

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

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

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

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

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

Науковий керівник:
доктор технічних наук, професор В. В. Нікольський

Одеса – 2020

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.

Дисертаційне дослідження присвячене вирішенню актуальної науково-практичної задачі – підвищення роботоздатності комп'ютерно-інтегрованої системи подачі газу в судновий дизель-генератор, який обладнаний клапанами подачі газу з електромагнітним соленоїдом, шляхом застосування п'єзоелектричних перетворювачів.

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

У **першому розділі** проведено огляд літературних джерел та аналіз стану предмета дослідження в області комп'ютерно-інтегрованої системи управління подачею газу в судновий дизель-генератор від компанії Wartsila, зокрема клапану подачі газу Sogav-250. Встановлено, що подальше підвищення роботоздатності комп'ютерно-інтегрованої системи управління подачею палива, зокрема газу, можливо за рахунок удосконалення вторинного перетворювача, який здійснює перетворення електричного сигналу управління в механічне пересування клапану подачі газу.

Проведено аналіз сучасних типів електромагнітних, пневматичних та гідравлічних перетворювачів, а також можливих варіантів їх конструкцій з урахуванням принципу «мінімізації» та технології «цифрової» рідини. Доведено, що вдосконалення комп'ютерно-інтегрованої системи подачі газу в

дизель-генератор, а саме перетворювача клапану подачі, в конструкторсько-технологічному напрямі в даний час практично вичерпано.

Доведено можливість використання в якості вторинних перетворювачів п'єзоелектричних пристроїв, наведено їх переваги та недоліки, а також особливості їх застосування. Встановлено, що існуючі теоретичні та практичні положення стосовно пневмо-перетворювачів на основі біморфних п'єзоелементів не дозволяють ефективно застосовувати існуючі рішення для побудови п'єзоперетворювачів в складі клапану подачі газу в судновий дизель-генератор. Поряд з цим в автомобільній галузі застосовуються п'єзоперетворювачі на основі складальних стовпів в конструкціях паливних насо-форсунок для дизельних двигунів, які працюють на рідинному паливі. В той же час в Національному університеті «Одеська морська академія» проводилися роботи по впровадженню п'єзоперетворювачів в системи подачі палива в малообертові двигуни з електронно-гідравличною системою управління. Отже в роботі поставлено завдання розробити теоретичні та практичні положення, які дозволять розробляти п'єзоелектричні перетворювачі для управління клапаном подачі газу, який входить до складу комп'ютерно-інтегрованої системи управління подачі газу в судновий дизель-генератор.

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 методу покращення системи подачі газу в судновий дизель-генератор за рахунок застосування п'єзоелектричних перетворювачів.

В першу чергу визначені вимоги до електричної частини клапану подачі газу, який входить до складу комп'ютерно-інтегрованої системи подачі газу в судновий дизель-генератор та сформульовані вимоги до нових типів перетворювачів, які можливо запровадити для клапану подачі газу.

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 сервопривод, було записано умову рівноваги сил, які прикладені до рухомої границі активної частини п'єзоелектричного шару. На основі отриманих даних в роботі отримала подальший розвиток модель п'єзоперетворювача в пакеті програм схемотехнічного 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 моделювання роботи п'єзоприводу виконавчого механізму.

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

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).

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

Отримані результати дали змогу проводити моделювання в середовищі

електронного моделювання SimInTech з підтримкою роботи з механічними системами поступового руху. Створено бібліотеку компонентів для складальних стовпів з трьох, п'яти, десяти та ста шарів п'єзоелементів.

У **третьому розділі** наведено результати досліджень отриманих моделей у попередньому розділі. Проведено моделювання впливу властивостей кераміки на характеристики п'єзоелектричних перетворювачів з трьох шарів, яке довело, що на переміщення, а саме його збільшення, впливають коефіцієнт зворотнього п'єзо ефекту, модуль Юнга, сила попереднього навантаження та габаритні розміри п'єзоперетворювача. На зменшення часу спрацьовування впливають також збільшення добротності, коефіцієнту зворотнього п'єзо ефекту, сили попереднього навантаження та модуля Юнга, а збільшення габаритних розмірів, навпаки, призводить до збільшення часу.

Для досліджень було використано кераміку від провідних виробників Німеччини, РФ та Індії. Встановлено, що найбільш сприятливі властивості має сегнетожорстка кераміка.

В результаті аналізу проведеного моделювання виявлено коливальний характер системи, яка хоча й нижча, ніж у електромагнітного соленоїда, але все рівно присутня. Для усунення цієї коливальності було проведено дослідження використання ПД та нечіткого регуляторів, яке довело ефективність їх використання.

Крім того, встановлено, що вільний кінець складального стовпа не повертається в нульовий стан. Тому необхідне використання додаткового навантаження. Використання двополярного сигналу управління дозволяє повернутися в нульовий стан, але на практиці такий метод керування може привести до руйнування конструкції.

Проведені дослідження моделей перетворювачів з механічними підсилювачами дозволили підтвердити можливості їх застосування. Однак збільшення коефіцієнту підсилення призводить до зменшення навантаження. Тому потрібно збільшувати кількість складальних стовпів.

Дослідження лінійного п'єзоелектричного двигуна довели можливість

використання в клапані подачі газу. Час спрацьовування такого клапану вкладається в становлені вимоги. Однак, істотного зменшення часу досягти не вдалося при теперішніх властивостях п'єзокераміки.

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

В **четвертому розділі** на основі теоретичних рішень розроблені та запатентовані конструкції клапанів подачі газу з п'єзоелектричними перетворювачами на складальних стовпів та лінійних двигунах, проведено експериментальні дослідження.

В результаті апаратної та програмної реалізації розроблених теоретичних положень створено макет комп'ютерно-інтегрованої системи подачі газу в аварійний дизель-генератор, до складу якої входять система видобутку газу Брауна НУРО 3.0, аварійний дизель-генератор PowerTech™ 4045 DFM70 на базі John Deere 4045d, PLC ILC 150 GSM/GPRS та п'єзодвигуна LPM-5, дослідження роботи якого підтвердило можливість застосування п'єзоперетворювачів для клапану подачі газу.

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.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА 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. Никольський 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, Google Scholar.

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:** приймав у часті 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. Никольский В. В., Никольский М. В., Лысенко В. Е. Модель пьезоэлектрического преобразователя клапана подачи газа в судовой 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) В63В 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. Никольский В. В., Оженко Е. М., Лысенко В. Е., Никольский 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 відсич подачі газу при знеструмленні судна.

12. Nikolskyi V. Fuzzy logic positioning system of ship's diesel generators actuating mechanisms // Vitalii Nikolskyi, Yevgen Ozhenko, Kyriko 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 ПІД 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.

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.

The dissertation highlights the relevance of research, communication with scientific programs, goals and tasks, scientific novelty, practical value and applicant personal contribution to the research. Dissertation approbation results, publications and practical use of research results were focused in dissertation research.

The first chapter (Subject condition of research and task selection) consists of scientific literature reviews related to dissertation subject and research topics in the area of computer integrated system for marine diesel generator fuel gas supply through gas admission valve SOGAV-250. It's been discovered that further operability improvement of computer integrated fuel gas supply system can be achieved by secondary converters upgrade, which transforms electric signal to the mechanical movement of SOGAV plates.

Analysis of the modern types of electromagnetic, pneumatic and hydraulic converters was performed. And also viability of "minimization" and "digital liquid" theories was evaluated. It was proven that design of computer integrated fuel gas supply system cannot be improved anymore.

The possibility of piezoelectric actuators usage as a secondary converters was proven and piezoelectric actuators advantages and features of usage specified. We found out that existing theoretical and practical condition of the pneumatic converters based on bimorph piezoelectric elements doesn't allow to use them effectively in gas admission valves actuators. Besides in automotive industry piezoelectric converters based on piezo stacks are used in fuel injector valves. Also, at that moment researches regarding piezoelectric actuators implementation in the fuel injectors of slowturning marine diesel engines were performing in National university "Odesa maritime academy". So, dissertation research tasks were updated to create theoretical and practical basics that will allow us to design piezoelectric actuators as a part of gas admission valves which are integrated into computer integrated fuel gas supply system of the marine diesel generator.

As a result of conducted researches structural and logic diagrams of dissertation research were created. Also, critical tasks were defined and these tasks will be solved in next chapters.

In the second chapter (Defining requirements for the piezoelectric converters and creating piezoelectric converters models library) the requirements to the electrical part of SOGAV and to the new types of actuators were identified.

Kinematic and structural diagrams of the gas admission valve with piezoelectric actuators which are based on piezo stacks and linear piezoelectric actuators were suggested. Transmission function for one layer piezoelectric actuator including forces that effect piezoceramic converter were obtained.

The models of piezoelectric layer and friction block as parts of piezo stacks and linear piezoelectric actuators were further developed. This allowed us to carry out modeling of piezoelectric actuators together with mechanical translational motion block in SimInTech software. Components library was created for three, five, ten and one hundred piezoelectric layers as well as for linear piezoelectric actuator.

In the third chapter (Models of gas admission valve with piezoelectric actuators) We performed piezoelectric ceramic properties modeling and how they are affecting piezoelectric actuators parameters with three layers of piezoceramic. These researches showed that inverse piezoelectric coefficient, Young's module, preload force and dimensions of the piezoceramic element increases actuator movement range. Increasing of quality factor, inverse piezoelectric effect, preload force, Young's module leads to transient time decreasing. However, increasing of dimensions also increases transient time.

Ceramics we used for tests was made by leading manufacturers from Germany, Russian Federation and India. It was found out that the fergnet hard ceramic has the most favorable parameters.

Modeling helped us to discover that system has oscillatory nature. Piezoelectric actuators' oscillations are less than electromagnetic actuators' but still recognizable. In order to decrease piezoelectric actuator oscillations PID and fuzzy logic governors can be used.

Apart of that, it was found out that the free end of piezo stack actuator doesn't return to zero state, so additional load should be used. Bipolar control signal can return actuator to zero condition but this method cannot be used during operation because it can lead to structures destruction.

Modeling of the actuators with an mechanical reinforcements confirmed possibility of their usage. But increasing of gain can lead to decreasing of load so, the number of piezoelectric layers should be increased.

Linear piezoelectric actuators researches confirmed that they can be used in gas admission valves. Response time of such valves fits the the requirements. But we couldn't achieve significant transient time decrease with modern piezoelectric characteristics.

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

In chapter four (Piezoelectric actuators development and experimental researches with physical model) the new designs of gas admission valve with piezo stacks actuators and linear piezoelectric actuators were created based on theoretical researches. Experimental researches were conducted.

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 from 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 possibility of piezoelectric actuators usage in gas admission valves.

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 stack; linear piezoelectric motor; gas supply valve; SOGAV-250, electronically controlled diesel engine fuel injection system, actuator, piezoelectric transducers.

The basic results of dissertation research of bread-winner are published in the following scientific labors:

Basic scientific results of dissertation

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, Google Scholar.

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:** приймав у часті 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. Никольский В. В., Никольский М. В., Лысенко В. Е. Модель пьезоэлектрического преобразователя клапана подачи газа в судовой 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.

