

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ЧОРНОМОРСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ІМЕНІ ПЕТРА МОГИЛИ

**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

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Миколаїв – 2018

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національному університеті «Одеська морська академія» Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор  
**Нікольський Віталій Валентинович**,  
Національний університет  
«Одеська морська академія»,  
професор кафедри теорії автоматичного  
управління та обчислювальної техніки.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор  
**Мусієнко Максим Павлович**,  
Чорноморський національний  
університет імені Петра Могили,  
професор кафедри комп'ютерної інженерії;

кандидат технічних наук, доцент  
**Базіло Костянтин Вікторович**,  
Черкаський державний технологічний  
університет, доцент кафедри  
приладобудування, мехатроніки та  
комп'ютеризованих технологій.

Захист відбудеться 04 грудня 2018 р. о 15<sup>30</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 38.053.05 в Чорноморському національному університеті імені Петра Могили за адресою: 54003, м. Миколаїв, вул. 68 Десантників, 10.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Чорноморського національного університету імені Петра Могили за адресою: 54003, м. Миколаїв, вул. 68 Десантників, 10, та за електронною адресою: <https://chmnu.edu.ua/disertatsiyi/>.

Автореферат розісланий 04 листопада 2018 року.

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради



Є. О. Давиденко

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Робота присвячена розробці методів, моделей та засобів покращення систем управління подачею палива судових 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 судових 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 судових 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 суднового 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 запропонованої 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.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність 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 суднових дизелів та сформульовані основні задачі досліджень.

В роботі проаналізовано характеристики комп'ютерних систем управління подачею палива суднових 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. Конструкція складального стовпа п'єзоелектричних шайб показана на рис. 1.

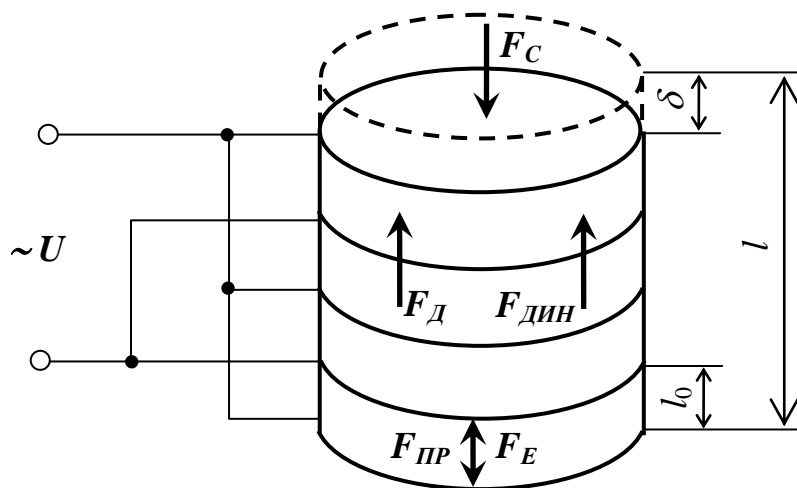


Рис. 1. Конструкція складального стовпа п'єзоелектричних шайб

На рис. 1  $F_C$  – статичне зусилля, що прикладене до виконавчого органу;  $F_D$  – демпфуюче зусилля в п'єзоелементі;  $F_{ДИН}$  – динамічне зусилля в п'єзоелементі;  $F_{ПП}$  – 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.

В роботі отримані вирази визначення необхідних статичних та динамічних зусиль, напружень, деформацій та переміщень, побудовані відповідні структурні схеми. Визначені коефіцієнти прямого та зворотного п'єзоєфектів, 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 (рис. 2), яка враховує вплив підсилювача, а також пружини золотника і пружини попереднього навантаження.



