

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЧОРНОМОРСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ПЕТРА МОГИЛИ

Лисенко Віктор Євгенович



УДК 681.587.72:004,3'144:621.4(045)

**КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНА СИСТЕМА ПОДАЧІ ГАЗУ В
СУДНОВИЙ ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОР ЗА ДОПОМОГОЮ
П'ЄЗОПЕРЕТВОРЮВАЧІВ**

05.13.05 – комп'ютерні системи та компоненти

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Миколаїв – 2020

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 технічної експлуатації
флоту.

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор
Мірошник Марина Анатоліївна,
Український державний університет
залізничного транспорту, м. Харків,
професор кафедри спеціалізованих
комп'ютерних систем;

кандидат технічних наук, доцент
Бондаренко Юлія Юріївна, Черкаський
державний технологічний університет,
завідувач кафедри приладобудування,
мехатроніки та комп'ютеризованих
технологій.

Захист відбудеться 29 травня 2020 р. о 14⁰⁰ 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 28 квітня 2020 року.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



Євген ДАВИДЕНКО

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Робота присвячена розробці методів та моделей покращення систем управління подачею газу в судновий дизель-генератор, за рахунок впровадження нових типів приводів виконавчих механізмів на базі п'єзоелектричних перетворювачів.

За останні 10 років суттєво змінилася ситуація навколо викидів шкідливих речовин в довкілля. Посилення вимог до екологічної безпеки судових дизелів у вигляді зниження норми викидів CO_x, NO_x, CH_x поставило перед розробниками комплекс проблем щодо зниження емісії відпрацьованих газів. Є декілька варіантів вирішення цієї проблеми: встановлення додаткового обладнання; застосування низькосірчастого палива та використання на відмінну від рідинного палива газу.

Встановлення спеціального обладнання (скрубєрів) – дуже висока ціна, яка розраховується мільйонами доларів США (4-7 млн). Перехід на низькосірчисте паливо призводить до росту ціни палива в розрахунку на час роботи в декілька раз, що в підсумку призводить до непередбачуваності ціноутворення перевезень. Використання альтернативного палива потребує наявності великих танків, в яких повинен зберігатися газ.

Тому найбільш перспективним є перехід на газ в дизелях (тип DF), якими оснащені судна-газовози (LNG, LPG). Крім того, при перевезенні скрапленого газу відбувається його випаровування з вантажних танків. Викид в довкілля цього газу наносить шкоди навколишньому середовищу. Тому стає актуальними утилізація цих випарів в судовому дизелі та роботи, що пов'язані з роботою системи подачі газу в судновий дизель, а саме розробка алгоритмів роботи системи, створення перетворювачів електричних сигналів в механічне переміщення клапану подачі газу.

Розвитком теорії і практики використання газу в судових дизелях займається фірма Wartsila тощо.

Одним з основних напрямків розвитку є комп'ютерна система управління та контролю подачі газу в дизель, до складу якої входять клапани подачі газу з електромагнітним соленоїдом SOGAV-250 від компанії Woodward, основними недоліками яких є залипання електромагнітного клапану, яке призводить до зносу пари клапан–сідло, а також зміни властивостей пружин, що обумовлено використанням електромагнітного перетворювача. Поліпшити характеристики (економічність, тобто кількість енергії, що витрачається на роботу паливної системи, вартість її обслуговування, надійність і гнучкість в управлінні фазами та законом подачі палива) можна за рахунок впровадження перетворювачів іншої природи, наприклад, п'єзоелектричних, розвитком теорії та практики яких 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., Джагупов Р. Г., Нікольський В. В., Бондаренко Ю. Ю., Оженко Є. М. та ін.

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.), принципів Транспортної стратегії України на період до 2030 року, зокрема, «Безпечний для суспільства, екологічно чистий та енергоефективний транспорт», «Підвищення рівня екологічної безпеки на транспорті» (розп. КМУ № 430-Р від 30.05.2018 р.) та планів виконання науково-дослідних робіт Національного університету «Одеської морської академії» за темою: «П'єзоелектричний привод впускного клапану двохпаливного ДВЗ» (№ ДР 0117U002744), в розробці яких автор брав участь як відповідальний виконавець.

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційного дослідження є підвищення безпеки судноплавства шляхом розробки методів, моделей та засобів покращення системи подачі газу в судновий дизель-генератор за рахунок застосування п'єзоелектричних перетворювачів.

В роботі поставлені та вирішені такі задачі:

– аналіз науково-технічного рівня сучасних комп'ютерно-інтегрованих систем та їх складових компонентів, оцінка переваг та недоліків застосування вторинних перетворювачів; аналіз відомих рішень існуючих клапанів подачі газу і їх ефективності, обґрунтування на цій основі завдання дослідження та позначення шляхів їх вирішення;

– розробка методу удосконалення комп'ютерно-інтегрованої системи подачі газу в судновий дизель-генератор шляхом впровадження приводу виконавчих механізмів на базі п'єзоперетворювачів;

– розробка моделей п'єзоперетворювачів на основі складальних стовпів та лінійних двигунів, які входять до складу клапану подачі газу комп'ютерно-інтегрованої системи подачі палива в судновий дизель-генератор;

– розробка конструкцій клапану подачі газу з п'єзоперетворювачами та відповідних стендів для досліджень, проведення експериментальних досліджень розроблених пристроїв та систем.

Об'єкт дослідження – робочі процеси в комп'ютерно-інтегрованій системі подачі газу в судновий дизель-генератор.

Предмет дослідження – моделі та методи покращення комп'ютерно-інтегрованої системи подачі газу в судновий дизель-генератор.

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'єзоефекту – при дослідженні моделі конструкцій компонентів комп'ютерно-інтегрованої системи подачі газу в судновий дизель-генератор із застосуванням п'єзоелектричних роторних двигунів; теорії нечіткої логіки – при розробці

системи зменшення коливань клапану подачі газу суднового дизель-генератора з «нечітким» регулятором; функціонального, схемотехнічного і математичного моделювання – при розробці моделей п'єзоперетворювачів; 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, методу та засобів покращення комп'ютерно-інтегрованої системи подачі газу в судновий дизель-генератор на базі п'єзоелектричних перетворювачів, які дозволяють знизити аварійність і покращити роботу систем позиціонування клапану подачі газу. Відмінність запропонованих компонентів від існуючих електромагнітних, гідравлічних та пневматичних полягає в відсутності електромагнітного перетворювача, процеси в якому призводять до нескінченної коливальності та підвищення аварійності при експлуатації суднових дизель-генераторів, які працюють на декількох сортах палива.

При цьому, отримали *подальший* розвиток наступні наукові результати:

- метод удосконалення комп'ютерно-інтегрованої системи подачі газу в судновий дизель-генератор шляхом впровадження приводу виконавчого механізму на базі п'єзоелектричних перетворювачів, що дозволило збільшити економічність та роботоздатність паливної системи;

- модель п'єзоелектричного шару зі складального стовпа шляхом додавання додаткового виходу, який враховує механічний поступальний рух п'єзоперетворювачів, що дозволяє здійснювати дослідження механічної системи стовп–важіль–клапан при моделюванні роботи п'єзоприводу виконавчого механізму;

- моделі поліморфних п'єзоперетворювачів за рахунок представлення кожного мономорфного перетворювача розробленою субмоделлю п'єзоелектричного шару із врахуванням механічних поступальних рухів, що дозволяє проектувати п'єзоприводи виконавчих механізмів з необхідними технічними параметрами та характеристиками;

- модель лінійного п'єзоелектричного двигуна за рахунок застосування модернізованої моделі фрикційного контакту п'єзоприводу із формалізацією процесів, які відбуваються в п'єзоперетворювачі поступального руху, що дозволяє моделювати роботи п'єзоприводу виконавчого механізму з необхідним лінійним переміщення рухомої каретки п'єзодвигуна.

Практичне значення одержаних результатів.

Практична цінність роботи полягає в доведенні здобувачем наукових результатів до конкретних конструктивних рішень, що забезпечують покращення системи подачі газу в судновий дизель-генератор за рахунок застосування п'єзоелектричних перетворювачів. За результатами теоретичних і експериментальних досліджень розроблена комп'ютерно-інтегрована система подачі газу в судновий дизель-генератор на базі п'єзоелектричних перетворювачів, яка дозволила підвищити безаварійність роботи системи. Наведено практичні рекомендації щодо розрахунку, конструювання та експлуатації пропонованої системи.

Розроблено та запатентовано дві конструкції клапану подачі газу на базі п'єзоелектричного складального стовпа і лінійного п'єзоелектричного двигуна, що дозволило отримати великі пускові моменти 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 газу.

Розроблена бібліотека компонентів п'єзоелектричних перетворювачів для середовища електронного моделювання SimIntech.

Результати роботи використовуються в навчальному процесі Національного університету «Одеська морська академія» кафедри автоматизації дизельних і газотурбінних установок і кафедри технічної експлуатації флоту.

Особистий внесок здобувача. У дисертаційній роботі викладено авторський підхід до вирішення важливої наукової-технічної задачі – підвищення безпеки судноплавства шляхом розробки методів, моделей та засобів покращення системи подачі газу в судновий дизель-генератор, а саме: створення моделей клапану подачі газу, які входять до складу комп'ютерно-інтегрованої системи подачі газу в судновий дизель-генератор на базі п'єзоелектричних перетворювачів. Теоретичні визначення, які подані в роботі та виносяться на захист, одержані автором особисто й викладені в його наукових працях. Із наукових праць, що написані у співавторстві, в дисертації використано тільки ідеї та концепції, конструктивні рішення, які є результатом самостійного дослідження здобувача. Особистий внесок автора у колективних наукових працях конкретизовано у переліку опублікованих праць.

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертаційної роботи доповідалися і обговорювалися на міжнародних науково-технічних конференціях:

«Суднові комп'ютерно-інтегровані технології» (НУ «ОМА», Одеса, 2016, 2018 рр.);

«Суднові енергетичні установки: експлуатація і ремонт» (НУ «ОМА», Одеса, 2019 р.);

«Річковий та морський флот: експлуатація і ремонт» (НУ «ОМА», Одеса, 2018 р.);

«Інформаційні технології та комп'ютерне моделювання» (м. Івано-Франківськ, 2018, 2019 рр.);

«Автоматика – 2017» (Київ, 2017);

«Датчики, прилади та системи – 2019 (ДПС, 2019)» (Черкаси – Миколаїв – Херсон – Лазурне, 2019 рр.).