Publications which certify approbation of materials of dissertation

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. Никольский В. В., Оженко Е. М., Лысенко В. Е., Никольский 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 відсич подачі газу при знеструмленні судна.

12. Nikolskyi V. Fuzzy logic positioning system of ship's diesel generators actuating mechanisms // Vitalii Nikolskyi, Yevgen Ozhenko, Kyrylo 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 ПІД та Fuzzy регуляторів.

13. Нікольський В. В., Нікольський М. В., Лисенко В. Є. Моделювання п'єзоелектричного приводу клапану подачі газу судового 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.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	21
ВСТУП.....	22
РОЗДІЛ 1 СТАН ПРЕДМЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ І ФОРМУЛЮВАННЯ	
ВИРІШУВАНИХ ЗАВДАНЬ	28
1.1 Особливості експлуатації комп’ютерно-інтегрованих систем подачі газу в судновий дизель-генератор.....	28
1.2 Аналіз існуючих і перспективних типів клапанів подачі газу	33
1.2.1 Вхідний клапан газу SOGAV-250.....	33
1.2.2 Цифрові гідро- і пневмо- клапана.....	36
1.2.3 Принцип «мініатюризації»	39
1.2.4 «Комерційні» та «некомерційні» цифрові клапани	40
1.2.5 Методи управління потоком	41
1.3 Аналіз існуючих п’єзоелектричних перетворювачів для виконавчих механізмів	43
1.4 Загальна методика дисертаційного дослідження	51
1.4.1 Вибір теми наукового дослідження.....	51
1.4.2 Обґрунтування мети і завдань дисертаційного дослідження	53
1.4.3 Системний підхід при розробці структурно-логічної схеми дослідження.....	54
Висновки до розділу 1	57
РОЗДІЛ 2 МОДЕЛІ ТА МЕТОДИ ПОКРАЩЕННЯ СИСТЕМИ ПОДАЧІ ГАЗУ	
В СУДНОВИЙ ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОР	58
2.1 Формування вимог до перетворювача електричного сигналу в механічне переміщення	58
2.2 Процеси в п’єзорезонаторі та можливі конструкції п’єзоперетворювачів	60

2.3 Структурна схема клапану з п'єзоперетворювачем на складальному стовпі	70
2.4 Структурна схема клапану подачі газу на основі лінійного п'єзодвигуна	72
2.5 Створення бібліотеки моделей п'єзоперетворювачів в середовищі SimInTech.....	82
Висновки до розділу 2	86
РОЗДІЛ 3 ДОСЛІДЖЕННЯ МОДЕЛЕЙ СИСТЕМИ ТА КЛАПАНУ ПОДАЧІ ГАЗУ В СУДНОВИЙ ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОР	88
3.1 Модель п'єзоперетворювача та дослідження його властивостей.....	88
3.2 Модель п'єзоперетворювача клапану подачі газу суднового дизель- генератора на основі складального стовпа.....	98
3.3 Модель п'єзоперетворювача клапану подачі газу суднового дизель- генератора на основі лінійного п'єзодвигуна	113
Висновки до розділу 3	116
РОЗДІЛ 4 РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЙ П'ЄЗОПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ НА МАКЕТІ	119
4.1 Розробка клапану подачі газу з п'єзоперетворювачем на основі складального стовпа п'єзоелементів.....	119
4.2 Розробка клапану подачі газу з п'єзоперетворювачем на п'єзодвигунах	125
4.3 Розробка натурного макету та експериментальні дослідження п'єзоелектричного перетворювача на базі ЛПД.....	132
Висновки до розділу 4	142
ВИСНОВКИ.....	144
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	147
ДОДАТОК А Акти про впровадження результатів дисертаційного дослідження.....	159

ДОДАТОК Б Патенти на корисні моделі.....	163
ДОДАТОК В Physical and Piezoelectric Properties of APC Materials	166
ДОДАТОК Г Material Data PI Ceramic GmbH	167
ДОДАТОК Д PIEZOELECTRIC PROPERTIES SP-*	170
ДОДАТОК Е НДІ «ЕЛПА» сегнетом'які та сегнетожосткі матеріали.....	171
ДОДАТОК Ж ModelT7800Electro-PneumaticI/P,E/PTtransducer.....	173
ДОДАТОК И Технічні паспорти п'єзодвигунів LPM-5 і PM-11*24R.....	174
ДОДАТОК К Список публікацій здобувача за темою дисертації	176

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

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

ВСТУП

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 низькосірчистого 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., Вишневецький В. С., Давлеталієв Д. А., Кеді У., Кауфман А., Окадзакі К., Джагупов Р. Г., Нікольський В. В., Бондаренко Ю. Ю., Оженко Є. М. та інші.

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 судовий 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 моделювання 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 проєктувати 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.); XXIV – та з автоматичного управління «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 Copernicus 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 джерел посилання зі 103 найменувань і додатків. Загальний обсяг становить 179 сторінок (з них 126 – основного тексту). У роботу входять також 76 рисунків та 7 таблиць.

РОЗДІЛ 1

СТАН ПРЕДМЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ І ФОРМУЛЮВАННЯ ВИРІШУВАНИХ ЗАВДАНЬ

Однією з умов безпечної експлуатації суден LNG є підтримка в вантажних танках постійної температури вантажу. Однак, газ, все одно, випаровується. Можливих варіантів запобігання вибуху судна два: викидати газ в навколишнє середовище або утилізувати в ДВЗ. Природно, що найбільш прийнятним є другий спосіб, але, в той же час, він є найбільш складним з конструктивної точки зору [88, 101].

1.1 Особливості експлуатації комп'ютерно-інтегрованих систем подачі газу в судновий дизель-генератор

Використання газоподібного палива – природного газу, який може поставлятися, як стиснений природний газ (CNG) або рідкий природний газ (LNG) дозволяє газовим двигунам випускати менше CO_2 , ніж двигунам, що працюють на сирій нафті і сортам палива, що містять нафту, (мазу і ДТ) [101]. Хімічна формула природного газу в загальному випадку спрощується до метану. Але існує ще й третє джерело газоподібного палива – перетворений в рідину нафтовий газ (LPG), який також називають «супутнім». Він складається з вищих молекулярних компонентів ваги природного газу. LPG може бути перетворений в рідину під тиском при температурі навколишнього середовища. Головний компонент LPG – n-пропане. Метан і природні гази добре стискаються. Він складається з вищих молекулярних компонентів ваги природного газу. LPG може бути перетворений в рідину під тиском при температурі навколишнього середовища [83].

Недоліком нафтових (попутних) газів є їх різна питома теплоємність, що ускладнює передбачення поведінки такого палива при його спалюванні в двигуні [7]. Дуже складно оптимізувати такий процес. Тому газоподібні палива використовують виключно, як компоненти різних сумішей з іншими паливами.

Через постійне зростання екологічних вимог до викидів в навколишнє середовище доводиться вибирати доступні альтернативні палива. Крім того, знайшли, що альтернативні газоподібні палива [81] мають більш зручні емісійні характеристики. Газові двигуни мають високий рівень надійності і основна причина, чому вони розвиваються, використання на рідкому і газовому паливі [82, 88].

Але, незважаючи на переваги газових двигунів, які викидають на 20–30 % менше CO_2 , ніж морські дизелі, що працюють на важкому паливі (HFO), їм притаманні такі недоліки:

- аномальне згоряння – детонація, знижує ефективність ДВЗ за рахунок зменшення його максимального крутного моменту, а також може призвести до передчасного руйнування;

- метанове ковзання призводить до скидання незгорілого метану в вихлопний отвір під час продувки циліндра.

Існує три типи двигунів, в яких може використовуватися газ: іскровий двигунів, газодизельний, двохлапний.

Газовий двигун з іскровим запалюванням може працювати тільки на газі – це іскрові запальні двигуни Отто з підпалом. В [88] показаний принцип роботи двигуна з іскровим запалюванням.

Газодизельні двигуни можуть працювати в режимі газу з режимом запального рідкого палива. Оскільки сам газ не може загорятися від стиску, як дизпаливо, оскільки температура його самозапалювання набагато вище (близько $700\text{ }^\circ\text{C}$ проти $320\text{--}380\text{ }^\circ\text{C}$ у дизпалива) [1]. Тому для роботи дизеля на газі необхідна подача в циліндри деякої кількості дизпалива (запальної порції), яка подається в кінці такту стиснення і запалюється, підпалюючи газоповітряну суміш, яка, в свою чергу, надходить в циліндри на такті впуску. Як приклад можна привести газовий дизель фірми МАН Дизель 32/40 DG [94].

Двохлапні двигуни можуть працювати в двох різних режимах роботи: в газовому та дизельному режимах по циклу Отто [32]. Раніше їх було неможливо використовувати на суднах в силу ряду об'єктивних причин,

основні з яких були їх вибухо- і пожежонебезпеки.

Якщо в двигуні використовується режим «чистого» дизельного палива, принцип роботи двопаливного двигуна – традиційний дизельний процес, і вхід газу відсікається. В процесі можуть використовуватися як рідкі палива LFO, так і HFO [88].

Основними перевагами газодизеля в порівнянні з традиційними ДВЗ є зниження в 2–4 рази димності відпрацьованих газів, економія до 80 % дизельного палива за рахунок заміщення його газом.

Особливе місце в ряду суднових двигунів займає двигун L32DF (Dual – Fuel), що представляє двопаливний варіант двигуна Wärtsilä L32, який працює по дизельному циклу з використанням як ДП (MDO), так і газоподібного палива з ефективним ККД 44 %. Перехід двигуна з одного виду палива на інший здійснюється автоматично і, практично, миттєво, незалежно від режиму, на якому він працює. Важливою особливістю двигуна є те, що він працює на бідних газових сумішах, повітря в циліндрі орієнтовно в два рази більше, ніж потрібно для повного згорання. Тому велика кількість тепла витрачається на нагрівання повітря, а це, природно, сприяє суттєвому зниженню пікових значень температур згорання і різкого зменшення утворення NOx.

Головне ж завдання – уникнути вибухового згорання (детонації), яке відбувається при багатих сумішах. У той же час збіднені суміші призводять до характерного для газових двигунів пропуску спалахів в циліндрах. Тому при всіх навантаженнях і швидкісних режимах значення коефіцієнта надлишку повітря повинні лежати у відносно вузькому діапазоні. Регулювання співвідношення повітря-газ здійснюється автоматично на всіх режимах шляхом зміни продуктивності турбо-компресора за допомогою байпасування вихлопних газів, частина яких направляється, минаючи ГТК.

Основна перевага двопаливних двигунів полягає в тому, що вони працюють на дешевому газовому паливі та їх застосування раціональне на судах-газовозах і в берегових енергетичних установках на газових промислах. У разі перебоїв в подачі газу двигун може продовжувати працювати на рідкому

паливі MDO (Marine Diesel Oil).

Системи упорскування газу сучасного газового двигуна підрозділяється на дві різні системи упорскування, одноточкова ін'єкція (SPI) [88] і багатоточкова ін'єкція (MPI) [103] та порівнюються з точки зору їх властивостей, пов'язаних з навколишнім середовищем і інженерними аспектами. В [88, 94, 103] досліджені комбінації одноточної ін'єкції і багатоточної ін'єкції. Їх відмінності наведені в [88, 103]. В [83, 97] показана залежність кількості палива, що впорскується в циліндр від умов експлуатації і наводиться одноточкова система уприскування палива.