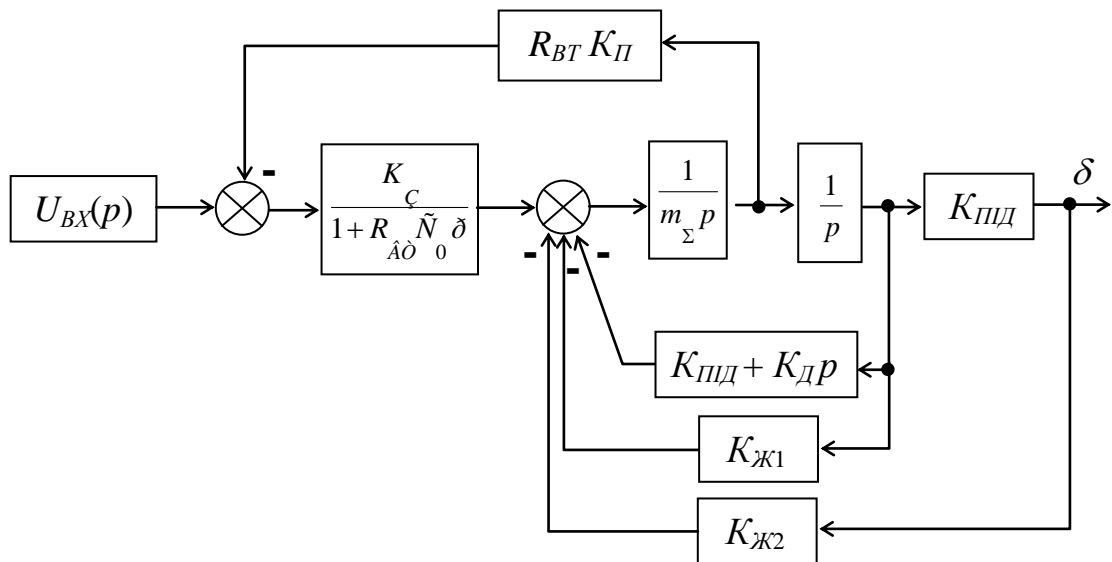


Рис. 2. Структурна схема блоку управління подачі палива з п'єзоприводом

На рис. 2  $U_{BX}(p)$  – напруга керування;  $K_{\zeta}$  – коефіцієнт зворотного п'єзоефекту;  $K_{\Pi}$  – коефіцієнт прямого п'єзоефекту;  $R_{BT}$  – внутрішній опір п'єзостовпа;  $C_0$  – ємність п'єзостовпа;  $m_{\Sigma}$  – еквівалентна наведена сумарна маса рухомих частин;  $K_{\Pi\Delta}$  – коефіцієнт посилення впливу п'єзостовпа;  $K_{\Pi p}$  – коефіцієнт пружності п'єзостовпа;  $K_{\Delta}$  – коефіцієнт внутрішнього демпфування п'єзостовпа;  $K_{\Pi\Delta}$  – коефіцієнт підсилення впливу п'єзостовпа;  $K_{\text{Ж1}}$  – коефіцієнт жорсткості пружини попереднього навантаження;  $K_{\text{Ж2}}$  – коефіцієнт жорсткості пружини золотника.

Передавальна функція має вигляд:

$$W_{\delta}(p) = \frac{K_{\zeta} K_{\ddot{p}\ddot{A}}}{\alpha m_{\Sigma} p^3 + \left( m_{\Sigma} + \alpha \hat{E}_{\ddot{A}} \right) p^2 + \left( \alpha K_{\ddot{A}} + K_{\ddot{A}} + \alpha K_{\text{Ж1}} + \alpha K_{\text{Ж2}} + \alpha \beta \right) p + K_{\text{Ж1}} + K_{\text{Ж2}} + \beta},$$

$$\text{де } \alpha = R_{\dot{A}\dot{O}} \tilde{N}, \quad \beta = \hat{E}_{\ddot{p}\ddot{A}} \hat{E}_{\text{Ж2}}.$$

За отриманої передавальної функції в роботі були досліджені амплітудно-частотні (АЧХ), фазочастотні (ФЧХ) та імпульсні характеристики, деякі з яких наведено на рис. 3.

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, 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  $960 \text{ хв}^{-1}$ .

