основі, який за допомогою шнекового механізму забезпечує переміщення золотника блока керування подачею палива.

Корисна модель відноситься до систем керування, приводом яких служить п'єзоелектричний двигун, і може бути використана в автоматизованих системах керування двигунами внутрішнього згорання, зокрема судовими енергетичними установками, для керування упорскуванням палива [1, 2].

Відома акумуляторна система керування упорскуванням палива, яка містить, датчики, електронно-гідрравлічну систему керування на мікропроцесорі, регулюємий паливний насос, гідроакумулятор, та форсунку, з'єднану з акумулятором-паливопроводом через блок керування подачею палива (БУПП) [3]. Паливо подається в акумулятор під тиском (~100МПа) регулюємим насосом. В потрібний час мікропроцесор подає команду на соленоїдний клапан, який відкриває подачу сервомасла до БУПП, який відкриває путь паливу до форсунки. Упорскування здійснюється при незмінному тиску палива. Після цього закривається подача сервомасла до БУПП і зупиняється подача палива у циліндр.

Технічний результат досягається завдяки тому, що електронно-гідрравлічна система керування забезпечує:

- постійний тиск упорскування;
- плавне регулювання кута випередження упорскування;
- незалежність кількості упорснутого палива, начала та кінця подачі палива від швидкості руху плунжера паливного насоса, який залежить від частоти обертів двигуна.

Недоліки системи, які обумовлені використанням електронно-гідрравлічної системи:

- багаторазове перетворення управляючого імпульсу з одного виду енергії на інший, як слід зменшення точності та надійності;
- нещільності, які призводять до протічки сервомасла;
- ненадійність гідрравлічної частини системи керування [4];
- велика металоемкість системи, та як слід висока початкова ціна.

Найбільш близькою за технічною сутністю та результатом, що досягається, до корисної моделі, що пропонується, є система керування подачею палива «інтелектуального» двигуна, яка містить датчики, блок керування подачею палива та п'єзопривід, контролюємий мікропроцесорною системою керування, яка відрізняється тим, що до неї введено систему керування блоком керування подачею палива на базі регульованого перетворювача напруги, сигнал з якого подається на п'єзопривід з наборного стовпа п'єзокерамічних шайб, жорстко встановлений на основі і який за допомогою коромисла забезпечує переміщення золотника блока керування подачею палива [5].

Технічний результат досягається завдяки тому, що наборний стовп п'єзокерамічних шайб забезпечує:

- високий пусковий момент та швидкодію;
- високу надійність і ресурс (більш 50000 ч);
- стабільну роботу при температурі до 150°С;
- мале енергоспоживання;
- іскровибухонебезпечність;

(19) UA (11) 54257 (13) U

- відсутність випромінюваних магнітних полів;
- безшумну роботу;
- меншу металоємкість системи у порівнянні з гідравлічною;

- порівняльна низька початкова вартість.

Недоліки системи, які обумовлені використанням коромисла:

- через мале переміщення приводу необхідно використовувати коромисло з великим відношенням пліч, що збільшує масу та габарити системи;
- необхідність використання додаткових пружин, для попереднього навантаження стовпа п'єзокерамічних шайб.

Задачею корисної моделі є створення електронної системи керування, у якій використовується ротаційний п'єзодвигун, у якості приводу блока керування подачею палива, що дозволяє виключити необхідність використання коромисла та додаткових пружин.

Поставлена задача вирішується тим, що в систему керування подачею палива «інтелектуального» двигуна, яка містить датчики, блок керування подачею палива та п'єзопривід, контролюємий мікропроцесорною системою керування, яка відрізняється тим, що до неї введено систему керування блоком керування подачею палива на базі регульованого перетворювача напруги, сигнал з якого подається на ротаційний п'єзодвигун, жорстко встановлений на основі, який за допомогою шнекового механізму забезпечує переміщення золотника блока керування подачею палива.