Основною проблемою при експлуатації газодизеля є, як зазначалося раніше, скидання метану. Термін «метанове ковзання» означає незгорілий метан, який стікає у вихлопній отвір. Джерелами метанового ковзання найчастіше є обвідний потік попередньо змішаного газу під час періоду перекриття клапана, пропускання запалювання в камері згорання і гасіння полум'я всередині прикордонного шару поблизу стінки циліндра або в мертвих обсягах близько камери згорання. Охолодження полум'я всередині прикордонного шару становить 50 % загального ковзання. Зниження ймовірності метанового ковзання відбувається при зменшенні щілин. Крім того, загальновідомо, що метан у 25 разів шкідливіший парниковий газ, ніж CO₂.

За основу в дослідженні було обрано судно газозвоз LNG – регазифікаційну станцію FSRU Explorer, який обладнений електростанцією з двигунами HiMSEN (модель H35DF, 7 і 9 циліндрів, потужність 3360 і 4320 кВт) та Wärtsilä (VASA 12V32DF, 12 циліндрів, потужність 3850 кВт).

Утилізація газу, який утворився в результаті випаровування з вантажних танків, здійснюється за наступною схемою (рис. 1.1): газ, що випаровується, надходить в систему підготовки і підігріву газового палива, і далі здійснюється його спалювання в дизель-генераторах головної електроустановки.

Серед загальновизнаних лідерів з розробки та виробництва судових дизель-генераторів є компанія Wärtsilä, яка останнім часом часто демонструє свою прихильність до природного газу в якості альтернативного палива. І, як

результат, на сьогоднішній день вони вже мають у своєму арсеналі силові установки (тип DF) [102], які працюють на двох видах палива – дизельне паливо і газ.

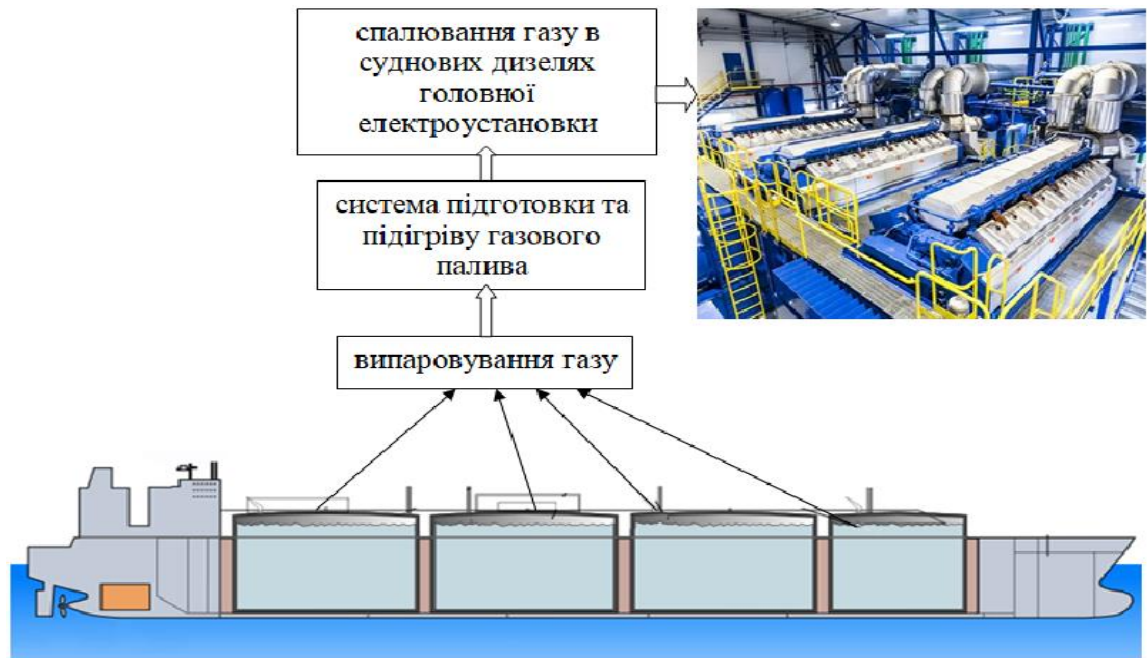
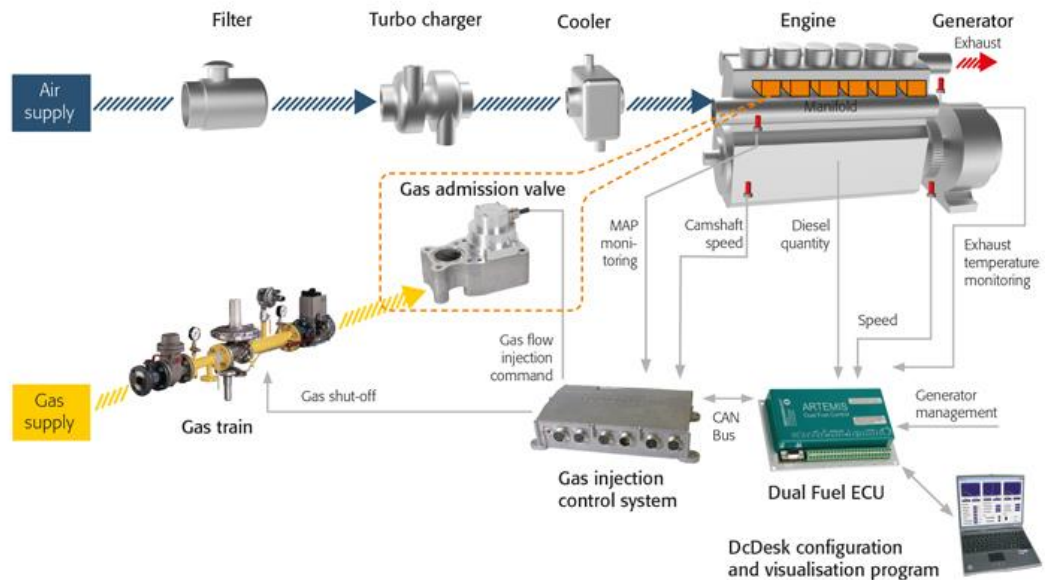


Рисунок 1.1 – Структурна схема системи підтримки постійного тиску в вантажних танках суден метановозів

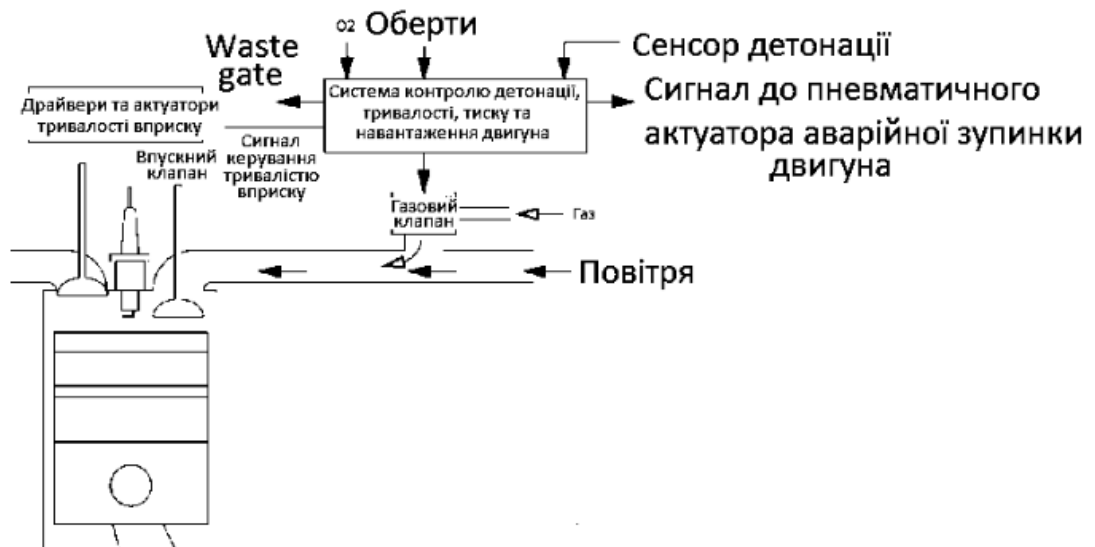
На рис. 1.2, а наведено структурну схему комп'ютерно-інтегрованої системи подачі палива в судновий дизель-генератор, який оснащений двопаливним дизелем VASA 12V32DF. До складу системи входять два блоки Dual Fuel ECU і Gas injection control system. Остання відповідає за контролю подачі газу до камери згоряння.

На рис. 1.2, б наведено структурну схему безпосередньо системи подачі газу на основі системи контролю детонації, тривалості, тиску та навантаження двигуна.

Займаючись розробкою двигунів і всіх супутніх систем, в системі подачі палива (рис. 1.2, а) компанією використовується електромагнітний соленоїдний клапан для подачі газу фірми Woodward SOGAV-250.



а)



б)

Рисунок 1.2 – Структурні схеми: а – комп’ютерно-інтегрованої системи подачі газу в судновий дизель-генератор VASA 12V32DF; б – системи подачі палива

1.2 Аналіз існуючих і перспективних типів клапанів подачі газу

1.2.1 Вхідний клапан газу SOGAV-250

Вхідний клапан є стратегічним компонентом газового двигуна. Оскільки зріджений природний газ є дуже сухим газом, він зношує пластини клапана

подачі газу. В даний час існує лише кілька постачальників комерційних клапанів для подачі газу, наприклад, Woodward і Hoerbiger.

На даний момент Wärtsilä використовує клапан подачі газу соленоїдного типу SOGAV 250 виробництва Woodward, США (рис. 1.3).