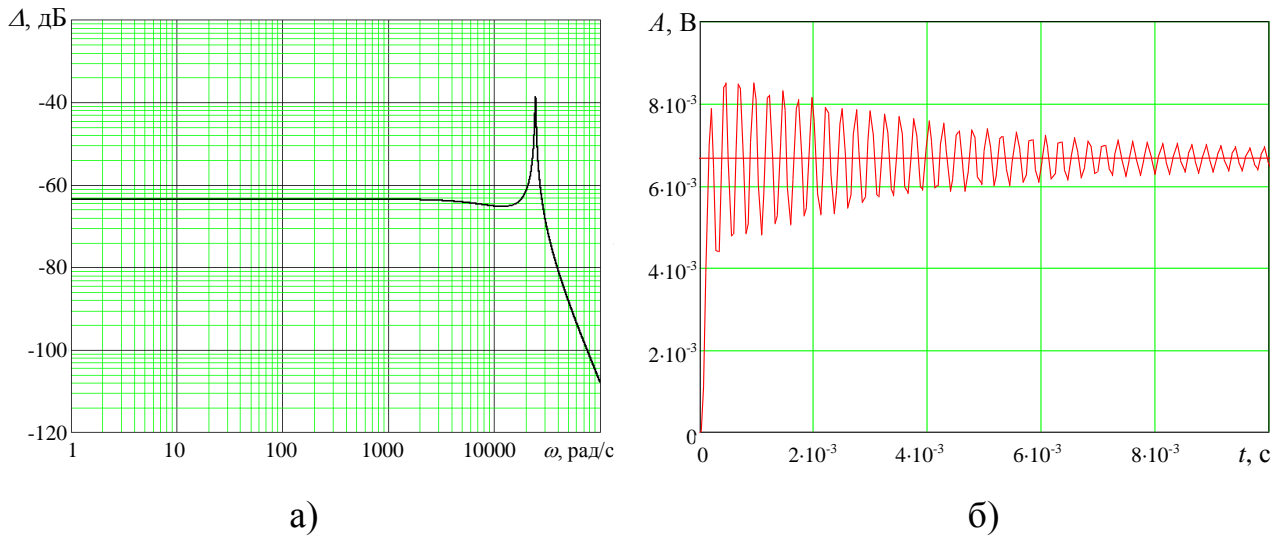


Рис. 3. Амплітудно-частотна (а) та імпульсна (б) характеристики моделі блоку управління подачею палива в циліндр з п'єзоприводом

Проте 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. Дана проблема вирішена завдяки рішенням, що наведені у третьому розділі.

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 ПД-регулятором, структурна схема якого показана на рис. 4.

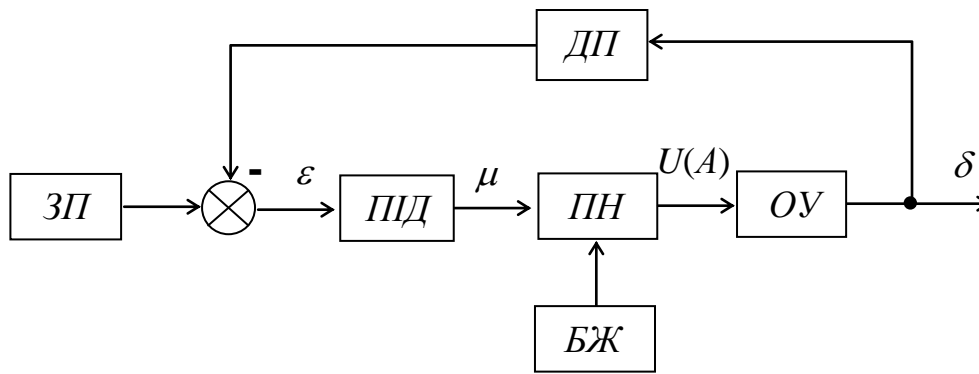


Рис. 4. Структурна схема системи управління подачею палива з п'єзоприводом:  
 ЗП – задаючий пристрій; ПІД – ПІД-регулятор;  
 ПН – перетворювач напруги; БЖ – блок живлення; ОУ – об'єкт управління;  
 ДП – датчик переміщення;  $A$  – амплітуда;  $U(A)$  – напруга.

Застосування системи позиціонування п'єзоприводу з ПІД-регулятором, при керуючому сигналі 1000 В, дозволило знизити амплітуду коливань (рис. 5, крива 1), але не виключило їх повністю.

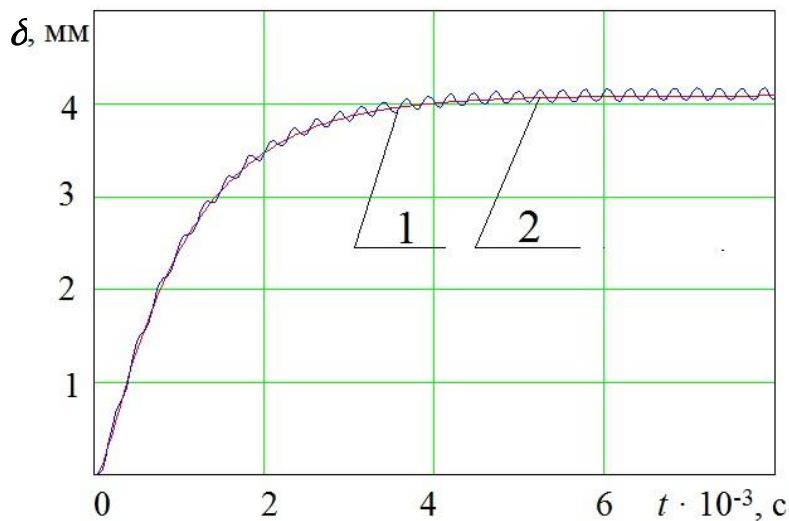


Рис. 5. Переміщення золотника блоку управління подачею палива в циліндр з п'єзоприводом при ступінчастій зміні завдання для систем:  
 1 – з ПІД-регулятором; 2 – з нечітким регулятором

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 (рис. 6) продемонструвала її ефективність: коливання золотника блоку управління подачею палива практично виключені (рис. 5, крива 2), при дотриманні вимог, що пред'являються, до швидкодії системи.