Публікації. Результати дисертаційного дослідження опубліковані в 16 наукових роботах. З них: 6 статей – у фахових наукових журналах, які затверджені МОН України та індексуються у наукометричній базі Index Scopus тощо, 7 праць – у збірниках матеріалів міжнародних та всеукраїнських науково-технічних конференцій, 2 патенти України на корисну модель, 1 звіт з НДР.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається із вступу, 4 розділів, висновків, списку використаної літератури зі 103 найменувань і додатків. Загальний обсяг становить 179 сторінок (з них 126 – основного тексту). У роботу входять також 76 рисунків та 7 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 аналіз роботи комп'ютерно-інтегрованої системи управління подачею палива (рис. 1) при утилізації випаровувань газу-метана, зокрема, на прикладі судна-газовоза LNG «FSRU Explorer» в судновому двопаливному дизель-генераторі VASA 12V32DF, який входить до складу головної електростанції. Електростанція налічує чотири двигуни HiMSEN (модель H35DF, 7 і 9 циліндрів, потужність 3360 і 4320 кВт) та Wärtsilä (VASA 12V32DF, 12 циліндрів, потужність 3850 кВт).

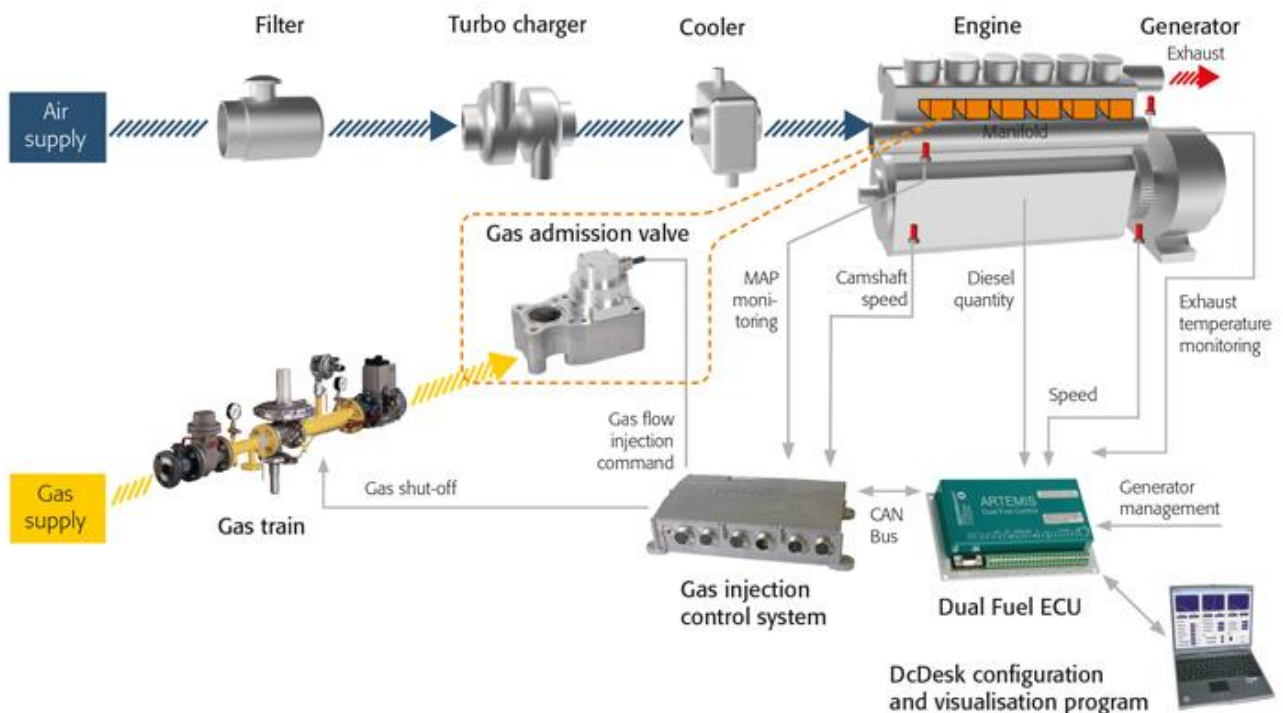


Рисунок 1 – Структурна схема комп'ютерно-інтегрованої системи подачі газу в судновий двопаливний дизель-генератор на прикладі VASA 12V32DF

В роботі системи подачі газу спостерігаються перебої, які пов'язані з роботою клапану подачі газу фірми Woodward SOGAV-250, оснащеного електромагнітним перетворювачем. В роботі клапану відбуваються не повне закривання або відкривання, що призводить до метанового ковзання та надмірного перепуску газу, які пов'язані з коливальністю процесів

електромагнітного поля в соленоїді. На рис. 2 наведені графіки поведінки клапану подачі газу в циліндрах 2, 5, 7. Еталоном є клапан № 5. У клапана № 2 спостерігається не повне відкриття, а у клапана № 7 – не повне закриття.

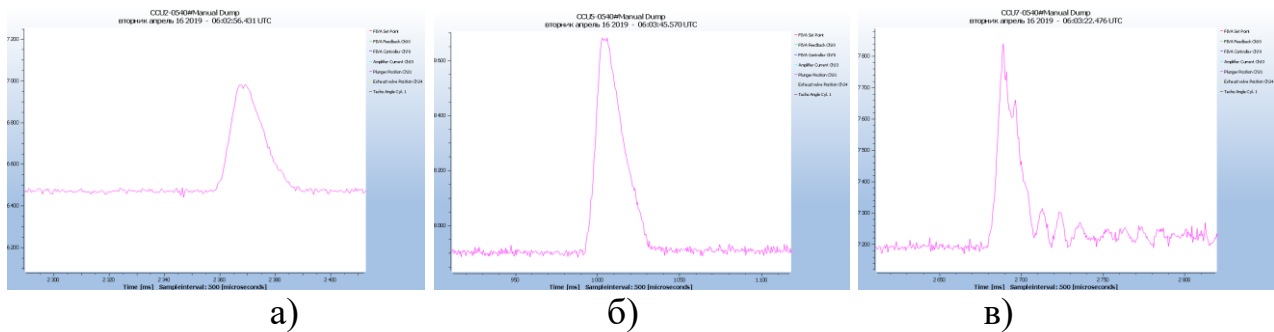


Рисунок 2 – Графік поведінки клапанів подачі газу в циліндр:
а – положення в циліндрі № 2; б – № 5; в – № 7

В роботі доведено, що сучасні електромагнітні соленоїди не дозволяють позбавитися цього недоліку. Було проведено аналіз сучасних технічних рішень, які обумовлені принципом «мінімізації», який пов'язаний з заміною одного великого клапану на декілька маленьких, а також з використанням «цифрової» рідини, коли один пропорційний клапан замінюється декількома бінарними клапанами. Ці рішення частково вирішують питання, оскільки головним перетворювачем залишається електромагнітний соленоїд.

В роботі запропоновано рішення, що пов'язане з застосуванням п'єзоелектричних перетворювачів. На теперішній час існують рішення на основі біморфних елементів, які були запропоновані в 80-90 х роках минулого століття, а саме перетворювачі: електропневматичний; п'єзоакустичний; електропневматичний «сопло–заслінка»; електропневматичний пристрій; плоский золотник на пружних підвісах. Їх основним недоліком є неможливість роботи при великих різницях тисків (плоский золотник на пружних підвісах), неповному закритті («сопло–заслінка») та ін.

Але з появою двигунів з електрогідравлічною системою подачі палива в малооберткових ДВЗ, починаючи з 2010 року, почалися роботи по їх вдосконаленню, метою яких було усунення гідравліки на пристрої з іншою фізичною природою, а саме п'єзоперетворювачі на основі складальних стовпів. В той же час відомі виробники Siemens і Bosh розробили насос форсунок для автомобільних дизельних високо оберткових двигунів на основі п'єзоелектричних складальних стовпів (перше покоління) та стовпів з мультиплікаторами (друге покоління, серія PPD 1.1).

Однак, дизель-генератори головної електростанції судна-газовозу відносяться до середньо оберткових двигунів. Розміри та особливості роботи клапанів подачі газу відрізняються від роботи насос-форсунок серії автомобільних ДВЗ.

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

У другому розділі наведено результати розробки моделей та методу покращення системи подачі газу в судновий дизель-генератор за рахунок застосування п'єзоелектричних перетворювачів.

Спочатку в роботі були сформульовані вимоги до електричної частини перетворювача клапану подачі газу: час до повного відкриття/закриття – 2 мс; ліміт току 10 А; ліміт напруги – 24 В; період надходження імпульсів керування – 78 мс; величина переміщення пластини клапану – 0,38-0,43 мм; максимальний тиск газового палива P1/продувного повітря P2 – 5/3 Бар; максимальна різниця тисків P1/P2 – 2 Бар; максимальна температура газового палива – 80°C; робоча температура газового палива – 5-45°C; робоча температура продувного повітря – 30-55°C.

Для побудови моделі складальних п'єзостовпів на початковому етапі була розроблена модель п'єзоелектричного шару зі складального стовпа, де за основу прийнята структурна схема, яка була запропонована Нікольським А.А. Відповідно до третього закону Ньютона, з урахуванням визначених іноземними вченими сил, які діють на клапан подачі газу при заміні соленоїду на гідравлічний сервопривід, було записано умову рівноваги сил, які прикладені до рухомої границі активної частини п'єзоелектричного шару:

$$F_Y = F_E - F_D - F_{ДИН} - F_C \pm F_{Cylinder} \pm F_{Mass} \pm F_{Air}, \quad (1)$$

де $F_Y = K_Y \Delta$ – зусилля пружної деформації ПР, Н; $F_E = d_{PI} Y S_0 E$ – зусилля в ПР, яке викликане прикладеним електричним полем, Н; F_C – статичне зусилля (в нашому випадку F_{Spring} – сила, що діє з боку блока пружин, який вижимає тарілки розпилу), Н; $F_D = K_D d\Delta/dt$ – зусилля, що демпфірує, у шарі, Н; $F_{ДИН} = m_{\Sigma} d_2 \Delta/dt_2$ – динамічне зусилля в шарі, яке пропорційне швидкості зсуву клапану і викликаними при цьому процесами дисипації енергії в ньому, Н; $K_Y = Y S_0 / l_0$ – коефіцієнт пружності ПП, Н/м; K_D – коефіцієнт внутрішнього демпфірування шару, кг/с; m_{Σ} – еквівалентна приведена сумарна маса рухомих частин, кг; $F_{Cylinder}$ – зусилля з боку газів, що утворюються в циліндрі під час поджигу суміші газу та пілотної порції дизельного палива, Н; F_{Mass} – сила тяжіння клапану (в нашому випадку з тарілчастим розпилювачем), Н; F_{Air} – зусилля повітря, яке надходить до циліндру, Н.

На підставі рівнянь складено структурну схему (рис. 3, а).