Технічний результат досягається завдяки тому, що ротаційний п'єзодвигун забезпечує:

- відсутність коромисла;
- відсутність допоміжних пружин попереднього навантаження;
- високий пусковий момент та швидкодію;
- високу надійність і ресурс (більш 50000 ч);
- мале енергоспоживання;
- іскровибухонебезпечність;
- відсутність випромінюваних магнітних полів;
- безшумну роботу;
- меншу металоємкість системи у порівнянні з гідравлічною;
- порівняльна низька початкова вартість.

На Фіг.1 зображено блок керування подачею палива з п'єзоприводом: 1 - блок керування подачею палива, 2 - основа, 3 - шнек, 4 - п'єзопривід (ротаційний п'єзодвигун), 5 - диск з мітками, 6, 7 - оптичний датчик (джерело і приймач), 8 - датчик положення колінчатого валу, 9 - датчик кількості упорснутого палива.

Корисна модель містить блок керування подачею палива 1, який з'єднано за допомогою чотирьох болтів, два з яких показано на кресленні, з основою 2, всередині якої на двох підшипниках встановлено шнек 3 з'єднаний за допомогою шліців з одним кінцем вала ротаційного п'єзодвигуна 4, аз іншого кінця встановлено диск з мітками 5 та оптичний датчик (6 - джерело, 7 - приймач), який реєструє положення ротора при перетинанні мітки

оптичного каналу, сигнал з якого також як сигнал датчика положення колінчатого валу 8 та датчика кількості упорснутого палива 9 поступає до блока керування, який змінює частоту обертання п'єзодвигуна.

У вихідному стані при зупиненому двигуні золотник БУПП знаходиться під впливом внутрішньої пружини у нижньому положенні, при якому прохід палива закрито. Паливо подається через вхідний отвір під постійним тиском, а на виході паливо відсутнє.

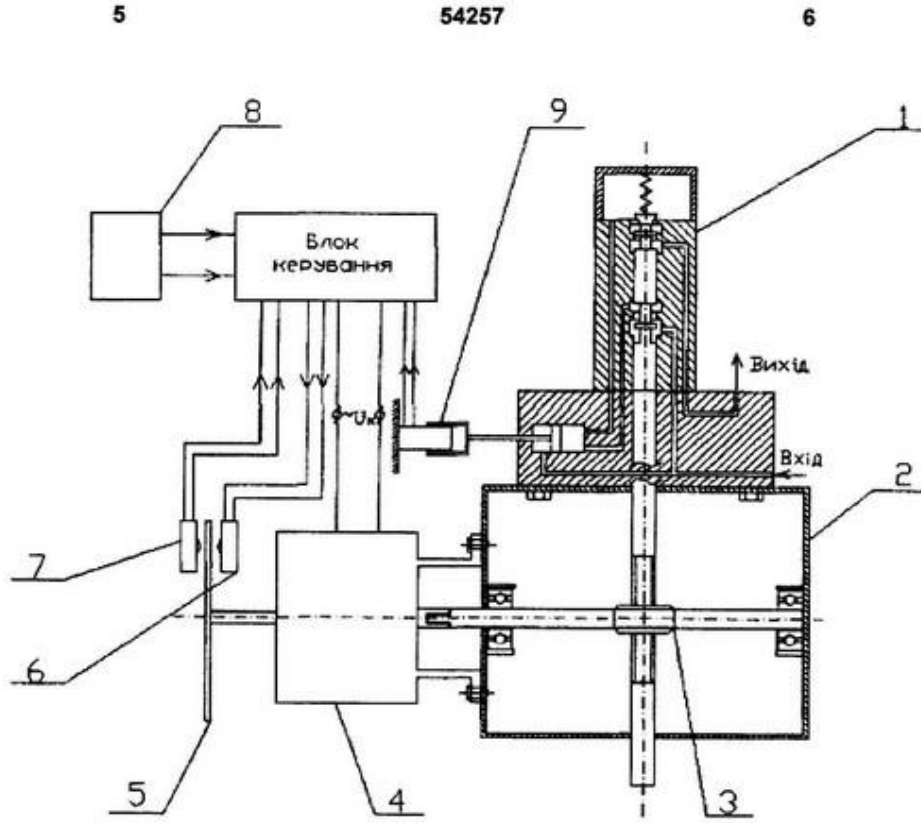
При запуску двигуна блок керування отримує сигнал від датчика положення колінчатого валу та датчика кількості упорснутого палива, згідно з якими здійснюється керування упорскуванням палива, і формує сигнал на п'єзопривід, який обертає шнек. При цьому шнек переміщує золотник БУПП вгору, і відкривається прохід палива. При отриманні сигналу з датчика кількості упорснутого палива о проході необхідної кількості палива через БУПП блок керування формує зворотній сигнал на п'єзопривід і золотник повертається в початкове положення під дією внутрішньої пружини БУПП.