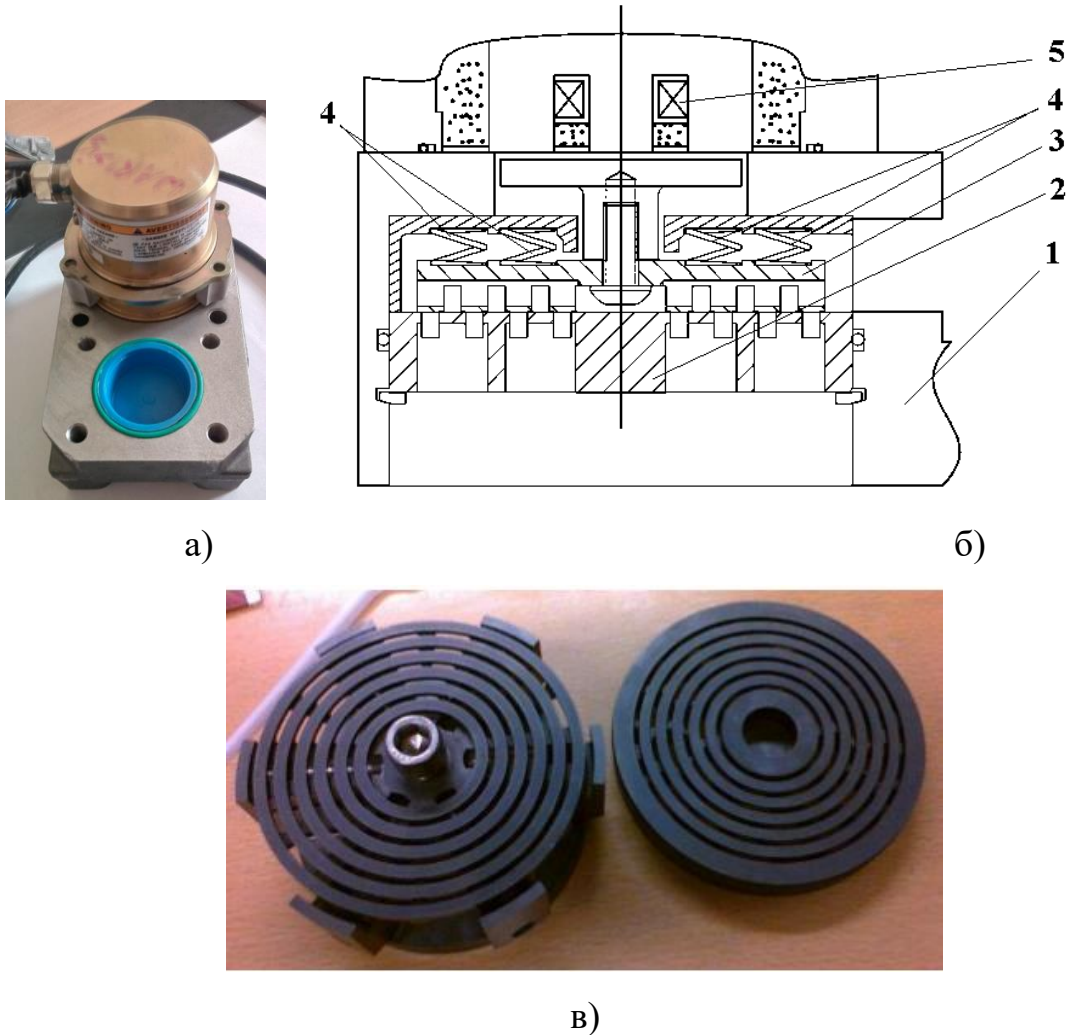


Рисунок 1.3 – Клапан подачі газу фірми Woodward SOGAV – 250: а- зовнішній вигляд; б – конструкція, в – пластини

На рис. 1.4 показаний SOGAV-250 [98], де зображені: 1 – корпус клапану; 2 – нижній упор; 3 – пластина; 4 – блок пружин; 5 – електромагнітний соленоїд.

Клапан складається з двох пластин (рис. 1.4,в). Основна ідея клапана полягає в тому, що області витoku великі, а переміщення відкриття невелике. Крім того, переміщення досить мале, час відгуку клапана теж малий.

В процесі експлуатації SOGAV-250 спостерігається погіршення робочих характеристик [42], а саме:

- залипання електромагнітного клапану, яке призводить до зносу пари клапан–сідло;
- неможливо впоратися з великою різницею тисків. Якщо перепад тиску завеликий, клапан не відкриється;
- термін служби клапану тільки 4000 годин;
- час відкриття та закриття клапану 2–4 мс і клапан перепускає газ [88].
- процеси коливання в електромагнітному соленоїду, що приводить до раннього закриття клапану, або неповного відкриття.

Ці недоліки обумовлені використанням соленоїду.

Як було зазначено вище, основний компонент – це соленоїд, який перетворює електричний струм в зусилля [77]. Основними компонентами соленоїда є котушка, сердечник (плунжер) і пружина. Плунжер втягується всередину, коли котушка активована, відбувається накопичення енергії пружинами. Потім пружина віддає накопичену енергію, коли котушка не під напругою, а плунжер виходить назовні [80]. Оскільки довжина переміщення плунжера дуже коротка, час руху соленоїда також може бути невеликим.

У цифрових гідравлічних додатках використовуються соленоїди постійного струму. Соленоїдам змінного струму необхідні додаткові конструктивні і схемотехнічні рішення [77]. Теорія соленоїда описана в [85, 77].

На рис. 1.4 наведені графіки поведінки пропорційних клапанів FIVA-valve з електричним приводом для систем подачі палива дизелів MAN&V 12K98ME з автоматизованою електро-гідравлічною системою управління паливним насосом високого тиску (ПНВТ). Циліндр №5 є еталоном для роботи. В роботі циліндрів №2 та №7 спостерігаються збої в роботі, а саме, неповне відкриття та неповне закриття ПНВТ.

Такі самі збої спостерігаються в роботі клапанів подачі газу.

У той же час соленоїд, як правило, занадто повільний для цифрових гідравлічних застосувань. Тому, використовуючи спеціальний метод управління, домагаються прискорення його роботи [85] за рахунок використання надмірного напруження 36 В з переходом до напруги утримання

12 В. Для уникнення іскріння або навіть руйнування джерела живлення використовують діод, який вмикається зворотно [77].

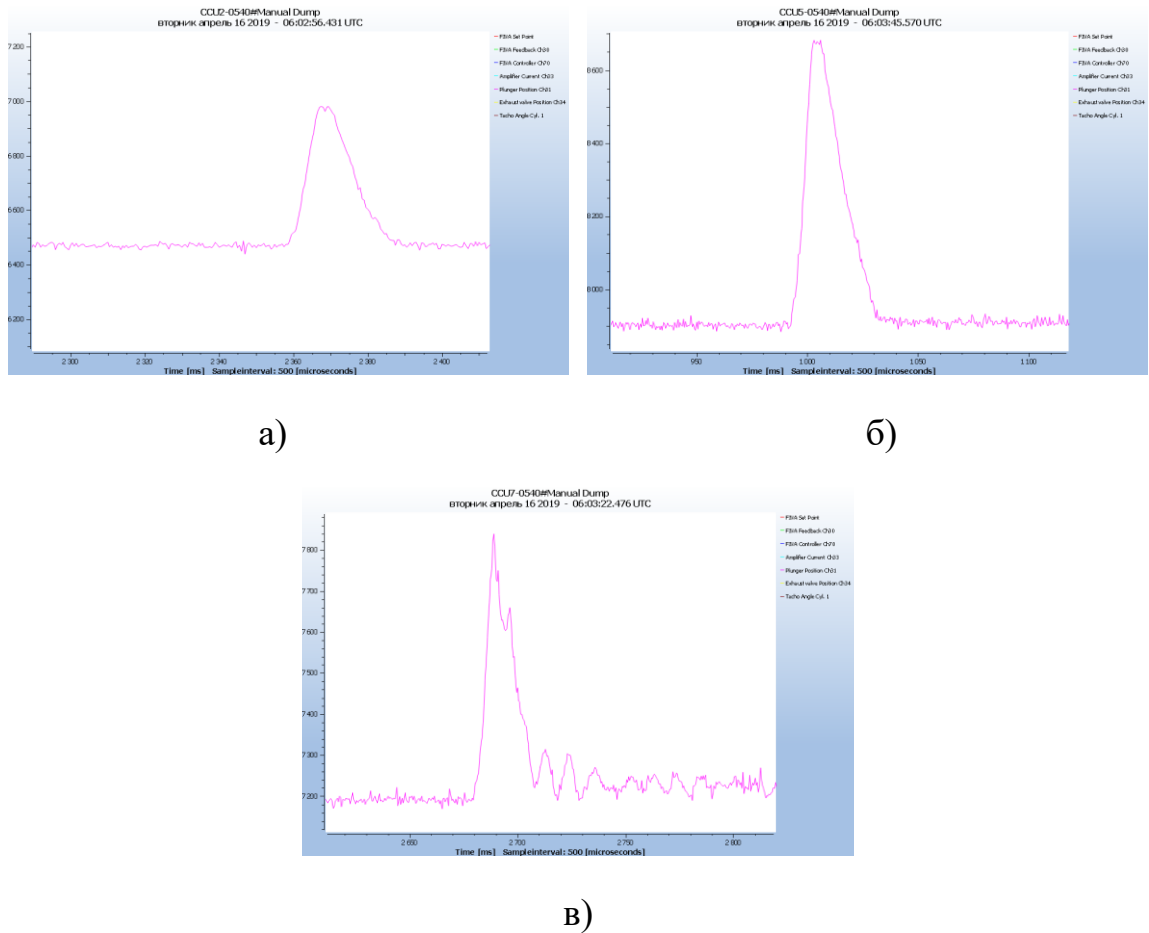


Рисунок 1.4 – Графік залежностей поведінки елементів системи подачі палива в циліндр: а – положення плунжера циліндру № 2 у Ch31; б – положення плунжера циліндру №5 Ch31; в – положення плунжера циліндру № 7 Ch31

Слід зазначити, що в останні декілька років набирають поширення, так звана «цифрова рідина» – гідравличні клапани з цифровим управлінням, яка є альтернативою звичайним клапанам. Приклади новітніх досягнень наведено в [64].

1.2.2 Цифрові гідро- і пневмо- клапана

Цифрова система клапанів складається з дискретних компонентів, які можуть бути відкриті (включені) або закриті (вимкнені). На рис. 1.5

представлені дві групи клапанів управління енергетичними потоками.

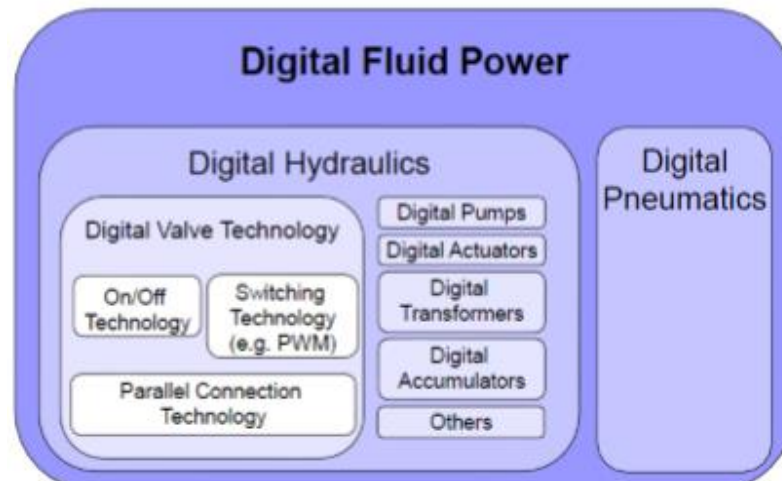


Рисунок 1.5 – Розрахункова енергія потоку [85]

Технологія цифрових клапанів складається з трьох різних способів: технологія включення/вимикання, технологія комутації і технологія паралельного з'єднання. Технологія включення / вимикання заснована тільки на одному клапані. Недоліки: погана керованість через відсутність тонкого регулювання; наявність гідроударів [85]. Технологія комутації заснована на одному клапані, який управляється з високою частотою. Клапан може управлятися за допомогою широтно-імпульсної модуляції (PWM) або імпульсно-частотної модуляції (PFM).

Технологія паралельного з'єднання заснована на використанні ряду клапанів різного або однакового розміру. Вихід паралельного з'єднання – це число дискретних значень.