Згортання структурної схеми приводить до наступної передавальної функції шару, незалежно від типу поляризації і керованої від джерела е.р.с.:

$$\tilde{X}(p) = \frac{K_3}{R_{em} C_0 m_{\Sigma} p^3 + (m_{\Sigma} + R_{em} C_0 h) p^2 + (K_3 K_{PI} R_{em} + h + R_{em} C_0 g) p + g -} \rightarrow \\ \rightarrow \frac{-R_{em} C_0 (\pm F_{Cylinder}(p) \pm F_{Mass}(p) \pm F_{Air}(p))}{}, \quad (2)$$

де K_3 – коефіцієнт зворотного п'єзо ефекту; K_{PI} – коефіцієнт прямого п'єзо ефекту; $K_3 = K_{PI} = b \cdot Y_{11} \cdot d_{31}$; R_{em} – опір генератора вхідного сигналу; C_0 –

електрична ємність шару; m_{Σ} – приведена маса шару та клапану; g – коефіцієнт пружності; h – коефіцієнт демпфірування; $F_C(p)$ – сила попереднього навантаження з боку блока пружин, $F_{\text{Cylinder}}(p)$ – зусилля з боку газів, що утворюються в циліндрі під час поджигу суміші газу та пілотної порції дизельного палива, Н; $F_{\text{Mass}}(p)$ – сила тяжіння клапану (в нашому випадку з тарілчастим розпилювачем), Н; $F_{\text{Air}}(p)$ – зусилля повітря, яке надходить до циліндру, Н.

На рис. 3, в наведено структурну схему складального стовпа для $N_{\text{п'єзостовпа}} \geq 3 \div 5$.

На основі отриманих даних в роботі отримала подальший розвиток модель п'єзоперетворювача в пакеті програм схмотехнічного моделювання, а саме: модель п'єзоелектричного шару зі складального стовпа шляхом додавання додаткового виходу, який враховує механічний поступальний рух п'єзоперетворювачів, що дозволяє здійснювати дослідження механічної системи стовп–важіль–клапан при моделюванні роботи п'єзоприводу виконавчого механізму.

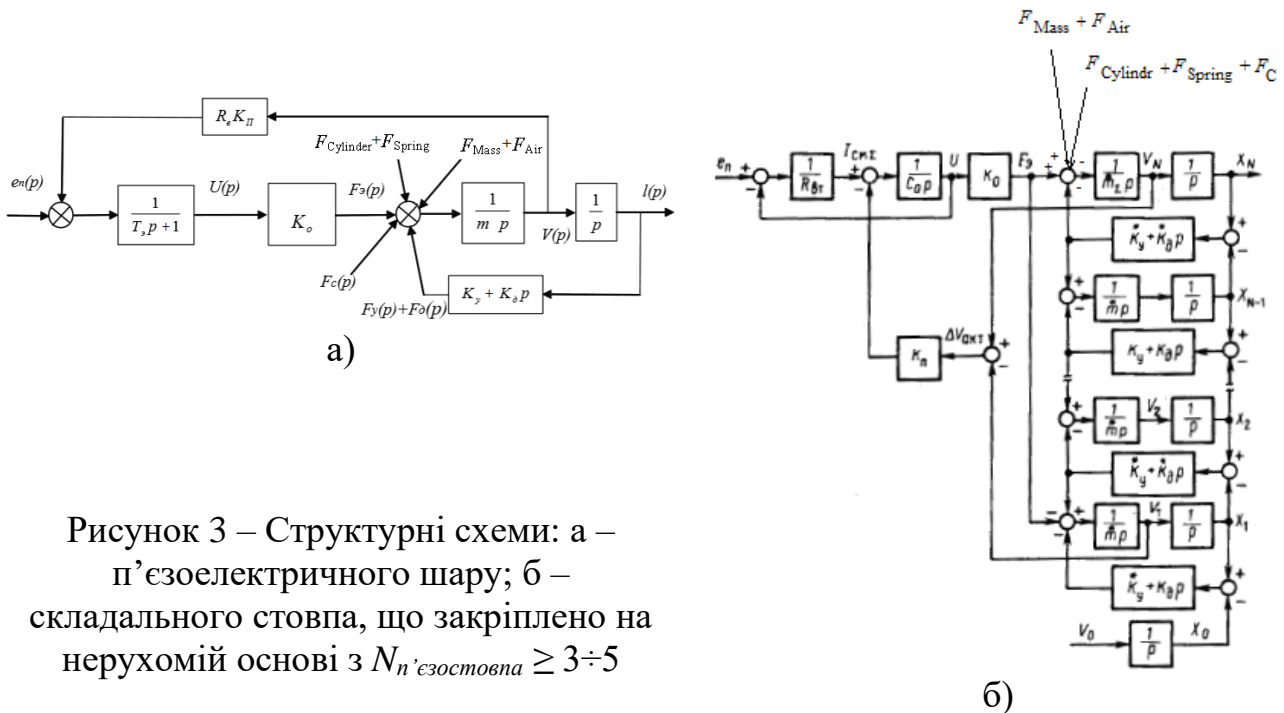


Рисунок 3 – Структурні схеми: а – п'єзоелектричного шару; б – складального стовпа, що закріплено на нерухомій основі з $N_{\text{п'єзостовпа}} \geq 3 \div 5$

На рис. 4, а представлений зовнішній вигляд моделі однієї п'єзоелектричної шайби (PiezoStack), а на рис. 4, б – її внутрішня структура.

На рис. 4, а з лівого боку розташовуються входи: U_{in} – вхідна напруга живлення; F_{cin} – сила попереднього навантаження – це сила, що діє на п'єзошайбу з боку блока пружин клапана подачі газу. З правого боку блоку моделі розташовано математичний вихід (L_i) переміщення «вільного кінця» шайби та механічний вихід, до якого приєднується блок клапан подачі газу.

Застосування цієї моделі в якості субмоделі окремого шару дозволяє досліджувати поліморфні моделі з великою кількістю п'єзоперетворювачів. Тобто запропоноване в роботі представлення кожного мономорфного

перетворювача розроблено субмоделлю п'єзоелектричного шару із врахуванням механічних поступальних рухів, дозволяє проєктувати п'єзоприводи виконавчих механізмів з необхідними технічними параметрами та характеристиками.

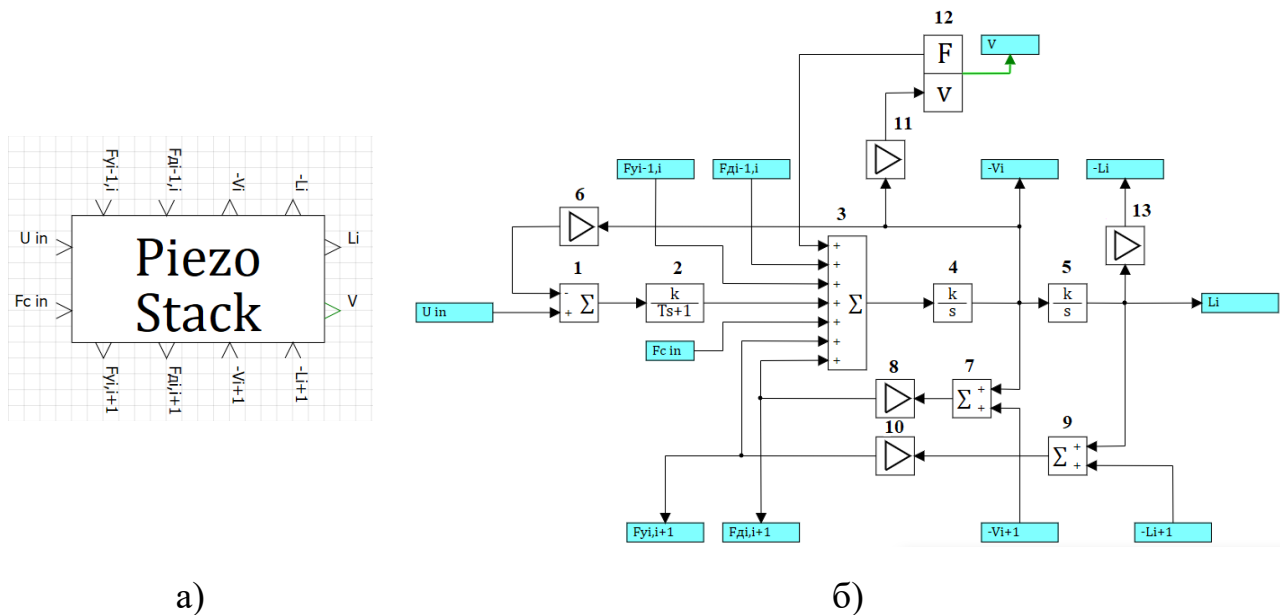


Рисунок 4 – Модернізована модель п'єзоелектричного шару з механічним виходом по швидкості: а – зовнішній вигляд; б – внутрішня схема модуля

На рис. 5 наведено скриншот в SimInTech, в бібліотеку компонентів якої інтегровано вкладинку Actuators, а також зображення запропонованих моделей.

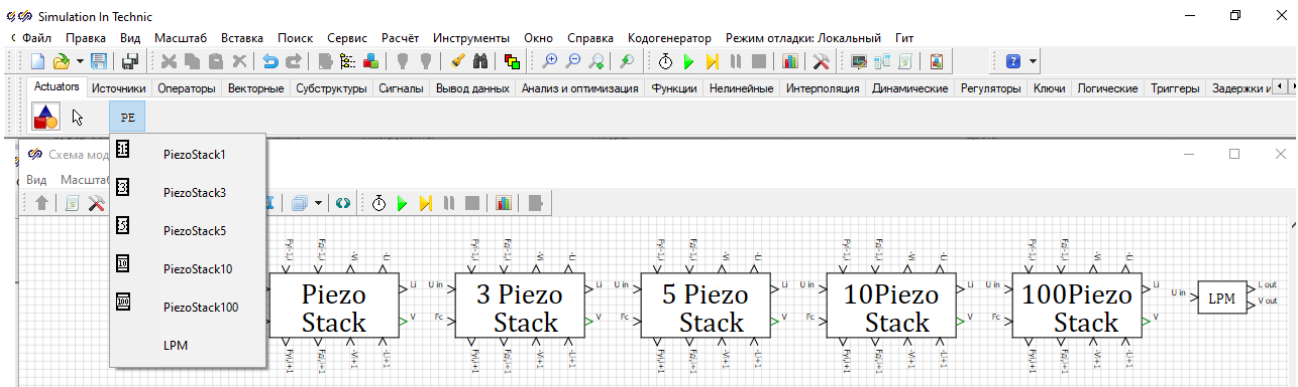


Рисунок 5 – Скриншот інтегрованої бібліотеки розроблених п'єзоелектричних перетворювачів

Зокрема, на рис. 6 зображені запропоновані моделі п'єзоперетворювачів з трьома та п'ятьма шарами, які розроблені шляхом застосування декількох однакових блоків.