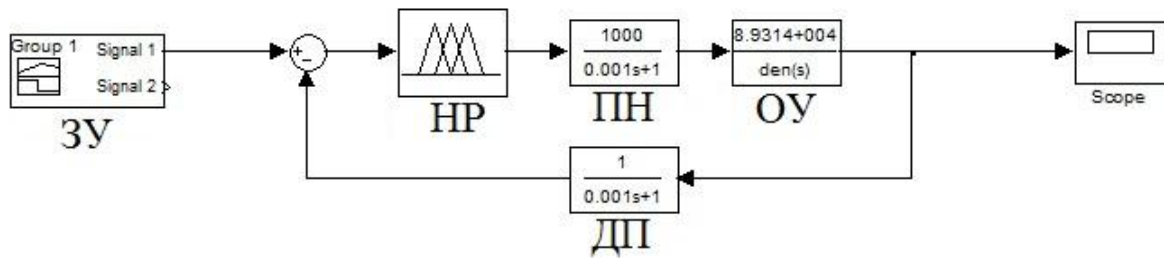


Рис. 6. Модель нечіткої системи позиціонування золотника блоку управління подачею палива з п'єзоприводом в середовищі Matlab

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 (рис. 7) та функціональні моделі таких перетворювачів, АЧХ та ФЧХ (рис. 8), а також перехідні характеристики.

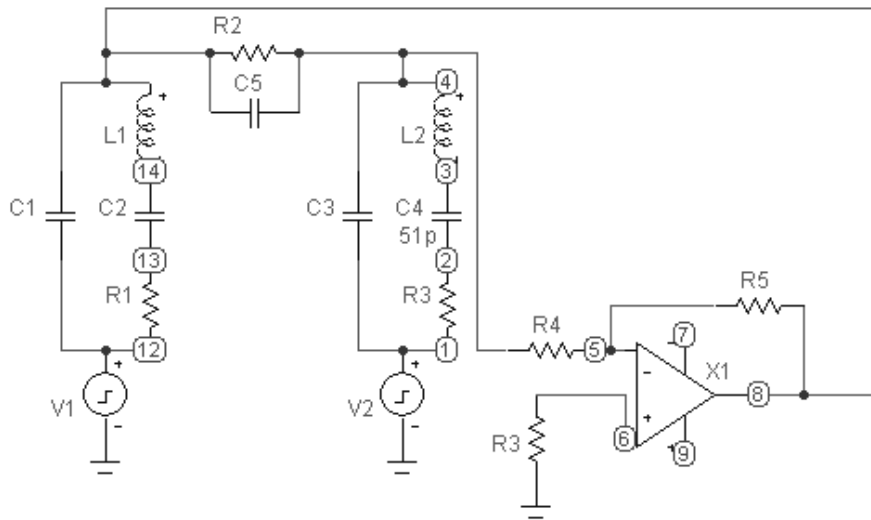


Рис. 7. Схемотехнічна модель п'єзоперетворювача з набором шайб з двох п'єзоелементів з від'ємним зворотним зв'язком

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 (рис. 9), в якій використовувалися п'єзоперетворювачі різних модифікацій, а саме:

- 3-х дисків діаметром 25 мм та висотою 1 мм з п'єзокераміки ЦТС-19;
- 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.