Елементи корисної моделі може бути реалізовано згідно з відомими схемами:

- ротаційний п'єзодвигун - [6, 7];
- перетворювач напруги - [7, 8];
- блок керування подачею палива - [3];
- датчики - [9];
- шнековий механізм - [10].

Джерела інформації:

1. Возницкий И. В. Топливная аппаратура судовых дизелей. - СПб.: Моркнига, 2005. - 133 с.
2. Топливо и топливные системы судовых дизелей / Ю. А. Пахомов, Ю. П. Коробков, Е. В. Дмитриевский, Г. Л. Васильев; под ред. Ю. А. Пахомова. - М: Транслит, 2007. - 496 с.
3. Wartsila [електронний ресурс] - <http://www.wartsila.com/>
4. Козырев, И.А. Морьяк, учи матчасть! // Судоводство. - 1996. - №6.-С. 23.
5. Пат. 43426 Україна, МПК G01N 11/10. Система керування подачею палива «інтелектуального» двигуна / В.В. Нікольський, Є. М. Оженко; заявл. 29.04.09; опубл. 10.08.09; Бюл. №15
6. А. с. № 805880. Пьезоспектрический двигатель //Лавриненко В.В., Говяшин Ю.А. и др., 1979.
7. Петренко С. Ф. Пьезоэлектрический двигатель в приборостроении //Монография, 2001. - 100с.
8. Щербakov В. И., Грездов Г. И. Электронные схемы на операционных усилителях: Справочник. - К.: Техніка, 1983. - 213 с.
9. Измерительные преобразователи / Р.Г. Джагулов, Е.Б. Плавинский, В. В. Никольский, А. М. Веретенник. - Одесса: Астропринт, 2002. - 216 с.
10. Судовой механик: в 3 т./ Под общей редакцией А.А. Фока - Одесса.: Астропринт, 2008. - 1568с.



Фиг. 1





(11) **54258**(19) **UA**(51) МПК (2009)  
G01N 11/10

(21) Номер заявки: **а 2010 00966**

(22) Дата подання заявки: **01.02.2010**

(24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: **10.11.2010**

(46) Дата публікації відомостей про видачу патенту та номер бюлетеня: **10.11.2010, Бюл. № 21**

(72) Винахідники:  
**Нікольський Віталій  
Валентинович, UA,  
Оженко Євген Михайлович,  
UA**

(73) Власники:  
**Нікольський Віталій  
Валентинович,  
вул. Варламова, 20-б, кв. 77,  
м. Одеса, 65009, UA,  
Оженко Євген Михайлович,  
вул. Кримська, 72, кв. 255, м.  
Одеса, 65117, UA**

(54) Назва корисної моделі:

**СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ПОДАЧЕЮ ПАЛИВА "ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО" ДВИГУНА**

(57) Формула корисної моделі:

Система керування подачею палива двигуна, яка містить датчики, блок керування подачею палива та п'єзопривід, контрольований мікропроцесорною системою керування, яка відрізняється тим, що містить систему керування блоком керування подачею палива на базі регульованого перетворювача напруги, сигнал з якого подають на ротаційний п'єзодвигун, жорстко встановлений на основі, який за допомогою хулачкової шайби забезпечує переміщення золотника блока керування подачею палива.