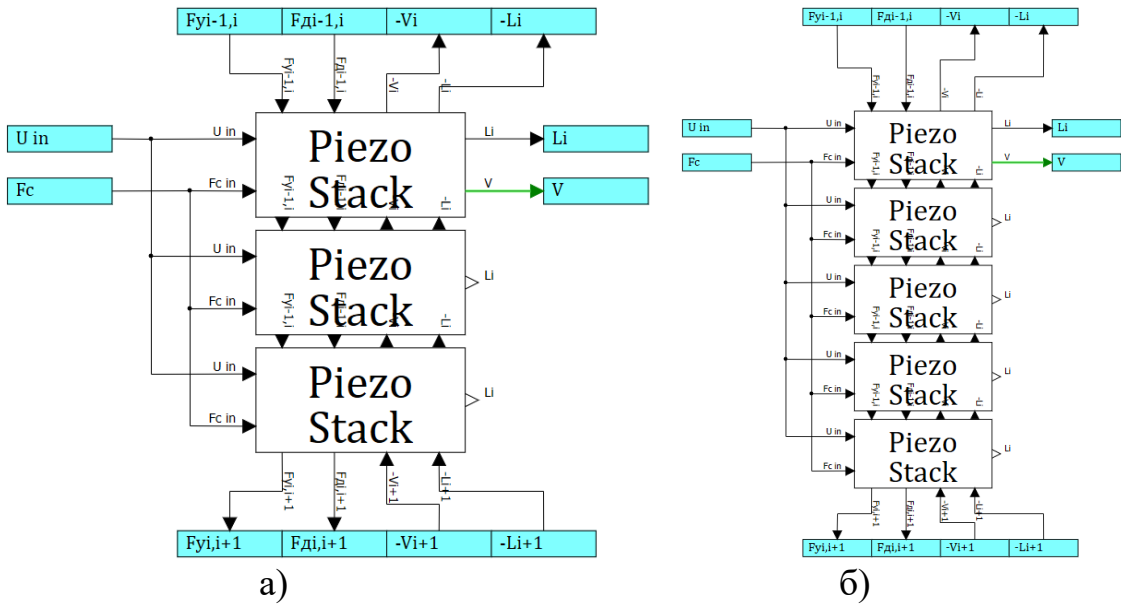


Рисунок 6 – Моделі п'єзоперетворювачів: а – 3 шари; б – 5 шарів

Другий спосіб, яким можна здійснити переміщення приводу виконавчого механізму на базі п'єзоперетворювача, що був розглянутий в роботі – є застосування лінійного п'єзодвигуна (ЛПД). Для розробки моделі ефективного застосування ЛПД в першу чергу в роботі була модернізована модель фрикційного контакту (ФК), яка увійшла до складу моделі лінійного п'єзоелектричного двигуна для моделювання в середовищі схемотехнічного проектування та представлена на рис. 7.

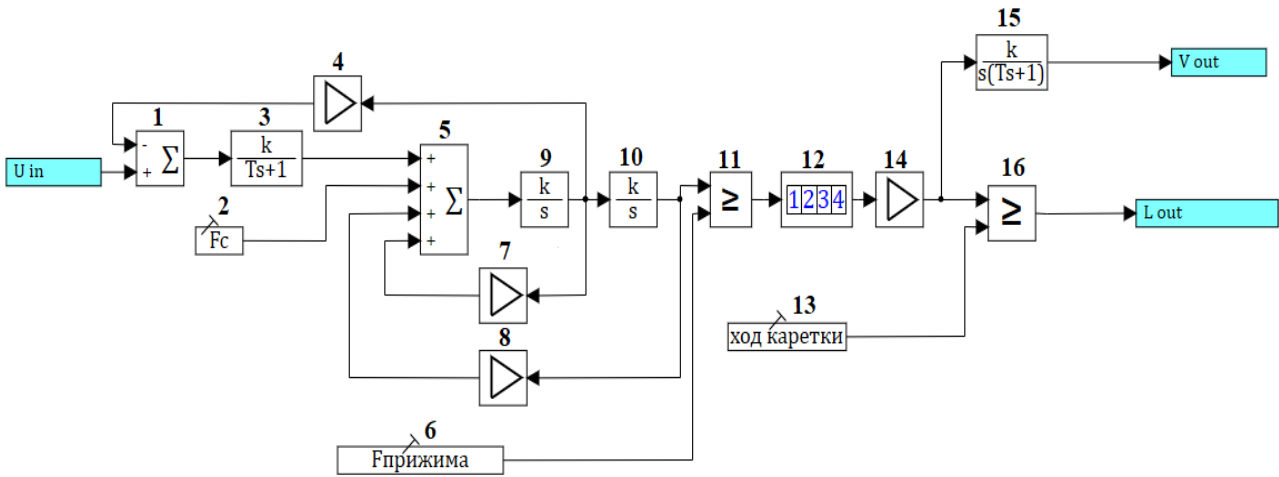


Рисунок 7 – Модель лінійного п'єзоелектричного двигуна

В моделі застосовані наступні блоки: 1, 5 – суматори; 2 – константа, яка відповідає за попереднє навантаження п'єзоелементу; 3 – інерційна ланка 1-го порядку; 4, 7, 8, 14 – підсилювачі; 6 – константа, яка відповідає силі притискання п'єзоелементу до каретки; 9, 10 – інтегратори; 11, 16 – елементи порівняння; 12 – лічильник імпульсів; 13 – константа, яка встановлює хід каретки; 15 – інерційно-інтегруюча ланка. На відміну від моделі фрикційного контакту (рис. 6), для отримання середньої швидкості застосовано замість інерційної ланки 1-го порядку інерційно-інтегруючу ланку.

В третьому розділі наведено результати досліджень отриманих моделей у попередньому розділі.

За результатами проведених досліджень впливу властивостей ПП і їх габаритних розмірів на основі керамік від відомих виробників PZT19, SP4, PIC255 складено таблицю 1, в якій символами ↓ та ↑ показані відповідно зменшення чи збільшення значення переміщення вільного кінця складального стовпа (Δ) та часу перехідного процесу (τ).

Таблиця 1 – Порівняльні показники впливу властивостей і розмірів ПП

Властивості		$Q_m \uparrow$	$K_p \uparrow$	$YE33 \uparrow$	$d \uparrow$	$l \uparrow$	$F_c \uparrow$
Реакція	Δ	–	↑	↓	↓	↑	↑
	τ	↓	↓	↓	↑	↑	↓

Аналіз результатів довів переваги кераміки PIC255, яку й було використано при моделюванні поведінки складальних стовпів.

На рис. 10 наведено результати моделювання поведінки складального стовпа на основі PIC255, кількість шарів якого дорівнює 100, при подачі сигналу управління «сходінка» та «меандру».

Аналіз поведінки показав, що в роботі стовпа спостерігаються затухаючі коливання. Для зменшення коливань було запропонований метод їх усунення за рахунок вводу в канал управління ПД та нечіткого регуляторів.

Для проведення дослідження було обрано складальний стовп моделі P-025.200, який виконаний з матеріалу PIC 151 з наступними параметрами: переміщення Δ – $300 \cdot 10^{-6}$ м; діаметр – 0,025 м; довжина – 0,244 м; зусилля – 16000 Н; електрична ємність C_0 – $0,8 \cdot 10^{-5}$ Ф; частота резонансу – 5000 Гц; маса стовпа дорівнює 0,93 кг.

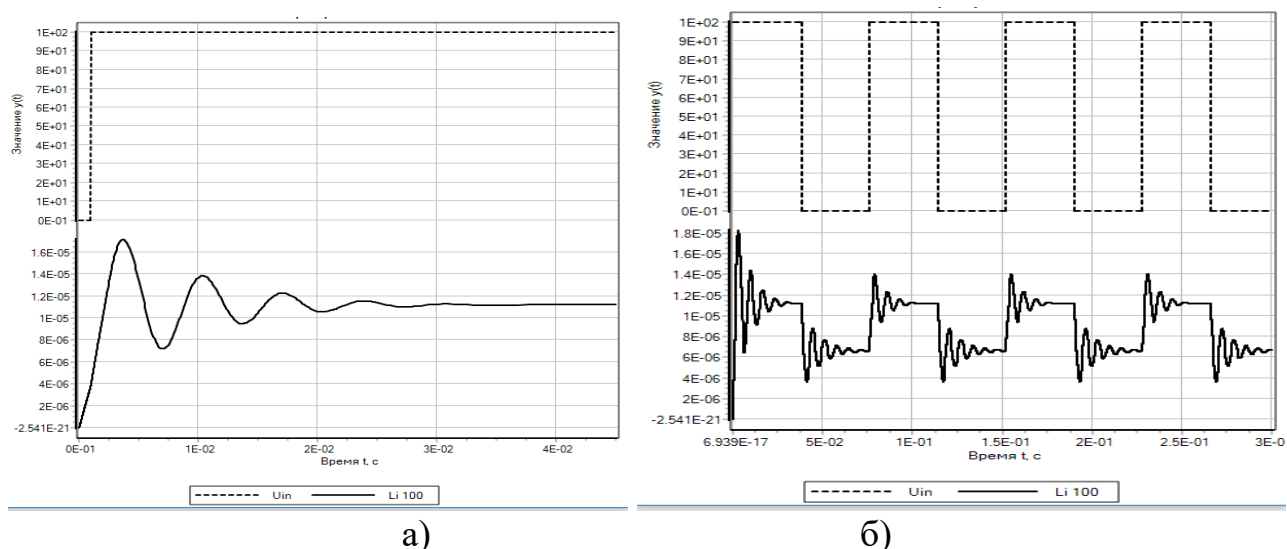


Рисунок 8 – Реакція складального стовпа зі 100 шарів на основі кераміки PIC255: а – на «сходінку»; б – «меандр»

Паралельне з'єднання складальних стовпів дозволяє отримати необхідне переміщення без застосування додаткових передач, що збільшує електричну

ємність системи в 2 рази. Передавальна функція складального стовпа після підстановки значень має наступний вигляд:

$$W_{\Delta}(p) = \frac{12,3}{7,47 \cdot 10^{-4} p^3 + 0,93 p^2 + 1,7 \cdot 10^5 p + 2,011 \cdot 10^8}.$$

Дослідження розробленої системи позиціонування з двома паралельно з'єднаними складальними стовпами, з ПІД- і нечітким регулятором було проведено в середовищі електронного моделювання Simulink, результати якого наведені на рис. 9, що підтвердило можливість її застосування у роботі клапану подачі газу в судновий дизель-генератор.