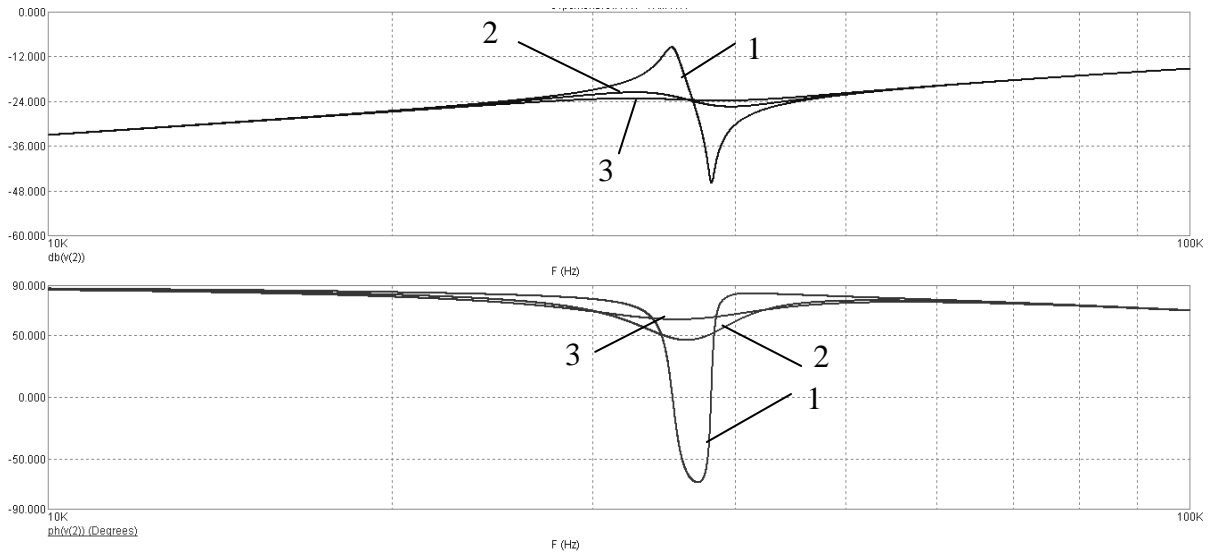


Рис. 8. АЧХ та ФЧХ п'єзоперетворювача з двох п'єзоелементів з від'ємним зворотним зв'язком із різними значеннями коефіцієнту підсилення підсилювача напруги:  
 1 –  $A = 10$ ; 2 –  $A = 100$ ; 3 –  $A = 1000$

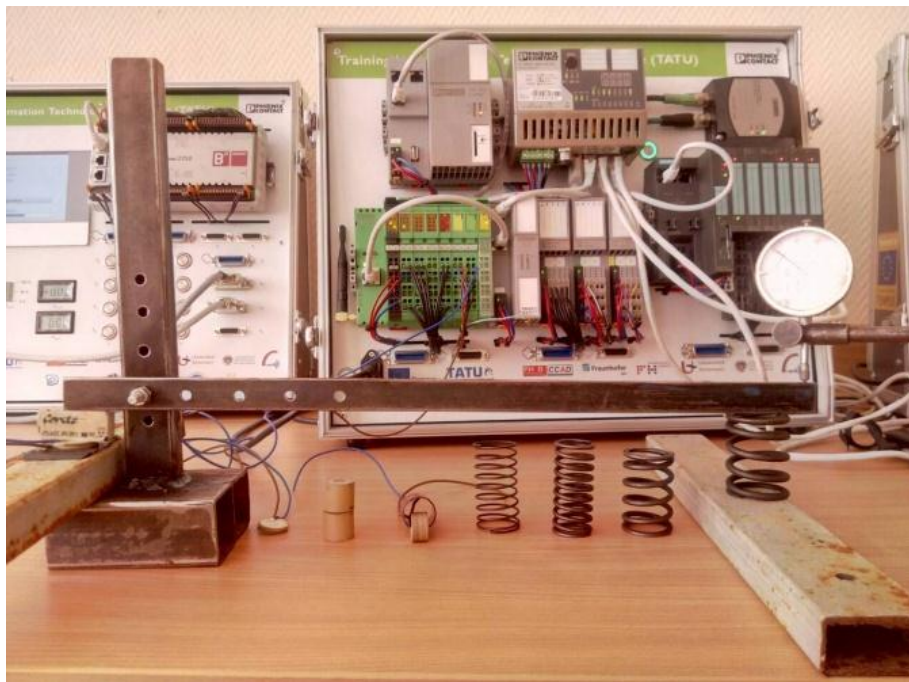


Рис. 9. Загальний вигляд установки для дослідження п'єзоприводів з складальних стовпів п'єзоелектричних елементів

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, серійний номер №2046-08.

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 (один з варіантів показаний на рис. 10) та п'єзоелектричних роторних двигунів (один з варіантів показаний на рис. 11), які довели можливість застосування п'єзоперетворювачів для отримання великих переміщень при необхідному зусиллі і часі перехідного процесу.