УКРАЇНА

(19) UA (11) 54258 (13) U  
(51) МПК (2009)  
G01N 11/10

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ  
І НАУКИ УКРАЇНИ

ДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ  
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ  
ВЛАСНОСТІ

ОПИС  
ДО ПАТЕНТУ  
НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

видається під  
відповідальність  
власника  
патенту

(54) СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ПОДАЧЕЮ ПАЛИВА "ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО" ДВИГУНА

1

(21) a201000966

(22) 01.02.2010

(24) 10.11.2010

(46) 10.11.2010, Бюл. № 21, 2010 р.

(72) НІКОЛЬСЬКИЙ ВІТАЛІЙ ВАЛЕНТИНОВИЧ,  
ОЖЕНКО ЄВГЕН МИХАЙЛОВИЧ(73) НІКОЛЬСЬКИЙ ВІТАЛІЙ ВАЛЕНТИНОВИЧ,  
ОЖЕНКО ЄВГЕН МИХАЙЛОВИЧ(57) Система керування подачею палива двигуна,  
яка містить датчики, блок керування подачею па-

2

лива та п'єзопривід, контрольований мікропроцесорною системою керування, яка відрізняється тим, що містить систему керування блоком керування подачею палива на базі регульованого перетворювача напруги, сигнал з якого подають на ротаційний п'єзодвигун, жорстко встановлений на основі, який за допомогою кулачкової шайби забезпечує переміщення золотника блока керування подачею палива.

Корисна модель відноситься до систем керування, приводом яких служить п'єзоелектричний двигун, і може бути використаний в автоматизованих системах керування двигунами внутрішнього згорання, зокрема судовими енергетичними установками, для керування упорскуванням палива [1,2].

Відома акумуляторна система керування упорскуванням палива, яка містить, датчики, електронно-гідралічну систему керування на мікропроцесорі, регульований паливний насос, гідроакумулятор, та форсунку, з'єднану з акумулятором-паливопроводом через блок керування подачею палива (БУПП) [3]. Паливо подається в акумулятор під тиском (~100 МПа) регульованим насосом. В потрібний час мікропроцесор подає команду на соленоїдний клапан, який відкриває подачу сервомаєла до БУПП, який відкриває путь паливу до форсунки. Упорскування здійснюється при незмінному тиску палива. Після цього закривається подача сервомаєла до БУПП і зупиняється подача палива у циліндр.

Технічний результат досягається завдяки тому, що електронно-гідралічна система керування забезпечує:

постійний тиск упорскування;  
плавне регулювання кута випередження упорскування;

незалежність кількості упорсненого палива, начала та кінця подачі палива від шкорої руху плунжера паливного насосу, який

залежить від шкорої обертання двигуна.

Недоліки системи, які обумовлені використан-

ням електронно-гідралічної системи:

багаторазове перетворення управляючого імпульсу з одного виду енергії на інший, як слід зменшення шкорої та надійності;

нешцільності, які призводять до протічки сервомаєла;

ненадійність гідралічної частини системи керування [4];

велика металоемкість системи, та як слід висока початкова ціна.

Найбільш близькою за технічною сутністю та результатом, що досягається, до корисної моделі, що пропонується, є система керування подачею палива "інтелектуального" двигуна, яка містить датчики, блок керування подачею палива та п'єзопривід, контрольований мікропроцесорною системою керування, яка відрізняється тим, що до неї введено систему керування блоком керування подачею палива на базі регульованого перетворювача напруги, сигнал з якого подається на п'єзопривід з наборного стовпа п'єзокерамічних шайб, жорстко встановлений на основі і який за допомогою коромисла забезпечує переміщення золотника блока керування подачею палива [5].