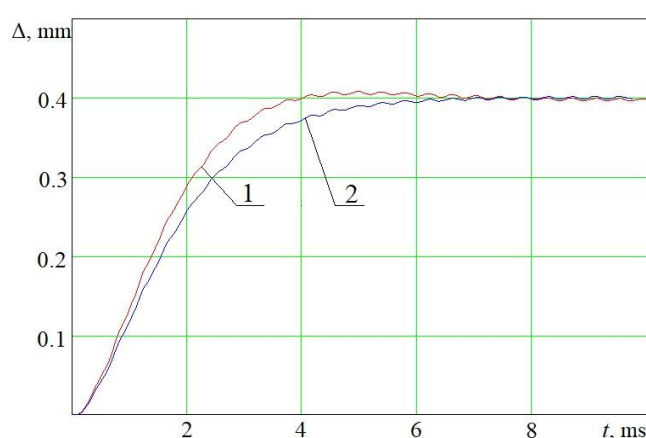


Рисунок 9 – Переміщення тарілки клапану подачі газу при ступінчастій зміні завдання для системи управління: 1 – з ПІД-регулятором; 2 – з нечітким регулятором

При моделюванні стовпа при подачі сигналу управління в вигляді «меандр» встановлено, що кінець стовпа не повертається в початковий стан (рис. 10, а), а при подачі двополярного сигналу управління (рис. 10, б) повертається в початковий стан. Проте в цьому випадку може відбутися руйнування конструкції.

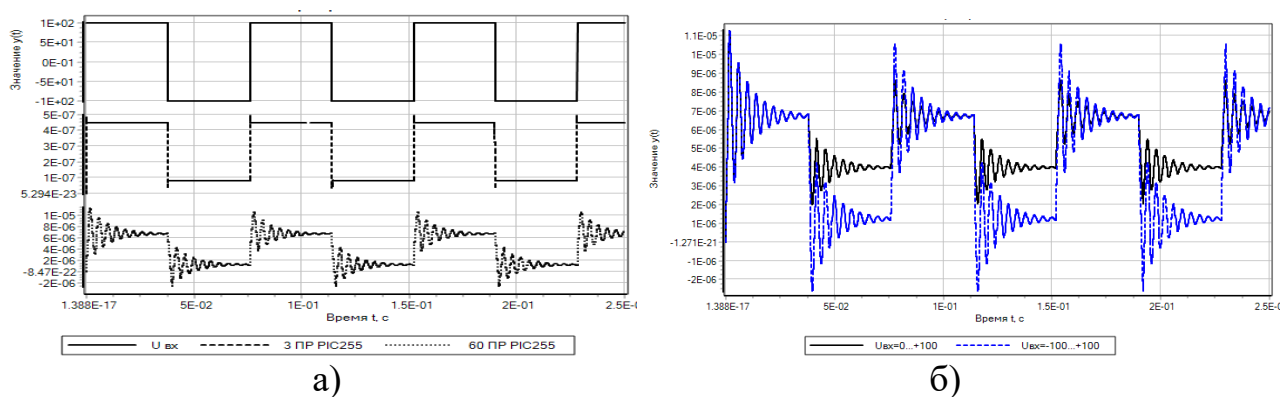




Рисунок 10 – Дослідження переміщення складальних стовпів при однополярній (а) та двополярній (б) напрузі сигналу управління

Надалі, нами було проведено дослідження складальних стовпів з механічним навантаженням: важіль та механічний елемент поступального руху.

Блок  реалізує розрахунок важеля в узагальненій формі. Блок  моделює механічний елемент поступального руху, на який діють сила інерції, позиційна сила, сила в'язкого тертя і сила сухого тертя.

На рис. 11, а зображено модель одного п'єзоелектричного шару та складальних стовпів із трьох, п'яти, десяти та ста шарів, до яких приєднано важелі з блоками поступового руху. На рис. 11, б наведено результати моделювання.

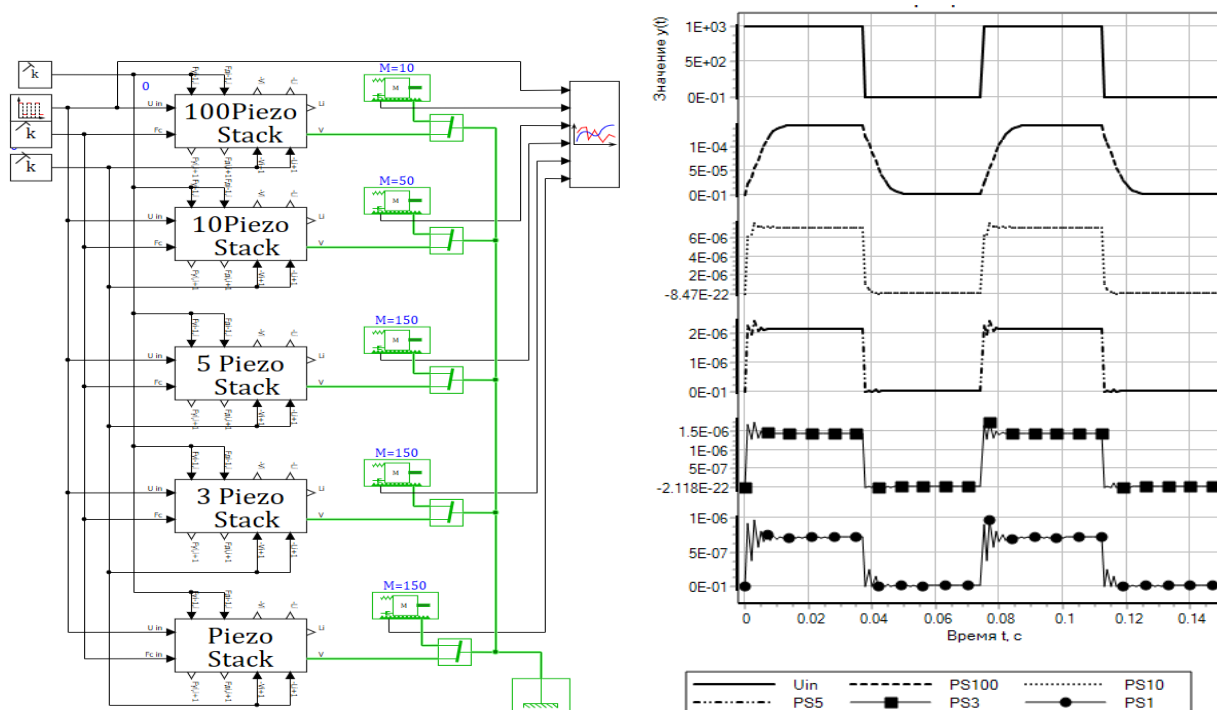


Рисунок 11 – Модель складальних стовпів з механічними важелем та елементом поступового руху (а), результат моделювання (б)

Аналіз результатів довів, що при збільшенні кількості п'єзоелектричних шарів зменшується коливальність. Це пояснюється дією сил, які характеризують роботу важеля та блоку поступового руху. Однак, при збільшенні затягуються фронти механічної реакції.

Крім того, було проведено дослідження поведінки складального стовпа зі 100 шарів при зміні навантаження, а саме ваги елемента поступального руху. Складальний стовп навантажується важелем, до якого під'єднаний елемент поступального руху. На рис. 12, а наведені результати моделювання.

Аналіз результатів довів, що при збільшенні ваги елемента поступального руху до 200 кг при навантаженні стовпа зі 100 шарів на основі кераміки PIC255 розмірами $d=0,01$ м і $l=0,001$ м спостерігається невелика коливальність в увімкненому стані, а вже при вазі 500 кг складальний стовп не в змозі зрушитися з місця.

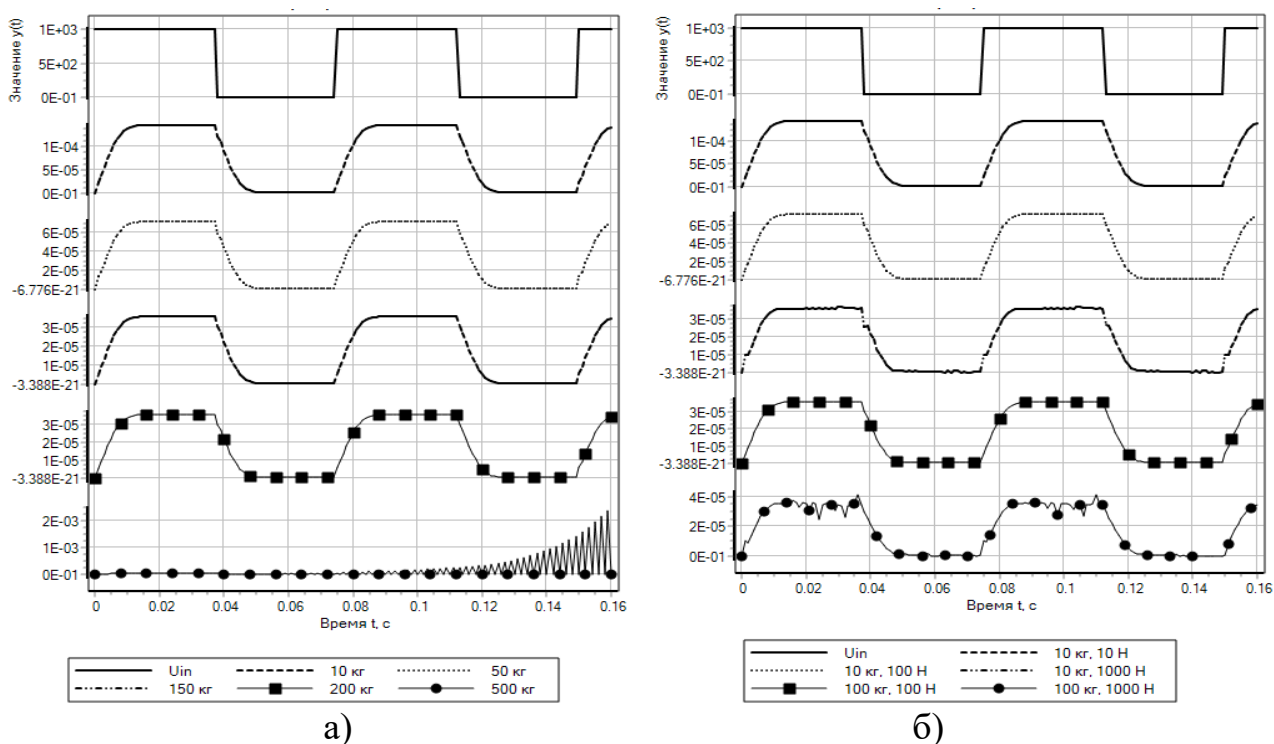


Рисунок 12 – Результат моделювання системи стовп–важіль–клапан при різних значеннях ваги (а) і при зміні властивостей важеля (б)

Наступне дослідження було проведено з метою визначення впливу важеля на роботу системи стовп–важіль–клапан (елемент поступального руху). На рис. 12, б наведено результати моделювання.