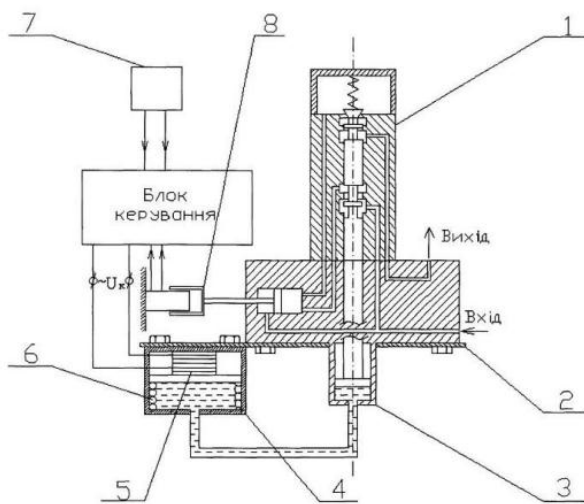


Рис. 10. Блок управління подачею палива на базі п'єзоелектричних складальних стовпів: 1 – блок управління подачею палива; 2 – основа; 3 – ведений гідроциліндр; 4 – провідний гідроциліндр; 5 – складальний стовп п'єзоелектричний шайб; 6 – пружина попереднього навантаження; 7 – датчик частоти обертання; 8 – датчик кількості уприснутого палива

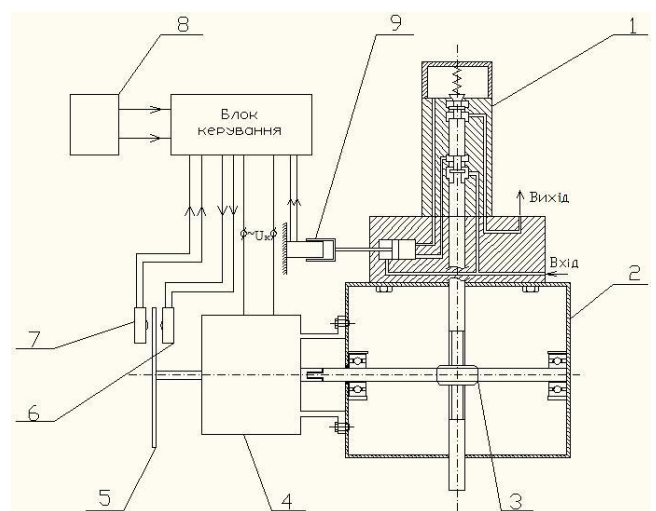


Рис. 11. Блок управління подачею палива на базі роторного п'єзодвигуна: 1 – блок управління подачею палива; 2 – основа; 3 – шнек; 4 – ротаційний п'єзодвигун, 5 – диск з мітками, 6, 7 – джерело та приймач оптичного датчика, 8 – датчик частоти обертання; 9 – датчик кількості уприснутого палива

Отримані в роботі нові науково-технічні та конструктивні рішення дозволили доповнити класифікаційну схему основних типів паливних систем високого тиску (рис. 12) за рахунок впровадження нового типу приводу виконавчого механізму на базі п'єзоелектричних перетворювачів (на рисунку виділені товстими лініями).

В роботі показане місце розроблених п'єзоприводів у комп'ютерній системі управління подачі палива на прикладі модернізації системи WECS9520 з мікропроцесорним блоком FCM-20 (рис.13).