Технічний результат досягається завдяки тому, що наборний стовп п'єзокерамічних шайб забезпечує:

високий пусковий момент та швидкодію;

високу надійність і ресурс (більш 50000 ч);

стабільну роботу при температурі до 150°C;

мале енергоспоживання;

іскровибухонебезпечність;

відсутність випромінюваних магнітних полів;

(19) UA (11) 54258 (13) U

безшумну роботу;  
меншу металоемкість системи у порівнянні з гідравлічною;  
порівняльна низька початкова вартість.

Недоліки системи, які обумовлені використанням коромисла:

через мале переміщення приводу необхідно використовувати коромисло з великим відношенням пліч, що збільшує масу та габарити системи;  
необхідність використання додаткових пружин, для попереднього навантаження стовпа п'єзокерамічних шайб.

Задачею корисної моделі є створення електронної системи керування, у якій використовується ротаційний п'єзодвигун, у якості приводу блока керування подачею палива, що дозволяє виключити необхідність використання коромисла та додаткових пружин.

Поставлена задача вирішується тим, що в систему керування подачею палива "інтелектуального" двигуна, яка містить датчики, блок керування подачею палива та п'єзопривід, контрольований мікропроцесорною системою керування, яка відрізняється тим, що до неї введено систему керування блоком керування подачею палива на базі регульованого перетворювача напруги, сигнал з якого подається на ротаційний п'єзодвигун, жорстко встановлений на основі, який за допомогою кулачкової шайби забезпечує переміщення золотника блока керування подачею палива.

Технічний результат досягається завдяки тому, що ротаційний п'єзодвигун забезпечує:

відсутність коромисла;  
відсутність допоміжних пружин попереднього навантаження;

високий пусковий момент та швидкодію;  
високу надійність і ресурс (більш 50000 ч);  
мале енергоспоживання;  
іскровибухонебезпечність;  
відсутність випромінюваних магнітних полів;  
безшумну роботу;

меншу металоемкість системи у порівнянні з гідравлічною;

порівняльна низька початкова вартість.

На кресленні зображено блок керування подачею палива з п'єзоприводом: 1 - блок керування подачею палива, 2 - основа, 3 - кулачкова шайба, 4 - п'єзопривід (ротаційний п'єзодвигун), 5 - диск з метками, 6, 7 - оптичний датчик (джерело і приймач), 8 - датчик положення колінчатого валу, 9 - датчик кількості упорснутото палива.

Корисна модель містить блок керування подачею палива 1, який з'єднано за допомогою чотирьох болтів, два з яких показано на кресленні, з основою 2, всередині якої на двох підшипниках встановлено вал 3 з кулачковою шайбою з'єднаний за допомогою шліців з одним кінцем вала ро-

таційного п'єзодвигуна 4, а з іншого кінця встановлено диск з метками 5 та оптичний датчик (6 - джерело, 7 - приймач), який реєструє швидкість обертання ротора при перетинанні мітки оптичного каналу, сигнал з якого також як і сигнал датчика положення колінчатого валу 8 та датчика кількості упорснутото палива 9 поступає до блока керування, який змінює частоту обертання п'єзодвигуна.

У вихідному стані при зупиненому двигуні золотник БУПП знаходиться під впливом внутрішньої пружини у нижньому положенні, при якому прохід палива закрито. Паливо подається через вхідний отвір під постійним тиском, а на виході паливо відсутнє.