На рис. 1.6 показані різні варіанти з'єднання цифрових клапанів [85]: а – вмик./вимик.; б – перемикування; в – паралельна технологія.

На рис. 1.6, г представлений цифровий блок управління потоком (DFCU). Він складається з декількох паралельних підключених вмик./вимик. клапанів, а також спрощений гідравлічний символ DFCU (рис. 1.6, д).

Для досягнення всіх можливих центральних положень пропорційного клапана необхідні шість DFCU [85, 92].

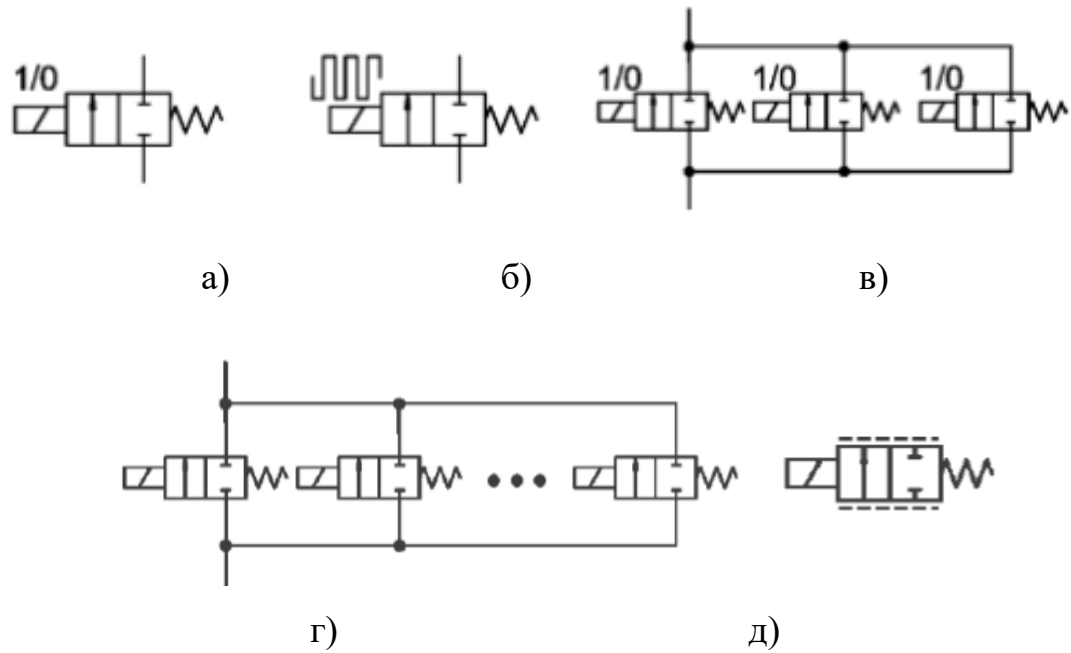


Рисунок 1.6 – Три види технології цифрових клапанів (а-б) і цифровий блок управління потоком (DFCU) (г) та спрощений символ (д)

Слід зазначити, що дослідження цифрової гідравлічної системи з гідравлічним циліндром з використанням двох і чотирьох DFCUs (рис. 1.7) [88] і цифрової пневматичної системи клапанів для трьох варіантів управління цими клапанами довели їх високі показники при заміні пропорційного клапану. Проте, у всіх випадках, все одно, залишається електромагнітний привод виконавчого механізму зі всіма недоліками, які притаманні їм.

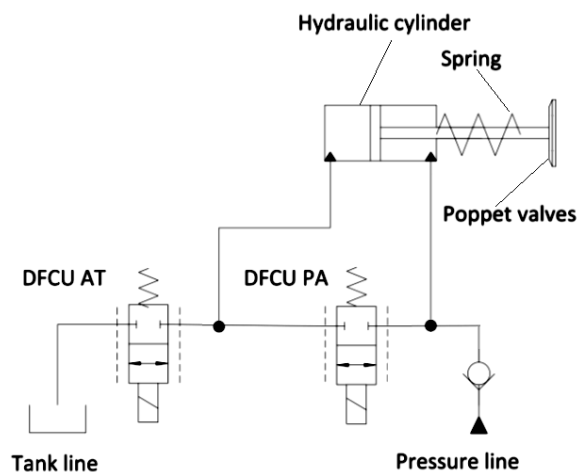


Рисунок 1.7 – Цифрова гідравлічна система з двома DFCU і тарілчастими клапанами з гідравлічним приводом

1.2.3 Принцип «мініатюризації»

Принцип «мініатюризації» полягає в тому, що великі компоненти замінюються декількома меншими компонентами. Переваги мініатюризації – зменшення загальних розмірів, обсягів і маси компонентів. Необхідна енергія управління зменшується, а компоненти стають швидше, тому що час затримки значно скорочується [85]. Крім того, необхідні функції, наприклад, площа потоку клапана може бути однаковою з використанням одного великого клапана або декількох менших клапанів. Використання декількох менших компонентів скорочує їх момент інерції в порівнянні з одним великим клапаном. У табл. 1.1 наведені порівняльні параметри для одного великого і трьох малих клапанів [88].

Таблиця 1.1 – Параметри інерції

Parameter	Big valve	Small size valves (3x3)
Mass	1 kg	1/3 kg
Diameter	90 mm	9 * 30 mm
Moment of inertia	$5.1 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{kg}$	$1.9 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{kg}$
Inertia ratio	27:1	
Total flow area	$6.3 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$	$9 \cdot 7.07 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 = 6.3 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$

Аналіз таблиці 1.1 показав, що відношення інерції в 27 разів більше з одним великим клапаном в порівнянні з меншими клапанами. Зниження інерції залежить від розмірів діаметра клапана в другому ступені (рис. 1.8). Як наслідок, області потоку клапанів рівні, а загальні площі потоку розраховуються з використанням діаметра клапанів.

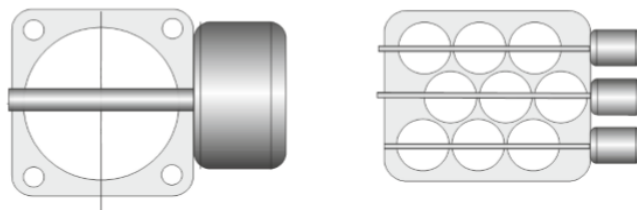


Рисунок 1.8 – Момент інерції і загальна площа потоку за допомогою обертового клапана [88]

Однак, теорія «мініатюризації» працює до розміру отвору 0,3 мм. При використанні менших отворів відбувається зміна потоку від турбулентного до ламінарного, і клапан стає більш чутливий до забруднюючих частинок. Також збільшуються в'язкі сили і ускладнюється упаковка компонентів [85]. Відповідно до теорії мініатюризації, великі клапани повинні бути замінені кількома меншими клапанами. В результаті з'явилися пакети з PNM-кодуванням, які менше, швидше і ефективніше, ніж великі клапани.

1.2.4 «Комерційні» та «некомерційні» цифрові клапани

В даний час на ринку є клапана декількох компаній, спеціально призначених для цифрової гідравліки і пневматики. Основна проблема «комерційних» клапанів – час відгуку. Якщо запрограмований час клапана занадто великий, то клапан не потрібний у цифровій системі.

Серія Bucher Hydraulics WS22GD / OD Серія Bucher Hydraulics Серія WS22GD / OD [79] призначена для використання в цифровій гідравліці. Це клапан з регульованим електромагнітним керуванням. Максимальні витрати через клапан становлять 30 л / хв, а максимальний робочий тиск – 35 МПа. На рис. 1.9, а показаний цифровий клапан серії Bucher Hydraulics WS22GD / OD.

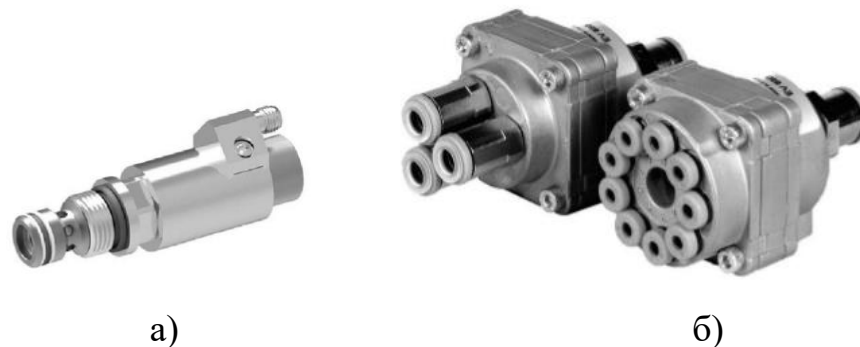


Рисунок 1.9 – «Комерційні» клапани: а – серія Bucher Hydraulics WS22GD / OD; б – серія Vibus Matrix 850, три та дев'ять версій виходу

Час відгуку клапана становить 5-15 мс, і воно залежить від різниці тисків, відпрацьованого масла, напрямку потоку клапана і кількості витрат. Клапани типу сідла практично герметичні: кількість витоків становить максимум 5

крапель в хвилину, що становить близько 0,2 мл / хв. Кількість витoku золотникового клапана WK22 від Bucher Hydraulics становить 10-20 мл/хв. [79].

Клапан Sturman Industries SI-1000 від виробника [88] містить тільки одну маленьку котушку, яка переміщується. Електрична потужність споживається тільки при її переміщенні. Сам клапан бістабільний, тому що фіксує магнітне зусилля на обох кінцях котушки. Типовий зазор золотника становить 5 мікрон, що вимагає використання фільтрованої рідини. Номінальна витрата складає 12 літрів в хвилину при різниці тисків 0,5 МПа. Час відгуку клапана становить всього 0,45 мс. Енергія перемикання клапана становить 0,3 Дж.

Оскільки конструкція клапана Sturman Industries SI-1000 складається з двох котушок, ненаправлена котушка може використовуватися в якості датчика положення золотника.

Пневматичний клапан серії Bibus Matrix серії 850

Клапани серії Bibus 850 представляють собою пневматичні клапани, які складаються з трьох різних варіантів клапанних клапанів; одно-, трьох- і дев'ятивипускних версій, названих відповідно до кількості виходів: 851, 853 і 859. Час відгуку клапана становить кілька мілісекунд, а час відгуку з контролем прискорення менше 1 мс при робочій частоті 500 Гц. Час відгуку також не залежить від значення витрати, а термін служби складає більше 500 мільйонів циклів [78]. На рис. 1.9,б показані три і дев'ять версій виходу.

Максимальні швидкості потоку клапанів в нормальних умовах 1620 л/хв. (851), 520 л/хв. (853) і 180 л/хв. (859). Комбінації методів управління (PWM, PFM, PCM, PNM) можуть використовуватися для досягнення більш лінійної витрати клапана [78].

1.2.5 Методи управління потоком

Існує чотири методи управління клапанами: PWM; PFM; PCM; PNM.

PWM (Pulse Width Modulation) або ШИМ (широотно-імпульсна модуляція).

Принцип ШИМ (широотно-імпульсна модуляція) полягає в тому, що

частота імпульсу постійна, а ширина імпульсу є керуючою змінною. Чим більше контрольний імпульс, тим більше швидкість потоку через клапан [78].