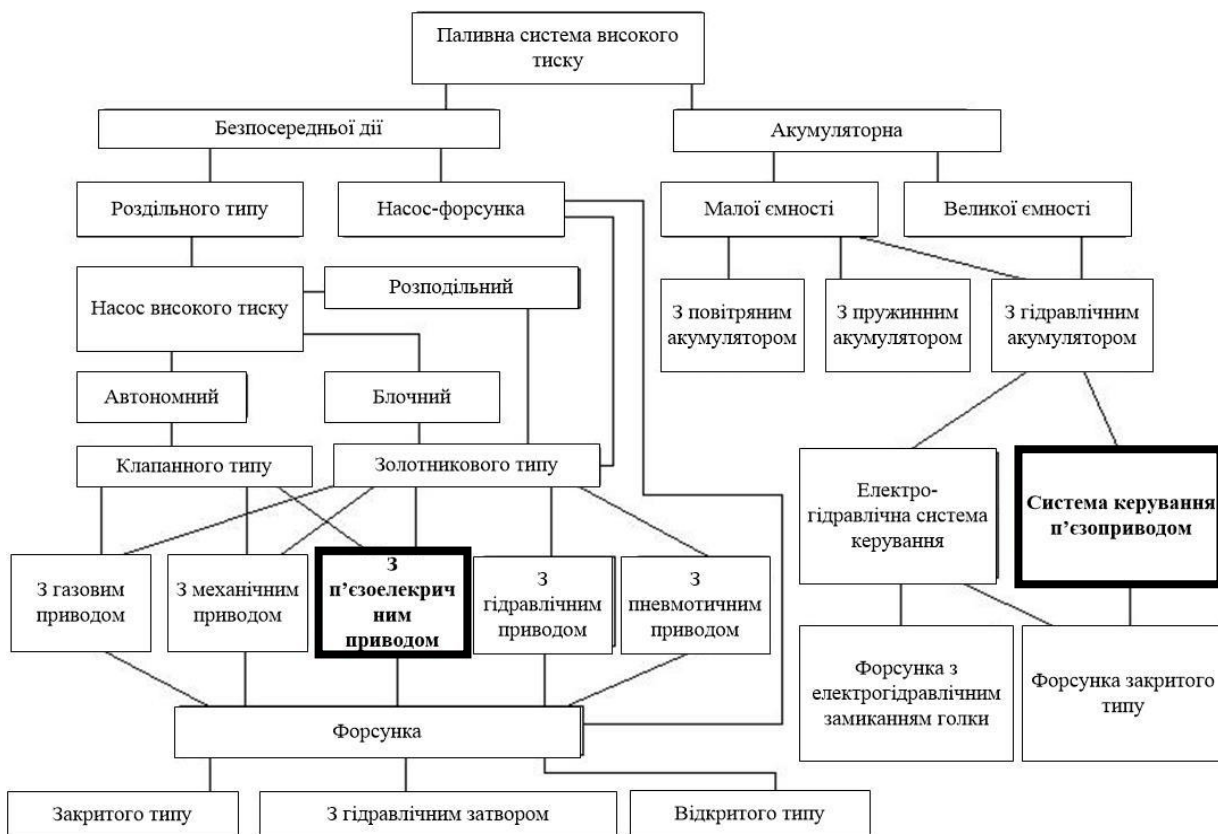


Рис. 12. Нова класифікаційна схема паливних систем високого тиску

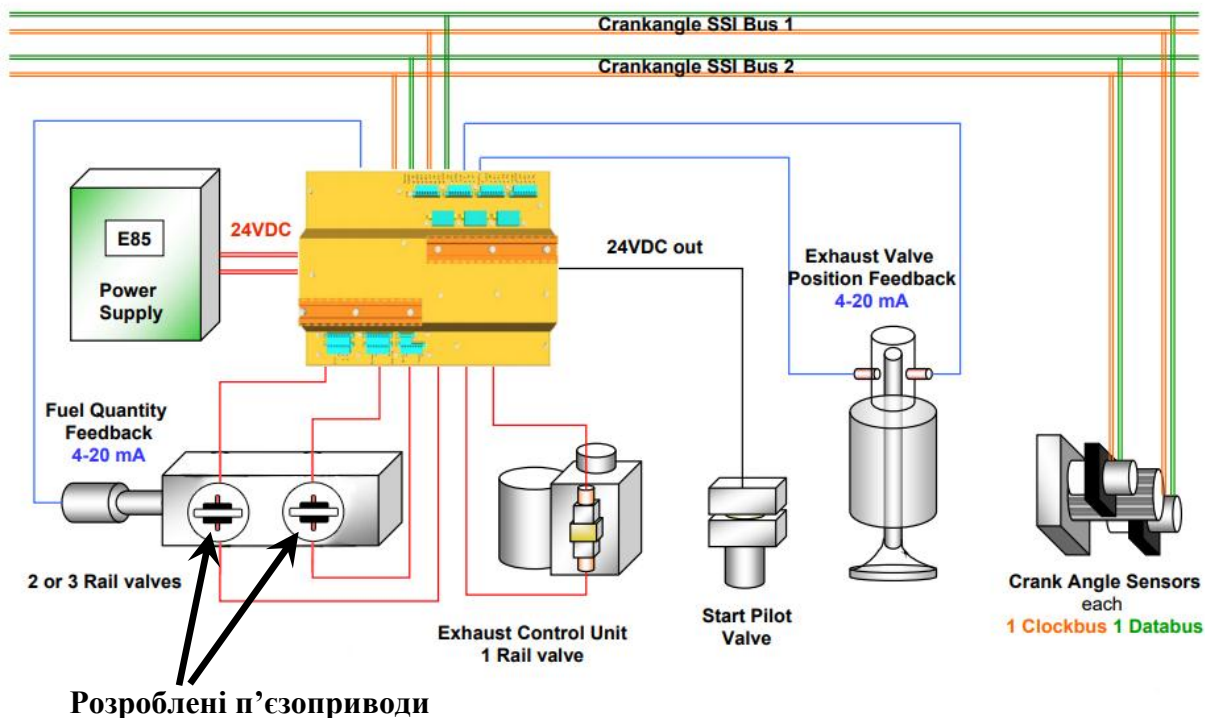


Рис. 13. Місце розроблених п'єзоприводів у комп'ютерній системі управління подачею палива на прикладі модернізації системи WECS9520 з мікропроцесорним блоком FCM-20

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

У **додатках** наведено акти впровадження результатів дисертаційної роботи, описи отриманих патентів та перелік публікацій за темою дисертації.