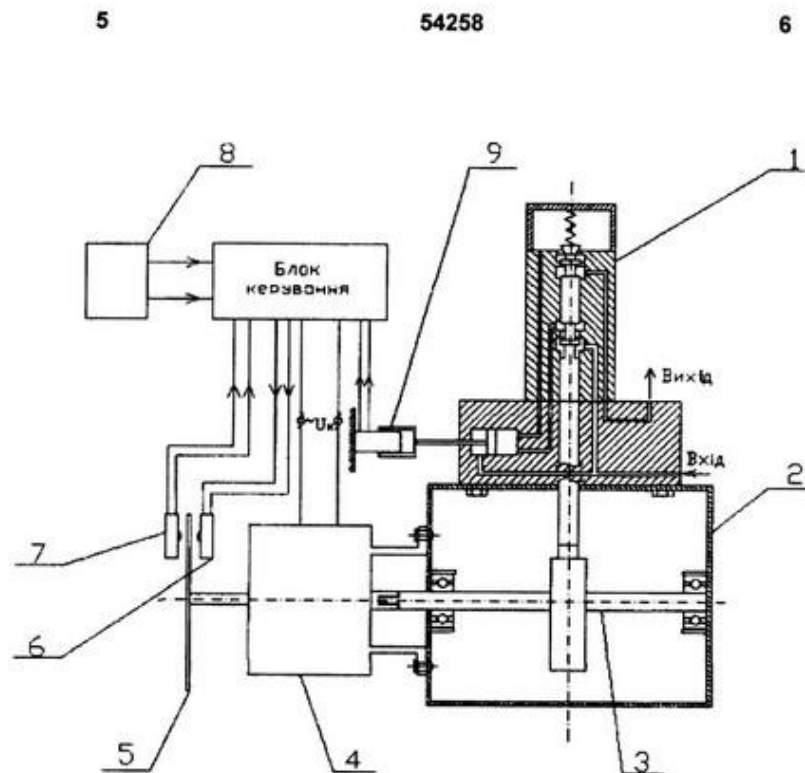
При запуску двигуна блок керування отримує сигнал від датчика положення колінчатого валу та датчика кількості упорснутото палива, згідно з якими здійснюється керування упорскуванням палива, і встановлює частоту обертання п'єзоприводу, який за допомогою кулачкової шайби переміщує золотник, тим самим відкриває, чи закриває прохід палива.

Елементи корисної моделі може бути реалізовано згідно з відомими схемами:

- ротаційний п'єзодвигун - [6];
- перетворювач напруги - [7];
- блок керування подачею палива - [3];
- датчики - [8];
- вал з кулачковою шайбою - [9].

Джерела інформації:

1. Возницький І. В. Топливная аппаратура судовых дизелей. - СПб.: Моркнига, 2005. - 133с.
2. Топливо и топливные системы судовых дизелей / Ю. А. Пахомов, Ю. П. Коробков, Е. В. Дмитриевский, Г. Л. Васильев; под ред. Ю. А. Пахомова. - М.: Транслит, 2007. - 496с.
3. Wartsila [електронний ресурс] - <http://www.wartsila.com/>
4. Козырев И.А. Морьяк, учи матчасть! // Судовоходство. - 1996. - №6. - С.23.
5. Пат. 43426 Україна, МПК G01N 11/10. Система управління подачею палива "інтелектуального" двигуна / В.В. Нікольський, С.М. Оженко; заявл. 29.04.09; опубл. 10.08.09; Бюл. №15
6. Петренко С.Ф. Пьезозлектрический двигатель в приборостроении // Монография, 2001. - 100с.
7. Щербак В. И., Грездов Г. И. Электронные схемы на операционных усилителях: Справочник. - К.: Техніка, 1983. - 213с.
8. Измерительные преобразователи / Р.Г. Джагулов, Е.Б. Плавинский, В.В. Никольский, А.М. Веретенник. - Одесса: Астропринт, 2002. - 216с.
9. Судовой механик: в 3 т./ Под общей редакцией А. А. Фока -Одесса.: Астропринт, 2008. - 1568с.



Комп'ютерна верстка Л. Ціхановська

Підписне

Тираж 26 прим.