В результаті аналізу встановлено, що при збільшенні ваги важеля з 10 до 100 кг не відбувається змін в роботі стовпа, але при зміні зусилля страгування від 100 до 1000 Н спостерігається коливальність, яка призводить або до неповного відкриття, або неповного закриття клапану.

Тому, можливо зробити висновок, що для обраного стовпа зі 100 шайб кераміки PIC255 максимальне навантаження становить 100 кг при зусиллі страгування важеля до 100 Н та його вазі 10 кг.

Слід зазначити, що для того, щоб зменшити затягування фронтів можливе використання стовпів з диференціальною конструкцією. Однак, це призведе до значного підвищення габаритних розмірів конструкції.

Для зменшення конструктивних габаритів, а саме кількості п'єзоелектричних шарів можливе використання «цифрових» технологій в поєднанні з принципом мінімізації.

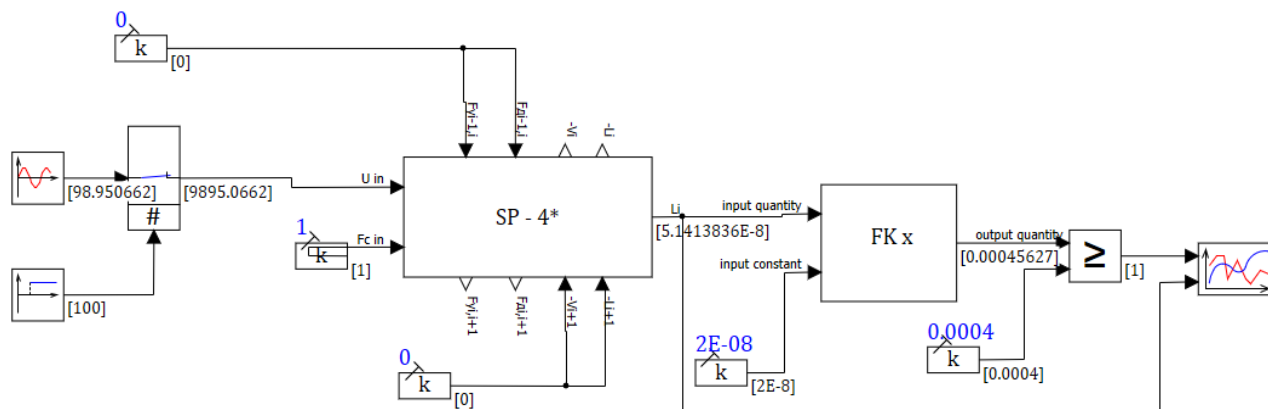
Але суттєвого зменшення коливальності та часу вмикання / вимикання можливе при застосуванні лінійних п'єзоелектричних двигунів.

Тому в роботі було здійснено моделювання поведінки пари ЛПД – клапан, модель якого наведено на рис. 13, а.

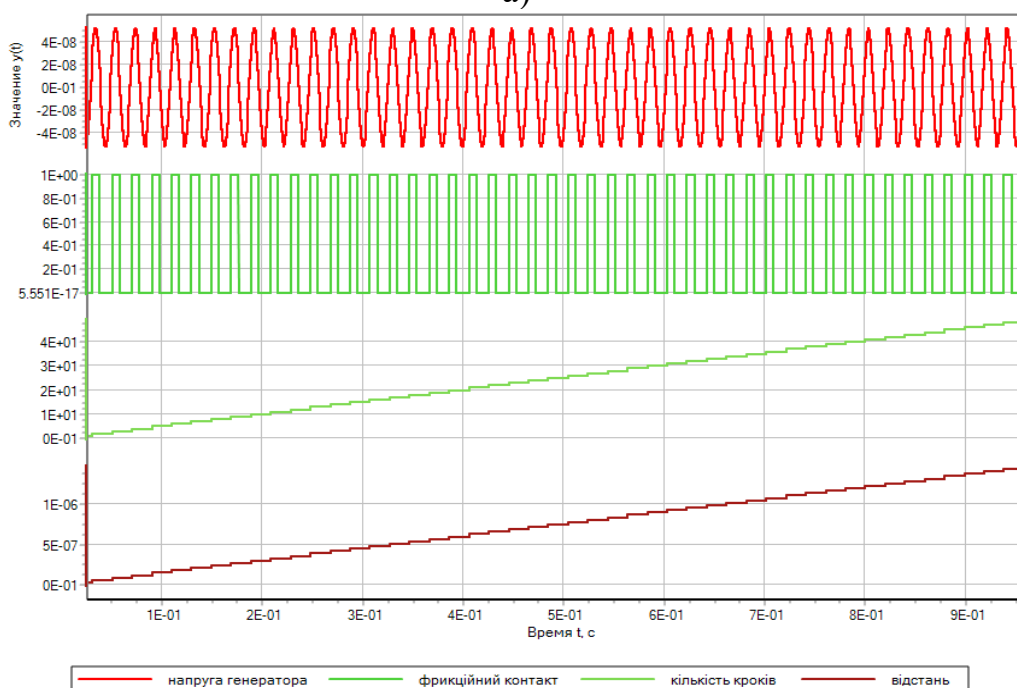
За прототип було обраний ЛПД LPM-5, який розвиває зусилля 2 Н. На рис. 13, б наведені результати моделювання роботи субмоделі осцилятора та фрикційного контакту, які довели можливість використання ЛПД при роботі клапану подачі газу.

Однак, у реальності потужності одного такого ЛПД не вистачає для

подолання супротиву блоку пружин. Отже – потрібно збільшувати потужність ЛПД, як виняток, за рахунок паралельного вмикання декількох ЛПД. В роботі наведено модель з шести ЛПД (субмоделі осциляторів ПР1-ПР2 і фрикційних контактів ФК1-ФК6) із розрахунку, що на один рівень має припадати зусилля опору 10 Н. Вхідна напруга живлення осцилятора мала наступні параметри: частота – 120 кГц (збільшена відносно стандартної для даного типу двигуна); амплітуда – 100 В. Це дозволило збільшити зусилля, що розвивається одним осцилятором до 2,23 Н, та зменшити кількість двигунів.



а)



б)

Рисунок 13 – Модель ЛПД (а) та результати моделювання роботи осцилятору і субмоделі фрикційного контакту (б)

У **четвертому розділі** описані розроблені конструкції клапанів подачі газу з ПП на складальних стовпах та ЛПД. Представлено макет комп'ютерно-інтегрованої системи подачі газу Брауна до аварійного дизель-генератору.

На рис. 14 наведено конструкції клапану подачі газу, на які отримано патенти України на корисну модель.

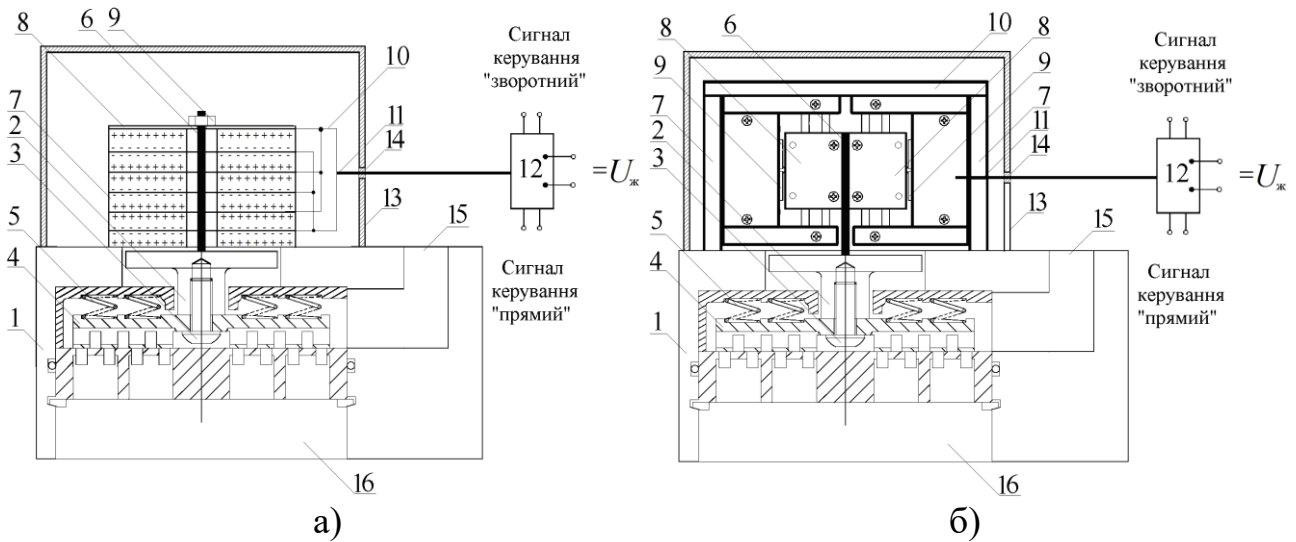


Рисунок 14 – Конструкція клапану подачі газу з п'єзоперетворювачем:
 а – зі складального стовпа п'єзоелементів (патент України на корисну модель № 133724); б – з ЛПД (патент України на корисну модель № 124102)

На рис. 15, а наведено діючий макет, який створений на кафедрі технічної експлуатації флоту національного університету «Одеська морська академія» на базі аварійного дизель-генератору John Deere. На рис. 15 б наведено установку по видобутку газу на основі електролізера. На рис. 15, в – макет клапану подачі газу на основі ЛПД LPM-5.