## 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'єзоприводів 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 коливний 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 ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ 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–

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 ІV 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 ХVІ 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 ХVІІ 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 ХVІІІ 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 ХІХ 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. Вискозиметр / 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.

## 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.

В роботі розроблено метод удосконалення комп'ютерної системи управління подачею палива шляхом впровадження приводу виконавчих механізмів на базі п'єзоперетворювачів. Вперше отримано моделі конструкцій компонентів комп'ютерної системи управління подачею палива на основі приводу виконавчих механізмів на базі п'єзоелектричних складальних стовпів та п'єзоелектричних роторних двигунів. Розроблено моделі та методи зменшення та усунення коливань систем управління подачею палива на основі п'єзопроводу, що дозволило збільшити гарантовану безпеку системи подачі палива. Розроблено та запатентовано конструкції приводів виконавчих механізмів на базі п'єзоелектричних складальних стовпів та п'єзоелектричних роторних двигунів.

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

## АННОТАЦИЯ

**Оженко Е. М.** Модели, методы и средства улучшения системы подачи топлива судового дизеля на базе пьезоэлектрических преобразователей. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.05 – Компьютерные системы и компоненты. – Черноморский национальный университет имени Петра Могили, 2018.

Диссертационное исследование посвящено решению актуальной научно-практической задачи улучшения системы подачи топлива судовых дизелей, оборудованных гидроприводом исполнительных механизмов за счет применения пьезоэлектрических преобразователей.

В работе разработан метод усовершенствования компьютерной системы управления подачей топлива путем внедрения привода исполнительных механизмов на базе пьезопреобразователей. Впервые получены модели конструкций компонентов компьютерной системы управления подачей топлива на основе привода исполнительных механизмов на базе пьезоэлектрических наборных столбов и пьезоэлектрических роторных двигателей. Разработаны модели и методы уменьшения и устранения колебаний систем управления

подачей топлива на основе пьезоприводов, что позволило увеличить гарантированную безопасность системы подачи топлива. Разработаны и запатентованы конструкции приводов исполнительных механизмов на базе пьезоэлектрических наборных столбов и пьезоэлектрических роторных двигателей.

**Ключевые слова:** компьютерная система подачи топлива судового дизеля, привод исполнительных механизмов, пьезопреобразователи.

## SUMMARY

**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 paper analyzes the current state of computerized fuel injection control systems, which showed that a further increase in the efficiency of such control systems is possible by improving the actuators, by eliminating the hydraulic drive. A further analysis of existing actuator types showed the futility of their further improvement in the design-technological direction. Showed the possibility of using piezoelectric drives as actuator in high-pressure fuel systems; noted drawbacks of piezoelectric transducers, which restrained the use as piezodrives on marine engines. Based on these circumstances, formulated the goals and objectives of the study, aimed at creating theoretical and practical provisions that will allow the development of high-pressure fuel system actuators piezoelectric drives.

The method of improving computerized marine diesel engine fuel injection control system by introducing actuators based on piezoelectric transducers, which make it possible to increase the fuel economy, was further developed.

For the first time, introduced models of the component designs of a computerized fuel injection control system based on actuator drive which based on piezoelectric stack, allowed to obtain large valve movements in the fuel injection control unit with the necessary effort and time of the transition.

For the first time, introduced models of the designs of components of a computerized fuel control system based on actuator drive which based on piezoelectric rotary engines which allowed to increase the movement of the valve in the control unit fuel supply. Their modeling and calculation of the main indicators was carried out.

The analysis of fuel injection computer control system components constructions models based on actuators which based on piezoelectric converters showed the oscillatory nature of the system, which negatively affects the system reliability, leads to a deviation of the fuel injection curve from a given type, and as a

result, to a decrease in efficiency. Based on these circumstances, the task is to develop methods for eliminating unwanted vibrations.

The further development of the fuel injection control unit spool positioning model due to the use of a fuzzy regulator, which made it possible to reduce internal oscillations of the system, thereby increasing the guaranteed safety of the fuel injection system.

The further of piezoelectric transducer models with feedback due to the first-time obtained circuit design and functional models of piezoelectric transducers stack with feedback, which made it possible to design fuel injection systems without internal oscillations of the system, that is, with increased reliability.

Designed and patented designs of actuators on the basis of piezoelectric stack and piezoelectric rotary engines. Experimental studies have been carried out.

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