Робочий цикл визначається як швидкість між шириною імпульсу і частотою імпульсу. Швидкість між $[0, 1]$. Корисний робочий цикл залежить від часу спрацьовування і частоти перемикання клапана. Коли тривалість імпульсу коротше часу відгуку клапана, невизначеність клапана швидко зростає [88].

PFM (Pulse Frequency Modulation) / (імпульсно-частотна модуляція) – це метод управління, де тривалість імпульсу постійна, а частота імпульсу – керуюча змінна. Чим коротше змінна частота T_0 , тим більше відношення T_p / T_0 і тим більше потік через клапан [78].

PCM (імпульсно-кодова модуляція) заснована на двійковому кодуванні. Використовуючи PCM, DFCU має $2^N - 1$ різні стани, де N – кількість клапанів. Використовуючи ідеальний двійковий-кодований DFCU отримуємо, що кожний стан дає різну швидкість потоку, і кожен розмір кроку той же. Дозвіл ідеального PCM-кодованого клапана $(2^N - 1) : 1$ [85, 87].

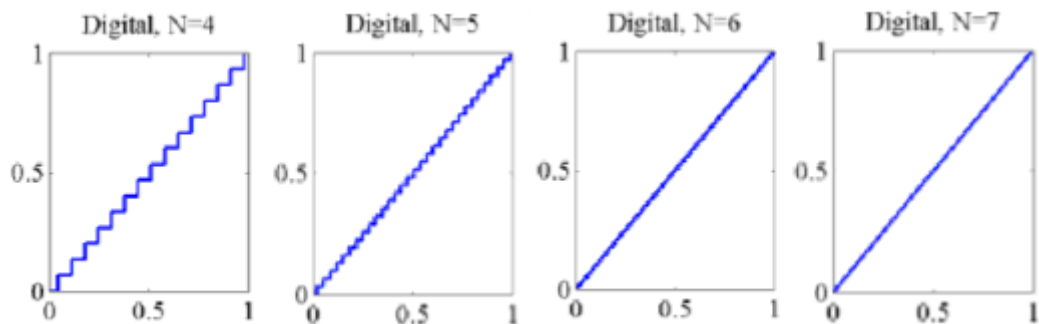


Рисунок 1.10 – Ідеальний двійково-кодований DFCU з використанням різної кількості клапанів [85]

Однак ідеальний двоїково-кодований DFCU можливий тільки в теорії. При використанні реального DFCU присутні зміни, які характеризуються, як поганий стан. Поганий стан – особливість цифрової гідравлічної системи, коли стан змінюється на значення одиниці. Найгірший стан з використанням PCM-закодованого 5-бітного DFCU – це коли початковий стан дорівнює 15, а наступний стан – 16 або навпаки. Всі клапани змінюють стан від початкових станів до 0 або 1.

Коли стан змінюється від його початкового значення від 15 до 16, в гіршому випадку перехідний стан може бути значенням від 0 до 31.

PNM (Pulse Number Modulation) / Метод кодування, який заснований на ряді аналогічних компонентів. Дозвіл – це кількість клапанів, N і швидкість потоку через кожен клапан [88].

Використовуючи PNM-кодування, поганий стан ігноруються, тому що більше клапанів відкривається або закривається, але не одночасно. Однак, використовуючи PNM-кодування, наприклад, для вирішення 31 потрібно 31 клапан. Для кодування РСМ потрібно тільки 5 клапанів [85].

Слід зазначити, що основним недоліком ще залишається електромагнітний соленоїд. Тому потрібно здійснити перехід на новітні фізичні принципи.

Нами пропонується використання п'єзоприводу, який зазвичай може бути представлений двома типами – актуаторами (складальними стовпами) та двигунами (реверсивними лінійними та роторними).

1.3 Аналіз існуючих п'єзоелектричних перетворювачів для виконавчих механізмів

Аналіз існуючих типів приводів довів, що електромагнітний соленоїд можна замінити на електромеханічні приводи. Застосування асинхронних електродвигунів змінного струму, що володіють відносною простотою і невисокою вартістю, обмежена низьким ККД (80 – 82 %), вібрацією і високими вимогами до балансування ротора через його високої частоти обертання

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

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

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

Використання електромагнітів і магнітострикційних матеріалів обмежено необхідним високим зусиллям і швидкодією, так як для їх забезпечення буде потрібен привід з високими маса-габаритними показниками і великим струмом управління.

Удосконалення виконавчих механізмів електромагнітного типу в конструкторсько-технологічному напрямі в даний час практично вичерпані, що не створює перспективи в їх застосуванні. Тому очевидна актуальність розробки КІС з виконавчими механізмами на базі нових фізичних принципів, а саме п'єзоелектричних перетворювачів, які, завдяки зворотному п'єзоєфекту, перетворюють електричний сигнал в механічне переміщення.

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

Раніше застосування п'єзоприводів розглядалося тільки для створення мікропереміщень при невеликому зусиллі.

З огляду на переваги п'єзопривода в порівнянні з електромеханічним, пнево- і гідроприводами в роботі поставлено завдання розробити теоретичні та практичні положення, які дозволять розробляти п'єзоелектричні перетворювачі виконавчих механізмів подачі газу в дизель-генератор.

У ряді досліджень [37] згадується про використання п'єзокерамічних стовпів і реверсивних лінійних двигунів, яким притаманні переваги в

порівнянні з електромагнітними приводами.

В [37, 38] наведено порівняльні дослідження електромагнітних і електромеханічних приводів зі складальними п'єзостовпами та двигунами.

Застосування п'єзоприводу також дозволить збільшити термін служби клапану від 5000 год. і зберегти характеристики його роботи та зменшити експлуатаційні витрати на обслуговування дизеля. В табл. 1.2 наведено конструктивні рішення п'єзоелектричного приводу [45], аналіз якої дозволяє зробити висновок, що для заміни соленоїду можливе використання від біморфного ПР до роторного ПЕД.

Таблиця 1.2 – Конструктивні рішення

Тип приводу	Маніпулятори			двигуни	
	Циліндр	біморф	стовп	лінійні (ЛПД)	роторні (ПЕД)
Конструкція п'єзорезонатору (ПР)	р				
Довжина ходу рухомого циліндра	<0,1 мкм		<0,5 мм	>5 мм	$n=0\dots 5$ Гц

Інформаційний пошук показав, що існують п'єзоелектричні перетворювачі електричного сигналу в гідро- (пневмо-) сигнал.

З [14, 15] наведено такі способи перетворення:

1) електричний сигнал перетворюється в звуковий, який взаємодіє з ламінарними затопленими струменями робочого тіла (рідини, газ);

2) електричний сигнал перетворюється в механічний (наприклад, в лінійне, кутове переміщення), який, в свою чергу, перетворюється в гідро- (пневмо-) сигнал за допомогою різних механо-, гідро-, пневмо- перетворювачів (золотникових, струменевих).

В табл. 1.3 наведені конструктивні рішення пристроїв керування гідро- та пневмо- потоками [14, 15]:

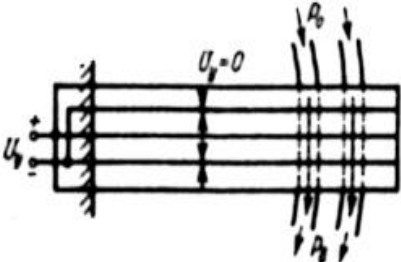
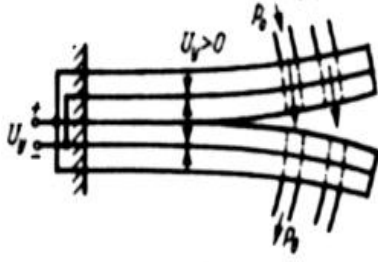
– на основі пакету БПЕ (п. 1), що керує струменевими потоками повітря. У найпростішому випадку – це дві біморфні пластини, що затиснуті консольно, з співвісно розташованими в них отворами, які утворюють ряд напірних і прийомних сопел робочих камер;

– з п'єзоакустичним управлінням (ПАП) (п. 2), в яких акустичне випромінювання від ПЕ керує потоками рідини або газу. При цьому можуть бути реалізовані різні інформаційно-логічні (аналогові чи дискретні) функції перетворення сигналу. До складу конструкції входять наступні елементи: 1 – п'єзоелемент; 2, 3 – напірне та приймальне сопла; 4 – робоча камера; 5 – струмінь; 6, 10 – поршні; 7, 11 – регулювальні гвинти; 8 – дифузор з великим кутом розкриття; 9 – повітряна камера;

– дроселі «сопло–заслінка» (п. 3) відносяться до категорії проточних пневмоелементів і зустрічаються практично у всіх приборах пневмоавтоматики;

– радіально поляризована п'єзокерамічна трубка (1) (п. 4), один кінець якої жорстко закріплений в корпусі. Внутрішня поверхня трубки (1) покрита суцільним електродом (2), а зовнішня двома парами гальванічески незв'язаних електродів (3), (4). Внутрішня порожнина трубки є струменевим соплом (5), вільний торець трубки (1) і сопло (5) знаходиться навпроти геометричного центру отворів розподілювачів (6) і (7), які пов'язані з порожнинами виконавчих механізмів (8) і (9), що розташовані під прямим кутом відносно один одного і представляють собою циліндро-поршневі пари зі штоками (10) і (11). Один торець штоків штовхає, а на іншому жорстко укріплені движки потенціометрів зворотних зв'язків, які підключено до підсилювачів (на рисунку не вказані). (12) і (13) – джерела напруги;

Таблиця 1.3 – ПП керування гідро- та пневмо-потоками

1	електро- пневматичного перетворювача на БПЕ		
---	--	---	---

2	п'єзоакустичні перетворювачі		
3	електро-пневматичні перетворювачі «сопло-заслінка»		
4	Електро-пневматичний пристрій		
5	Плоский золотник на пружних підвісах		

– електро-гідро- (пневмо-) динамічні перетворювачі з плоским золотником на пружних підвісах (п. 4);

– плоский золотник на пружних підвісах (п. 5), що відноситься до категорії пневмо-елементів, що мають потужний пневматичний вихід, де біморфний ПЕ (11) здійснює переміщення П-образної рамки (3) перетинаючи

потік отворів (7) і (8), що знаходяться в кондукторі (6).

Недоліки цих рішень наступні:

– п. 1 ПЕ, з яких складається пластинка, не здатні розвивати досить велику потужність і мають малу жорсткість. Положення БПЕ щодо сопла буде залежати не тільки від напруги, що перетворюється, а і від сили тиску, що діє при цьому на нього.

– п. 3 невисока надійність з'єднання сопла та п'єзоперетворювача, ненадійність склеєних біморфних пластин, а також переміщення сопла тільки по одній координаті (через неможливість вигину біморфа за іншою координатою).

– п. 4, попри підвищену надійність і технологічність, процес управління потоком повітря пов'язаний з необхідністю подолання порівняно великих зусиль. У зв'язку з цим використання в цих цілях малопотужного БПЕ можливо в тому випадку, якщо потоко-розподільний механізм, що приводиться ним у рух, розвантажує його від дії тиску, має малу інерцію, жорсткість і не має частин, що труться.