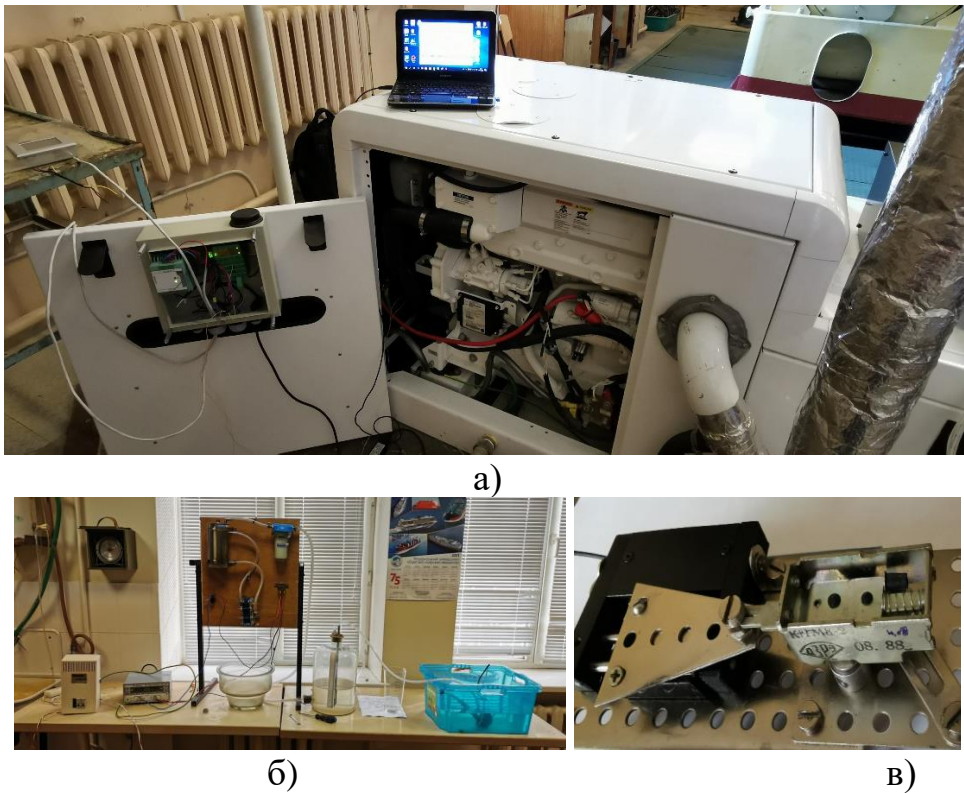


Рисунок 15 – Зовнішній вигляд установки:
 а – макет на базі аварійного дизель-генератору John Deere; б – установка по видобутку газу на основі електролізера; в – макет клапану подачі газу на основі ЛПД LPM-5

Для реєстрації часу перемикання клапану було використано контактну пару, хід якої було скоректовано до 0,4 мм. Час спрацьовування склав 1,9-2.01 мс. Це дозволило стверджувати, що поставлена в роботі мета досягнута.

У **додатках** наведено акти впровадження результатів дисертаційної роботи, отримані патенти, довідникові данні виробників п'єзокераміки та пристроїв, перелік публікацій за темою дисертації.

ВИСНОВКИ

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

В 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.

В роботі отримані наступні основні наукові та практичні результати.

1. Проведено аналіз сучасного стану комп'ютерно-інтегрованої системи управління подачею палива в судновий двопаливний дизель-генератор судна-газовоза LNG при утилізації СН_x, який показав, що подальше підвищення ефективності таких систем можливе за рахунок удосконалення клапану подачі газу шляхом виключення електромагнітного соленоїду. Проведений подальший аналіз існуючих типів перетворювачів показав безперспективність їх подальшого вдосконалення в конструкторсько-технологічному напрямі. При цьому в роботі була показана можливість використання вторинних п'єзоелектричних перетворювачів для клапану подачі газу в судновий двопаливний дизель-генератор. Виходячи із зазначених обставин, сформульовано мету та задачі дослідження, які спрямовані на створення теоретичних та практичних положень, що дозволять розробляти п'єзоелектричні перетворювачі для двопаливних систем.

2. За рахунок впровадження запропонованих п'єзоелектричних перетворювачів для клапану подачі газу в судновий двопаливний дизель-генератор дістало подальшого розвитку метод удосконалення комп'ютерно-інтегрованої системи управління подачею палива, що дозволило збільшити роботоздатність паливної системи.

3. Отримали подальший розвиток модель п'єзоелектричного шару зі складального стовпа шляхом додавання додаткового виходу, який враховує механічний поступальний рух п'єзоперетворювачів, а також моделі поліморфних п'єзоперетворювачів за рахунок представлення кожного мономорфного перетворювача розробленою субмоделлю п'єзоелектричного шару. Все це дозволяє проєктувати п'єзоприводи виконавчих механізмів з необхідними технічними параметрами та характеристиками, а також здійснювати дослідження механічної системи стовп–важіль–клапан при моделюванні роботи п'єзоприводу.

4. Отримала подальшого розвитку модель лінійного п'єзоелектричного двигуна за рахунок застосування модернізованої моделі фрикційного контакту

п'єзоприводу із формалізацією процесів, які відбуваються в п'єзоперетворювачі поступального руху. Така модель дозволяє моделювати роботи п'єзоприводу виконавчого механізму з необхідним лінійним переміщення рухомої каретки п'єзодвигуна.

5. В результаті аналізу моделей системи подачею палива на основі п'єзоперетворювача клапану подачі газу виявлено коливальний характер системи, яка, хоч і нижча за коливання у електромагнітного соленоїда, проте негативно позначається на надійності компонентів системи та призводить до відхилення закону подачі палива від заданого виду, і як наслідок, до зниження роботоздатності. Для усунення таких коливань запропоновано використання ПД- та нечіткого регулятора. Відповідні дослідження підтвердили можливість їх застосування у роботі клапану подачі газу в судновий дизель-генератор

6. Розроблено бібліотеку п'єзоперетворювачів для середі електронного моделювання SimIntech (Безлімітна ліцензія. Організація: НУ «ОМА». Серійний номер: D63B30FDA70), що дозволило проводити моделювання не тільки з математичними, а й з механічними моделями.

7. Розроблено та запатентовано конструкції клапанів подачі газу на основі п'єзоелектричних складальних стовпів та лінійних п'єзоелектричних двигунів, проведено експериментальні дослідження.

8. В результаті апаратної та програмної реалізації розроблених теоретичних положень створено макет комп'ютерно-інтегрованої системи подачі газу в судновий двопаливний дизель-генератор на основі аварійного дизель-генератору John Deere, PLC ILC 150 GSM/GPRS та п'єзодвигуна LPM-5, дослідження роботи якого підтвердило можливість застосування п'єзоперетворювачів для клапану подачі газу.

9. Здійснено впровадження результатів дисертаційного дослідження в навчальному процесі Національного університету «Одеська морська академія» кафедри автоматизації дизельних і газотурбінних установок і кафедри технічної експлуатації флоту.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці в спеціалізованих виданнях з переліком наукометричних баз, де вони проіндексовані:

1. Нікольський В. В., Лисенко В. Є., Нікольський М. В. Використання п'єзоприводу для клапана подачі газу двохпаливного двигуна внутрішнього згоряння // Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сб. – 2017. – Вып. 23. Одесса: НУ "ОМА". – С. 65–69; **внесок автора:** сформульовані вимоги до перетворювачів клапану подачі газу та запропоновано використання п'єзоелектричних складальних стовпів.

2. Нікольський В. В. Использование пьезопривода в судовой энергетике / В. В. Никольский, Е. М. Оженко, В. Е. Лысенко, М. В. Никольский, К. Ю. Бережной // Наукові праці ЧДУ ім. Петра Могили. – Серія: «Комп'ютерні технології». – Вип. 295. – Т. 307. – Миколаїв, 2017. – С. 82–91; **внесок автора:** запропоновано конструктивне рішення клапану подачі газу з

п'єзоперетворювачами та проведено моделювання в середовищі електронного моделювання Simulink; **база(и):** Index Copernicus, Ulrich's Periodical Directory.

3. Нікольський В. В., Лисенко В. Є., Нікольський М. В. Патент на корисну модель, Клапан подачі газу з п'єзоприводом. – № 124102; Заява U2017 08811, від 04.09.2017. Опубл. 26.03.2018, Бюл. № 6; **внесок автора:** запропонована конструкція клапану подачі газу з п'єзоелектричним перетворювачем на основі лінійного двигуна.

4. Нікольський В. В., Бережной К. Ю., Нікольський М. В., Лисенко В. Є., Блошенко О. О. Алгоритм роботи та програмне забезпечення реометру з п'єзоелектричним перетворювачем // Наукові праці ЧДУ ім. Петра Могили. – Серія: «Комп'ютерні технології». – Вип. 296. – Т. 308. – Миколаїв, 2017. – С. 131–138; **внесок автора:** брав у частку у розробці фрагменту функціональної схеми блока Main для управління лінійним п'єзодвигуном; **база(и):** Index Copernicus, Ulrich's Periodical Directory, Google Scholar.

5. Нікольський В. В., Нікольський М. В., Лисенко В. Є. Модель клапану подачі газу суднового дизеля з лінійним п'єзоелектричним двигуном / Наукові праці ЧДУ ім. Петра Могили. – Серія: «Комп'ютерні технології». – Вип. 305. – Т. 317. – Миколаїв, 2018. – С. 102–106; **внесок автора:** створено субмодель п'єзоперетворювача на основі лінійного двигуна в середовищі електронного моделювання SimIntech та проведено дослідження режимів його роботи; **база(и):** Index Copernicus, Ulrich's Periodical Directory, Google Scholar.

6. Нікольський В. В., Лисенко В. Є., Нікольський М. В. Патент на корисну модель, Клапан подачі газу зі складальним стовпом п'єзоелементів. – № 133724; Заява U201809785, від 01.10.2018. Опубл. 25.04.2019, Бюл. № 8; **внесок автора:** запропонована конструкція клапану подачі газу з п'єзоелектричним перетворювачем на основі складального стовпа.

7. Нікольський В. В., Нікольський М. В., Лисенко В. Є. Модель п'єзоелектричного преобразователя клапана подачі газу в судовій дизель-генератор // Вісник Черкаського державного технологічного університету: технічні науки. – Черкаси: ЧДТУ, 2019. – №3. – С. 25–30; **внесок автора:** створено субмодель п'єзоперетворювача на основі складального стовпа в середовищі електронного моделювання SimIntech та проведено дослідження режимів його роботи.

Опубліковані праці апробаційного характеру:

8. Нікольський В. В., Оженко Є. М., Лисенко В. Є., Нікольський М. В. Патент на корисну модель, МПК (2013.01) B63B 17/00 Судновий дизель з п'єзогенератором. – № 78425; Опубл. 25.03.2013, Бюл. № 6; **внесок автора:** конструкція п'єзоперетворювача, який вмонтовується в клапанну кришку суднового головного двигуна.

9. Нікольський В. В., Оженко Є. М., Лисенко В. Є., Нікольський М. В. Оценка возможности применения пьезогенератора в составе судового дизеля // Судовые энергетические установки: научн.-техн. сб. – 2013. № 30. – Одесса: ОНМА. – С. 92–97; **внесок автора:** проводив дослідження п'єзоперетворювача, який було вмонтовано в кришку компресора повітря.