Міністерство освіти і науки України

Державний департамент інтелектуальної власності, вул. Урицького, 45, м. Київ, МСП, 03680, Україна

ДП "Український інститут промислової власності", вул. Глазунова, 1, м. Київ – 42, 01601

## **ДОДАТОК В**

### **СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**



1. Миусов М. В., Ланчуковский В. И., Оженко Е. М. Электронные системы управления главными судовыми двигателями: учебное пособие / М. В. Миусов, В. И. Ланчуковский, Е. М. Оженко. – Одесса: ОНМА, 2013. – 98 с.
2. Никольский В. В. Повышение качества регулирования вязкости топлива на судне / В. В. Никольский, Е. М. Оженко, И. Г. Уранковский // Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сб. – 2007. – Вып. 12. – Одесса: ОНМА. – С. 95–107.
3. Оженко Е. М. Вискозиметр для измерения динамической вязкости тяжелого топлива / Е. М. Оженко, В. В. Никольский // Вісник Черкаського державного технологічного університету. – 2007. – Спецвипуск. – Черкаси: ЧДТУ. – С. 218–220.
4. Михайленко В. С. Нечеткая система автоматизированного регулирования давления пара судовой котельной установки / В. С. Михайленко, Е. М. Оженко // Холодильна техніка и технологія. – 2008, № 5 (115). – Одеса: ОДАХ. – С. 69–73.
5. Михайленко В. С. Экспертная система диагностики судового оборудования / В. С. Михайленко, Е. М. Оженко // Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сб. – 2008. – Вып. 14. – Одесса: ОНМА. – С. 64–68.
6. Ozhenko Y. M. Increase the intelligent engine's automation control system reliability / Y. M. Ozhenko, V. V. Nikolskiy // Вісник Черкаського державного технологічного університету. – 2009. – Спецвипуск. – Черкаси: ЧДТУ. – С. 80–82.
7. Никольский В. В. Повышение надежности АСУ «Интеллектуального двигателя» / В. В. Никольский, Е. М. Оженко, С. И. Горб // Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сб. – 2010. – Вып. 16. – Одесса: ОНМА. – С. 77–82.
8. Никольский В. В. Оценка возможности использования вентильного двигателя, как привода блока управления подачей топлива /

В. В. Никольский, Е. М. Оженко, С. С. Павленко, А. К. Сандлер // Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сб. – 2010. – Вып. 16. – Одесса: ОНМА. – С. 83–86.

9. Никольский В. В. Совершенствование системы управления частоты вращения дизель-генератора / В. В. Никольский, Е. М. Оженко, В. С. Свинобой, С. Г. Хнюнин // Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сб. – 2010. – Вып. 16. – Одесса: ОНМА. – С. 87–92.

10. Никольский В. В. Оценка возможности применения пьезогенератора в составе судового дизеля / В. В. Никольский, Е. М. Оженко, В. Е. Лысенко, М. В. Никольский // Судовые энергетические установки. – 2012. – № 30. – Одеса: ОНМА. – С. 92–97.

11. Оженко Е. М. Оценка возможности применения пьезоэлектрического исполнительного механизма для повышения эффективности автоматизированной системы управления подачей топлива / Е. М. Оженко // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия «Морская техника и технология». – № 2. – Астрахань: АГТУ, 2013. – С. 137–142.

12. Никольский В. В. Применение пьезоэлектрического исполнительного механизма для повышения эффективности автоматизированной системы управления подачей топлива / В. В. Никольский, Е. М. Оженко // Судовые энергетические установки. – 2015. – № 36. – Одеса: ОНМА. – С. 130–140.

13. Оженко Є. М. Зменшення механічних коливань набору п'єзокерамічних шайб п'єзоприводу за допомогою використання від'ємного зворотнього зв'язку / Є. М. Оженко // Наукові праці: Науково-методичний журнал. Серія «Комп'ютерні технології». – Вип. 296, Т. 308. – Миколаїв: ЧНУ ім. Петра Могили, 2017. – С. 146–149.

14. Оженко Е. М. Trace Mode в информационном обеспечении СЭУ / Е. М. Оженко, В. В. Никольский // Матеріали XIV міжнародної конференції з автоматичного управління (Автоматика – 2007), 10–14



вересня 2007. – Севастополь: СНУЯЄтаП, 2007. – С. 158–159.