– п. 5 при високому тиску чутливість перетворювача зростає, що призводить до обмеження ходу рамки через антінейтральної сили. Це призводить до необхідності обмеження досить малими переміщеннями підстави рамки, які стають порівнянними з виробничими допусками на розподільні штифти (9) і відповідні їм отвори (8). При цьому зростає зона нечутливості перетворювача, яка досягає 10 %. Крім того, ускладнюється процес установки рамки в нейтральне положення.

А ось оптимальний тиск вже становить 500 кПа.

Крім того, ці рішення не забезпечують відсікання рідини, або повітря/газу при знеструмленні.

На початку 2000-х років були розроблені насос-форсунки з п'єзоелектричним клапаном (моделі PPD 1.1) [63] на базі насос-форсунки з електромагнітним клапаном, що дозволило збільшити швидкодію і поліпшити керованість і елементи механічного управління тисками впорскування, що

дозволило відмовитися від компенсаційного поршня і підвищити ККД робочого циклу форсунки за рахунок зменшення обсягів палива, що стискається під високим тиском. З метою зниження витрат на зміну конструкції двигуна були збережені всі установчі розміри насос-форсунки і її кріплення за допомогою двох болтів, як це було передбачено у попередньої моделі PDE P2 з електромагнітним клапаном. Для їх виробництва була заснована фірма Volkswagen Mechatronic GmbH & Co. KG – спільне підприємство з фірмою Siemens VDO Automotive AG (м. Штольберг, Саксонія).

Основні переваги застосування п'єзоелектричного клапана:

- швидкодія приблизно в чотири рази вище, ніж у раніше застосовуваного електромагнітного клапана;
- можливість зміни тисків в широкому діапазоні (130–2200 бар), що дозволяє поліпшити характеристики уприскування і, відповідно, збільшити потужність двигуна і знизити викиди шкідливих речовин;
- дозволяють знизити шум, який утворюється при роботі насос-форсунок. Це досягається завдяки управлінню швидкістю наростання і зниження тиску палива в окремих фазах вприскування;
- підвищення ККД насос-форсунки пояснюється зниженням витрат потужності на її привід, що призводить до поліпшення економічності двигуна.

На рис. 1.11, а представлена конструкція насос-форсунки першого покоління, в якій здійснюється за допомогою п'єзоперетворювача пряме управління клапаном. Недоліки такої конструкції – це велика довжина складального стовпа. Тому в другому поколінні його замінили на складальний стовп з перпендикулярним розташуванням по відношенню до клапана подачі палива (рис. 1.11, б). Це дозволило зменшити довжину форсунки в кілька разів.

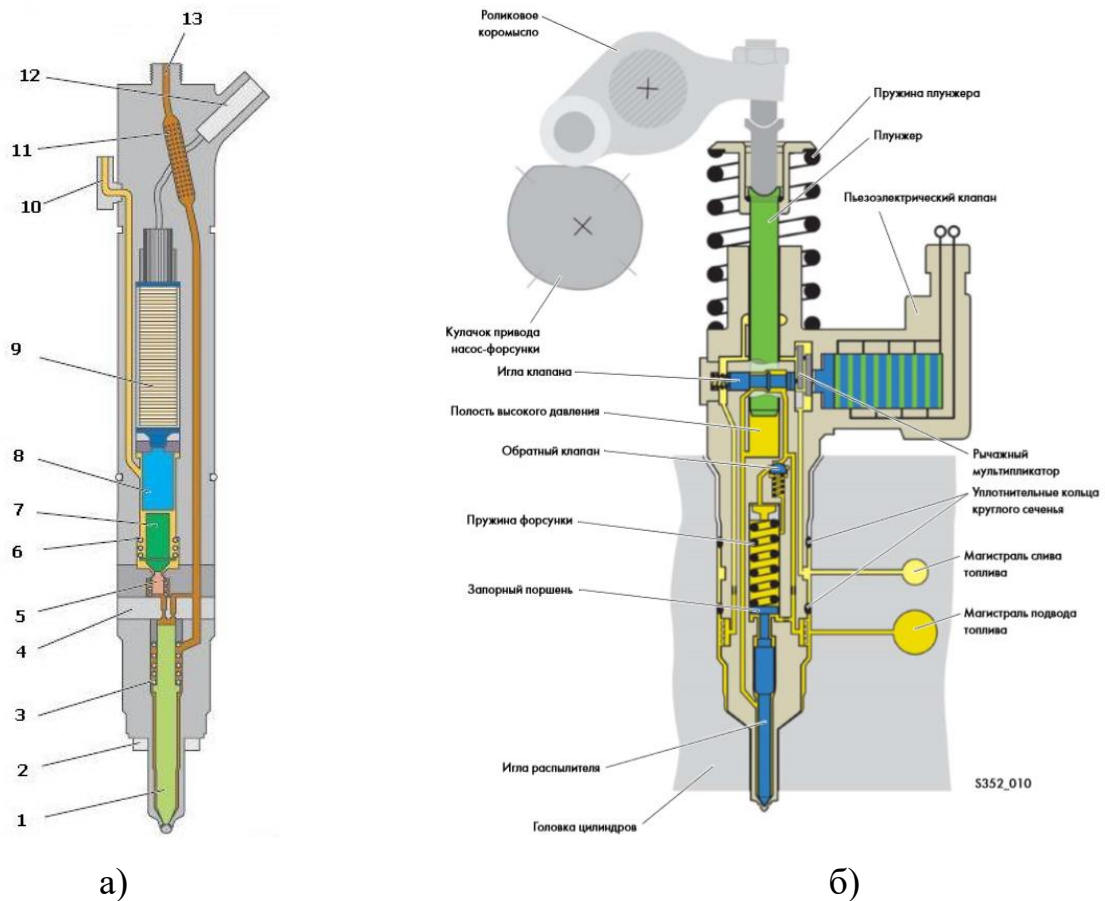


Рисунок 1.11 – Пристрій насос-форсунки 1-го (а) і 2-го (б) покоління: 1 – голка форсунки 2 – ущільнення; 3 – пружина голки; 4 – блок дроселів; 5 – перемикаючий клапан; 6 – пружина клапана; 7 – поршень клапана; 8 – поршень штовхача; 9 – п'єзоелемент; 10 – зливний канал; 11 – сітчастий фільтр; 12 – електричний роз'єм; 13 – нагнітальний канал

Отже, з інструкції [63] відомо, що товщина однієї п'єзошайби клапана дорівнює приблизно 0,08 мм, а її приріст під дією прикладеної напруги становить всього 0,15 %. До складу насос-форсунки входять складальні стовп з важливим мультиплікатором (механічний підсилювач) для збільшення ходу п'єзоприводу з 0,04 мм до 0,1 мм. На рис. 1.12 наведені рисунки, що пояснюють роботу п'єзоперетворювача з мультиплікатором.

Однак, при подальшому підвищенні тиску впорскування (до 220 МПа) для підвищення ефективності системи необхідне застосування безпосереднього приводу голки розпилювача. В [31] розглянуто тенденції застосування ІПП.

Сучасні типи кераміки мають необхідні властивості, невисоку вартість і

низькі витрати електричної енергії на їх привід. Однак, в [31] стверджується, що нове покоління електромагнітних клапанів в змозі скласти конкуренцію п'єзоактуатору. Нові типи форсунок на основі ПП дозволять перейти до багатофазного вприскування, що дозволить поетапно створити «гомогенний» дизель і забезпечити заходи по зниженню рівня шуму його роботи. Можливості впроваджуваних систем дозволяють більш якісно перейти на управління процесом згоряння. Нові технології регульованих розпилювачів CVN і HADI відкривають нові можливості в управлінні робочим процесом. Однак, застосовувані заходи не повинні значно збільшувати вартість готової форсунки.

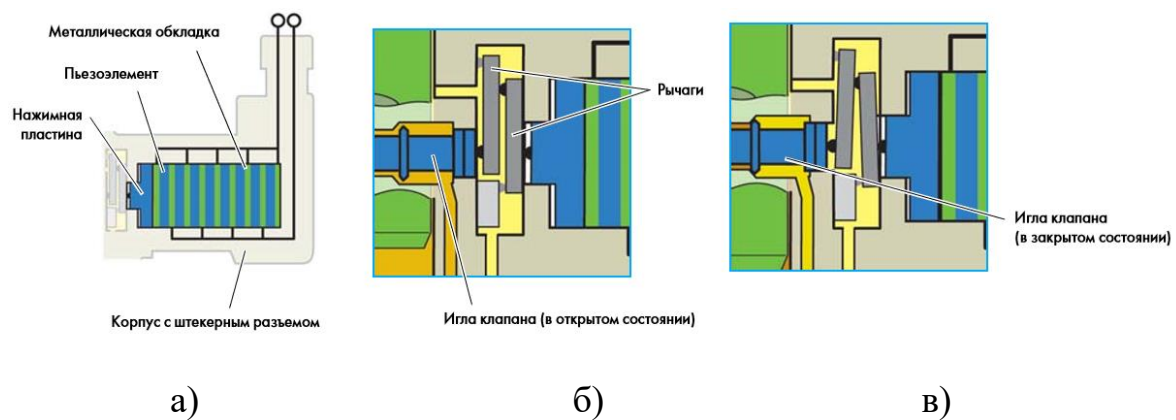


Рисунок 1.12 – Схематичне зображення ПП і мультиплікатора: а – п'єзоприводи; б – мультиплікатор в початковому положенні; в – мультиплікатор в робочому положенні

Все це дає змогу стверджувати, що можливе заміщення електромагнітного перетворювача на п'єзоелектричний в клапані подачі газу в судновий дизель-генератор, габаритні розміри, робочий хід елементів якого значно перевищує розміри автомобільних дизелів. Тому, подальші дослідження будуть спрямовані на розробку конструкції та моделей п'єзоперетворювачів приводу клапану подачі газу, визначення варіанту управління.

1.4 Загальна методика дисертаційного дослідження

1.4.1 Вибір теми наукового дослідження

Вибір напрямку наукового дослідження заснований на проведеній

експертній оцінці можливих варіантів вирішення задачі зниження аварійності та поліпшення роботи систем подачі газу за наступними критеріями: актуальність, наукова новизна, економічна ефективність, відповідність паспорту спеціальності, а також основних напрямках наукової спеціальності і наукової школи [10, 23, 68].

Виконана експертна оцінка значимості досліджень по технологічному вдосконаленню елементів системи подачі газу показала, що на сучасному етапі розвитку судових КІС подачі газу, даний варіант вирішення поставленого завдання всебічно вивчений і не є актуальним.

Конструкційне вдосконалення елементів, які застосовані в системах в даний час, також досягло свого максимуму.

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

З огляду на обраний напрям наукового дослідження, а також на підставі результатів аналізу інформаційного пошуку, виконаного в першому розділі, була визначена тема наукового дослідження – створення судової КІС для поліпшення системи подачі газу в судовий дизель-генератор на базі п'єзоперетворювачів.