10. Никольский В. В., Лысенко В. Е., Никольский М. В. Пьезоэлектрический привод впускного клапана двухтопливного двигателя внутреннего сгорания // XXIV Міжнародна конференція з автоматичного управління, м. Київ, Україна, 13-15 вересня 2017 року: тези конференції. Київ. 2017. – С. 223; **внесок автора:** сформульовано вимоги до електричної частини клапану подачі газу та запропоновано використання п'єзоелектричних перетворювачів.

11. Лысенко В. Е., Никольский В. В. Модель клапана подачи газа с пьезоэлектрическим актуатором // Матеріали науково-технічної конференції «Річковий та морський флот: експлуатація і ремонт», 22.03.2018–23.03.2018. – Одеса: НУ «ОМА», 2018. – С. 245–246; **внесок автора:** запропонував конструкції п'єзоперетворювачів, які здійснюють відсіч подачі газу при знеструмленні судна.

12. Nikolskyi V. Fuzzy logic positioning system of ship's diesel generators actuating mechanisms // Vitalii Nikolskyi, Yevgen Ozhenko, Kyriilo Bereznyi, Viktor Lisenko // Інформаційні технології та комп'ютерне моделювання; матеріали статей Міжнародної науково-практичної конференції, м. Івано-Франківськ, 14-18 травня 2018 року. – Івано-Франківськ: 2018 – С. 211–215; **внесок автора:** дослідження моделі п'єзоелектричного складального стовпа в середовищі електронного моделювання Simulink при застосуванні ПД та Fuzzy регуляторів.

13. Нікольський В. В., Нікольський М. В., Лисенко В. Є. Моделювання п'єзоелектричного приводу клапану подачі газу суднового дизеля в Сімінтек // Інформаційні технології та комп'ютерне моделювання; матеріали статей Міжнародної науково-практичної конференції, м. Івано-Франківськ, 20-25 травня 2019 року. – Івано-Франківськ: 2019 – С. 225–228; **внесок автора:** вдосконалено субмодель п'єзоперетворювача на основі складального стовпа з 3-х шарів в середовищі електронного моделювання SimIntech та проведено його дослідження.

14. Никольский В. В., Лысенко В. Е., Никольский М. В. Исследование влияния свойств и параметров пьезокерамики на перемещение актуатора в SIMINTECH. Тези VIII Міжнародної науково-технічної конференції «Датчики, прилади та системи – 2019» / Голов.ред. Ю.Ю. Бондаренко. – Черкаси: Видавець Третьяков О., 2019 – С. 64–69; **внесок автора:** проведено дослідження впливу параметрів п'єзоперетворювачів на їхні характеристики в середовищі електронного моделювання SimIntech.

15. Нікольський В. В., Лысенко В. Е., Никольский М. В. Конструктивные решения клапана подачи газа с пьезопреобразователями // Матеріали науково-технічної конференції «Суднові енергетичні установки: експлуатація і ремонт», 21.11.2019. – Одеса: НУ «ОМА», 2019. – С. 306–310; **внесок автора:** запропоновано конструкції клапанів з п'єзоелектричними перетворювачами на основі складальних стовпів і лінійних двигунів.

16. П'єзоелектричний привід впускного клапану двопаливного ДВЗ: звіт з НДР: ДР № 0117U002744 / кер. роботи В.В. Нікольський, відповідальний виконавець В. Є. Лисенко. К.: УКРНТЕІ, 2019 – 65 с.; **внесок автора:**

проведено аналіз сучасних і перспективних конструктивних рішень клапанів подачі газу в ДВЗ, запропоновано застосування п'єзоперетворювачів на основі складальних стовпів та лінійних двигунів для керування клапаном; вдосконалено моделі п'єзоперетворювачів, які використовуються для переміщення клапану; вдосконалені субмоделі п'єзоперетворювачів, які вмонтовані в бібліотеку середовища електронного моделювання SimIntech; запропоновано конструкції клапанів з п'єзоелектричними перетворювачами; розроблено діючий макет клапану в складі комп'ютерної системи дистанційного управління аварійним дизель-генератором, за допомогою якого проведено дослідження часу спрацьовування клапану.

АНОТАЦІЯ

Лисенко В. Є. Комп'ютерно-інтегрована система подачі газу в судновий дизель-генератор за допомогою п'єзоперетворювачів. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.05 – комп'ютерні системи та компоненти. – Національний університет «Одеська морська академія», 2020.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню актуальної наукової-технічної задачі – покращення системи подачі палива суднових дизелів, яка сприяє підвищенню безпеки судноплавства.

В 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.

Проведений аналіз сучасного стану комп'ютерно-інтегрованої системи управління подачею палива в судновий двопаливний дизель-генератор судна-газовоза LNG при утилізації СНх довів що одним з компонентів системи, що знижує роботу здатність є клапан подачі газу з електромагнітним соленоїдом. Існуючі типи перетворювачів не вирішують тих задач, так як вони все рівно мають електромагнітний перетворювач в своєму складі. Відомі рішення в області п'єзоелектричних перетворювачів не задовольняють вимогам до роботи з клапаном подачі газу в судновий двопаливний середньообертовий дизель-генератор.

Відомі рішення в автомобільній галузі та рішеннях для суднових малообертових двигунів підштовхнули до пошуку рішення з п'єзоелектричними перетворювачами.

Запропоновано впровадження п'єзоелектричних перетворювачів для клапану подачі газу в судновий двопаливний дизель-генератор на основі складальних стовпів та лінійних п'єзоелектричних двигунів.

Отримали подальший розвиток моделі конструкцій компонентів комп'ютерно-інтегрованої системи управління подачею палива на основі п'єзоперетворювачів із складальних стовпів, що дозволило отримати необхідні зусилля та час перемикання клапану подачі газу. Проведено їх моделювання та

розрахунок основних показників. В результаті аналізу моделей конструкцій компонентів комп'ютерно-інтегрованої системи управління подачею палива на основі п'єзоперетворювача клапану подачі газу виявлено коливальний характер системи, яка хоча й нижча, ніж у електромагнітного соленоїда, але все рівно присутня. Для усунення цієї коливальності було запропоновано використання нечіткого регулятора, що дозволило збільшити гарантовану безпеку системи подачі палива в цілому.

Запропоновані кінематичні та структурні схеми дозволили перейти до одновимірних моделей та провести подальший розвиток моделі фрикційного контакту, завдяки якому розроблено бібліотеку п'єзоперетворювачів для середнього електронного моделювання SimIntech. Подальший розвиток дістала субмодель п'єзоелектричного шару, що дозволило проводити моделювання не тільки з математичними моделями, а й з механічними.

На основі теоретичних рішень розроблені та запатентовані конструкції клапанів подачі газу на основі п'єзоелектричних складальних стовпів та лінійних п'єзоелектричних двигунів, проведено експериментальні дослідження.

В результаті апаратної та програмної реалізації розроблених теоретичних положень створено макет комп'ютерно-інтегрованої системи подачі газу в судновий двопаливний дизель-генератор на основі аварійного дизель-генератору John Deere, PLC ILC 150 GSM/GPRS та п'єзодвигуна LPM-5, дослідження роботи якого підтвердило можливість застосування п'єзоперетворювачів для клапану подачі газу.

Достовірність отриманих результатів підтверджена при електронному моделюванні в середовищі SimInTech control systems simulator (Безлімітна ліцензія. Організація: НУ «ОМА». Серійний номер: D63B30FDA70).

Здійснено впровадження результатів дисертаційного дослідження в навчальному процесі Національного університету «Одеська морська академія» кафедри автоматизації дизельних і газотурбінних установок і кафедри технічної експлуатації флоту

Ключові слова: судно-газовоз LNG; комп'ютерно-інтегрована система; п'єзоперетворювач; складальний стовп; лінійний п'єзоелектричний двигун; клапан подачі газу; SOGAV-250.

ABSTRACT

Lysenko V. Ye. Computer integrated system for fuel gas supply to marine diesel generator with a help 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”, 2020.

Dissertation research is dedicated to solve actual scientific task – increasing operability of computer integrated fuel gas supply system for marine diesel generator that is equipped with gas injection valves with electromagnetic actuators. Assumption is to replace an electromagnetic actuator with piezoelectric converters.

A number of regularities were observed as a result of research performed by the

author. Analysis of such regularities helps us to make a conclusion that goals of the dissertation research were reached. Correct and reliable methods were used in the research.

Analysis of the modern condition of the marine diesel generator computer integrated fuel gas supply system through piezoelectric actuators on the LNG vessels shows us that the most critical element of such system is gas admission valve with electromagnetic actuator. Types of actuators available nowadays cannot be used to increase reliability of the computer integrated system because electromagnetic actuator is also part of that system. Known piezoelectric actuators solutions cannot be used with marine dual fuel diesel engine.

There are solutions in automotive industry that inspired us to search for appropriate piezoelectric actuators solution for marine diesel engines.

We suggest to implement marine dual fuel diesel generator gas admission valve based on piezoelectric stacks and linear piezoelectric actuators.

The models of piezoelectric layer and friction block as parts of piezoelectric stacks and linear piezoelectric actuators were further developed. This allowed us to achieve required force and transient time. Modelling allowed us to calculate and evaluate basic piezoceramic properties. During modelling it was found out that the system has oscillatory nature. In order to decrease piezoelectric actuator oscillations PID and fuzzy logic governors can be used.

We proposed new kinematic schemes of gas admission valves. The models of piezoelectric layer and friction block as parts of piezoelectric stack pillars and linear piezoelectric actuators were further developed. This helped us to complete mathematical and mechanical modelling. Piezoelectric layers and linear piezoelectric actuator components library was created.

The new designs of gas admission valve with piezo stacks actuators and linear piezoelectric actuators were created based on theoretical researches. Experimental researches were also performed.

As a result of hardware and software researches a model of computer integrated fuel gas supply system of the emergency diesel generator was created. This model consists of hydrogen generation system HYPO 3.0, emergency diesel generator PowerTec 4045 DFM 70 (based on emergency diesel generator John Deer 4045 d, PLC ILC 150 GSM/GPRS) and piezoelectric actuator LPM-5. Such researches confirmed implementation possibility of piezoelectric actuators in gas admission valves.

Research results credibility was confirmed during electronic modelling in SimInTech software (unlimited license of National university "Odesa maritime academy" #D63B30FDA70).

Implementation of the dissertation research results in the educational process of the National University "Odessa Maritime Academy" by the following departments: Automation of Ships' Diesel and Gas Turbine Plants; Fleet Operation and Maintenance.

Keywords: LNG vessel-gas carrier; computer integrated system; a piezoelectric transducer; piezo stacks; linear piezoelectric motor; gas supply valve; SOGAV-250.