15. Оженко Е. М. Повышение надежности АСУ «интеллектуального двигателя» / Е. М. Оженко, В. В. Никольский, В. С. Михайленко // Матеріали XV міжнародної конференції з автоматичного управління (Автоматика – 2008), 23–26 вересня 2008. – Одеса: ОНМА. – 2008. – С. 390–391.

16. Оженко Е. М. Вискозиметр для измерения динамической вязкости тяжелого топлива / Е. М. Оженко, В. В. Никольский // Матеріали IV міжнародної науково-технічної конференції «Датчики, прилади та системи – 2008», 19–23 вересня 2008. – Черкаси: ЧДТУ. – 2008. – С. 93–94.

17. Оженко Е. М. Повышение надежности АСУ «Интеллектуального двигателя» / Е. М. Оженко, С. И. Горб, Л. В. Вишневский, В. В. Никольский // Матеріали XVI міжнародної конференції з автоматичного управління (Автоматика – 2009), 22–25 вересня 2009. – Чернівці: Книги. – 2009. – С. 198–199.

18. Никольский В. В. Повышение надежности АСУ судовыми двигателями внутреннего сгорания с электронным управлением впрыска топлива / В. В. Никольский, Е. М. Оженко // Матеріали XVII міжнародної конференції з автоматичного управління (Автоматика – 2010), 27–29 вересня 2010. – Том 1. – Харків: ХНУРЕ. – 2010. – С. 258–259.

19. Никольский В. В. Повышение надежности АСУ судового двигателя с электронным управлением подачей топлива / В. В. Никольский, Е. М. Оженко // Матеріали XVIII міжнародної конференції з автоматичного управління (Автоматика – 2011), 28–30 вересня 2011. – Львів: Львівська політехніка. – 2011. – С. 266.

20. Никольский В. В. Усовершенствование АСУ подачи топлива судового двигателя с электронным управлением / В. В. Никольский, Е. М. Оженко // Матеріали XIX міжнародної конференції з автоматичного управління (Автоматика – 2012), 26–28 вересня 2012. – Київ: НУХТ. – 2012. – С. 233–234.

21. Пат. 37258 Україна, МПК (2006) G01N11/10. Віскозиметр / В. В. Нікольський, Є. М. Оженко. – № u200806748; заявл. 16.05.2008; опубл. 25.11.2008, Бюл. № 22.

22. Пат. 43426 Україна, МПК (2009) G01N11/10. Система управління подачею палива «інтелектуального» двигуна / В. В. Нікольський, Є. М. Оженко. – № u200904249; заявл. 29.04.2009; опубл. 10.08.2009, Бюл. № 15.

23. Пат. 54256 Україна, МПК (2009) G01N11/10. Система керування подачею палива «інтелектуального» двигуна / В. В. Нікольський, Є. М. Оженко. – № u201000962; заявл. 01.02.2010; опубл. 10.11.2010, Бюл. № 21.

24. Пат. 54257 Україна, МПК (2009) G01N11/10. Система керування подачею палива «інтелектуального» двигуна / В. В. Нікольський, Є. М. Оженко. – № u201000963; заявл. 01.02.2010; опубл. 10.11.2010, Бюл. № 21.

25. Пат. 54258 Україна, МПК (2009) G01N11/10. Система керування подачею палива «інтелектуального» двигуна / В. В. Нікольський, Є. М. Оженко. – № u201000966; заявл. 01.02.2010; опубл. 10.11.2010, Бюл. № 21.

26. Пат. 55019 Україна, МПК (2009) G01N11/00. Система керування подачею палива «інтелектуального» двигуна / В. В. Нікольський, Є. М. Оженко. – № u201000959; заявл. 01.02.2010; опубл. 10.12.2010, Бюл. № 23.

27. Пат. 78425 Україна, МПК (2013.01) B63B 17/00. Судновий дизель з п'єзогенератором / В. В. Нікольський, Є. М. Оженко, В. Є. Лисенко, М. В. Нікольський. – № u201202943; заявл. 13.03.2012; опубл. 25.03.2013, Бюл. № 6.