Основним обґрунтуванням вибору теми досліджень також є наступне:

– судові двохпаливні дизеля, обладнані устаткуванням подачі газу з електронним управлінням, широко застосовуються на різних типах торгових суден в якості як головних, так і допоміжних двигунів;

– при їх експлуатації внаслідок раптового виходу з ладу клапану подачі газу знижується безпечна і ефективна робота судна, що призводить до зупинки двигуна;

– якщо судно обладнано електричною пропульсивною установкою, то втрата управління судном в складних умовах, може привести до трагічних наслідків, багатомільярдних втрат і техногенної катастрофи.

Важливість проведення досліджень, пов'язаних з питаннями підвищення безпеки плавання, підтверджується програмою економічних реформ, що проводяться в Україні, а також 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.).

Актуальність теми дослідження базується на запиті практики про необхідність пошуку нових шляхів зниження аварійності та поліпшення системи подачі газу в судновий дизель-генератор.

Наукова спрямованість досліджень відповідає паспорту спеціальності; профілю досліджень, що проводяться кафедрою технічної експлуатації флоту Національного університету "Одеської морської академії"; основними напрямками спеціальністю 05.13.05 – комп'ютерні системи та компоненти.

Наукові дослідження виконувались відповідно до тематики держбюджетної науково-дослідної роботи Національного університету «Одеської морської академії» за темою «П'єзоелектричний привод впускного клапану двохпаливного ДВЗ» (№ ДР 0117U002744), в розробці якої автор брав участь як відповідальний виконавець.

Як **об'єкт дослідження** в дисертації обрані робочі процеси в комп'ютерно-інтегрованій системі подачі газу в судновий дизель-генератор.

Предметом дослідження є моделі та методи поліпшення комп'ютерно-інтегрованої системи подачі газу в судновий дизель-генератор.

1.4.2 Обґрунтування мети і завдань дисертаційного дослідження

З огляду на тему дисертаційного дослідження, була сформульована мета роботи – підвищення безпеки судноплавства шляхом розробки методів та моделей поліпшення (покращення, удосконалення) системи подачі газу в судновий дизель-генератор за рахунок застосування п'єзоелектричних перетворювачів.

Було висунуто гіпотезу наукового дослідження, сутність якої полягає в

підвищенні енергетичної та екологічної ефективності двофазного дизель-генератора за рахунок застосування п'єзоелектричних перетворювачів в складі комп'ютерно-інтегрованої системи подачі газу дизеля з електронним управлінням для підвищення безпеки експлуатації судна.

Головне завдання дисертаційного дослідження – розробка апаратних засобів позиціонування клапану подачі газу на базі п'єзоелектричних перетворювачів.

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

- 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.

Рішення головного завдання в дисертаційному дослідженні можливе виконати шляхом синтезу наукових результатів рішення допоміжних завдань.

1.4.3 Системний підхід при розробці структурно-логічної схеми дослідження

Використання системного аналізу та системного підходу до вирішення наукової задачі дозволяє оцінити всі фактори, які дозволяють досягти

поставленої мети та визначити оптимальні способи їх досягнення [2, 4]. Визначення «система» відноситься до філософської категорії наукового пізнання, а комплекс допоміжних завдань, що вирішуються в будь-якому дисертаційному дослідженні, переводить це поняття в категорію складних систем. При вирішенні науково-прикладних задач розглядаються складні системи, що складаються з великого числа окремих елементів, які знаходяться між собою у взаємозв'язку і взаємодії.

Слід зазначити, що в дисертаційному дослідженні було розроблено структурно-логічну схему, яка є замкнутим циклом наукового дослідження (рис. 1.13).

Тема дисертаційної роботи сформульовано на основі «запиту практики» – необхідність пошуку нових шляхів покращення комп'ютерно-інтегрованої системи подачі газу в судновий дизель-генератор для підвищення безпеки судноплавства.

Вирішення головного завдання полягає в зниженні аварійності та поліпшенні комп'ютерно-інтегрованої системи подачі газу судового дизель-генератора за рахунок застосування п'єзоелектричних перетворювачів.

В дисертаційному дослідженні висунуто і підтверджено наукове положення: поліпшення комп'ютерно-інтегрованої системи подачі газу судового дизель-генератора можливо за рахунок застосування п'єзоперетворювачів.



Рисунок 1.13 – Структурно-логічна схема дослідження

Висновки до розділу 1

1. Проведено аналіз роботи комп'ютерно-інтегрованої системи (КІС) подачі газу в суднові двопаливні дизель-генератори. Відзначено недоліки та переваги. В судновій енергетиці знайшли поширення двопаливні ДВЗ (DF), які працюють або на рідинному паливі, або на суміші газу та рідинного палива, яке використовується як запальна порція. Це дозволяє зменшити викиди в довкілля та утилізувати випаровування газу з вантажних танків.

2. Розглянуто характеристики КІС подачі палива фірми Wärtsilä. Встановлено, що подальше підвищення її роботоздатності можливе за рахунок удосконалення шляхом заміни електромагнітного перетворювача.

3. Проведено аналіз існуючих та перспективних типів клапанів, а саме цифрових гідро- та пневмо- клапанів, які знайшли поширення в рамках четвертої промислової революції. Доведено, що вдосконалення перетворювачів електромагнітного типу в конструкторсько-технологічному напрямі в даний час практично вичерпані, що не створює перспективи в їх застосуванні, а значить – актуальна розробка КІС з перетворювачами на базі нових фізичних принципів.

4. Показана можливість використання п'єзоелектричних перетворювачів. Проведено аналіз їх властивостей та особливостей застосування. В результаті визначення переваг п'єзоелектричних перетворювачів в порівнянні з електромеханічними, в дисертаційному дослідженні поставлено завдання розробити теоретичні та практичні положення, які дозволять розробляти п'єзоелектричні перетворювачі для застосування в клапані подачі газу, який входить до складу КІС подачі палива в судновий дизель-генератор серії DF.

5. Проведено обґрунтування мети і завдань дисертаційного дослідження. Визначені гіпотеза, задачі дослідження. Отримана технологічна карта наукового дослідження.

Основні результати розділу 1 опубліковані в [41, 42, 55] або Додатку 9 [1, 10, 16].

РОЗДІЛ 2

МОДЕЛІ ТА МЕТОДИ ПОКРАЩЕННЯ СИСТЕМИ ПОДАЧІ ГАЗУ В СУДНОВИЙ ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОР

2.1 Формування вимог до перетворювача електричного сигналу в механічне переміщення

У таблиці 2.1 представлені необхідні додаткові функції нового клапана подачі газу, які сформульовані Хейккілем [88].

Таблиця 2.1 – Необхідні і додаткові функції нового клапана подачі газу

Demand / Option	Requirement	Notes
Demand	Adjustable flow rate	Maximum gas flow ~500 l/min at normal conditions
Demand	Small and constant response time	< 5 ms
Demand	Ability to operate in large pressure difference	0 – 0.5 MPa
Demand	High vibration resistance	
Demand	High fault tolerance	
Demand	Working temperature 0 - 80 °C	Depends on surroundings
Demand	Gas should be mixed with air as well as possible	
Demand	Energy saving	For example differential connection using hydraulics
Demand	Operation time 18 000 hours, count of cycles 360 million.	
Demand	Early closing intake valve Miller cycle	
Option	Independence of pressure difference	
Option	ATEX (Zone 1 or Zone 2)	Depending on position of controlling electronics

Найбільш важливими вимогами є регульована витрата газу, малий і постійний відгук, здатність працювати при великій різниці тисків і відмовостійкості. Незважаючи на те, що операція з великою різницею тиску є вимогою, невелика різниця тисків завжди є необхідною функцією, оскільки підвищення тиску газу збільшує витрати.

На рис. 2.1 наведено часові діаграми відкриття клапану подачі газу

SOGAV-250 в градусах кута обертання колінчатого валу ДВЗ [41, 42, 98, 99].

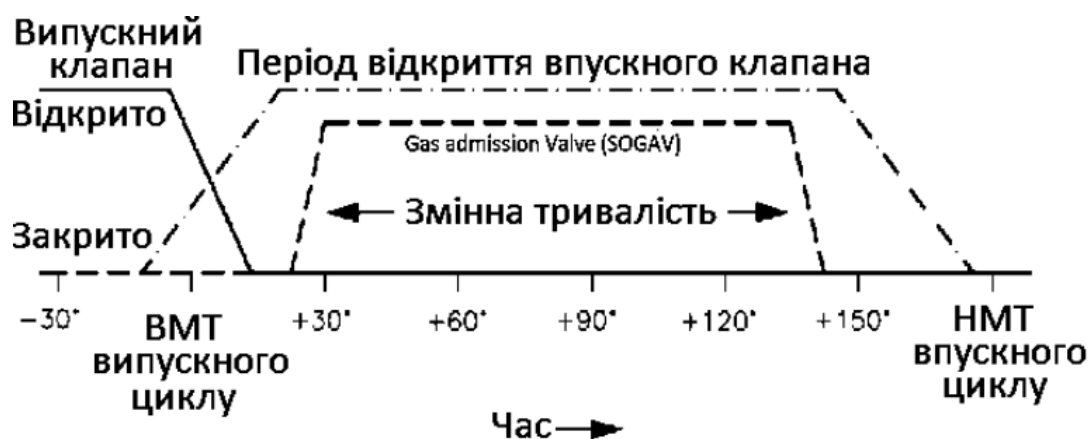


Рисунок 2.1 – Часова діаграма відкриття клапану

На теперішній час висунуто експлуатаційні вимоги до SOGAV – 250 (табл. 2.2) [41, 42, 98].

Таблиця 2.2 – Експлуатаційні вимоги до електричної частини клапану

Параметр	Значення
Час до повного відкриття / закриття, сек. (мах)	0,002
Ліміт току, А (не більше ніж 2 сек.)	10
Ліміт напруги, В	24
Період надходження імпульсів керування, с	0.078
Максимальні витоки в закритому стані, м ³ /ч (0,0048 м ³ /мін)	0,28
Величина переміщення пластини клапану, мм	~ 0,4 (0,38–0,43)
Максимальний тиск газового палива P1/ продувного повітря P2, Бар (абсолют)	5 / 3
Максимальна різниця тисків P1–P2, Бар	2
Максимальна температура газового палива, °С	80
Робоча температура газового палива, °С	5–45
Робоча температура продувного повітря, °С	30–55

В результаті аналізу вимог, які наведені в табл. 2.1 і 2.2, були встановлені найбільш критичні: час до повного відкриття/закриття; величина переміщення пластини клапану; максимальна різниця тисків.

Тому подальше підвищення ефективності КІС подачі газу можливе за рахунок удосконалення як приводу виконавчого механізму, так і механічної конструкції згідно принципу мінімізації.

В таблиці 2.3 показано, як були визначені сили, а на рис. 2.2 баланс сил клапана [88].

Таблиця 2.3 – Силкові рівняння

Force	Equation
$F_{A\text{-chamber}}$	$p_A * A_{A\text{-chamber}}$
$F_{B\text{-chamber}}$	$p_B * A_{B\text{-chamber}}$
F_{air}	$3 * A_{\text{gas}} * p_{\text{intake air}}$
F_{cylinder}	$3 * A_{\text{valve head}} * p_{\text{initial cylinder}}$
F_{mass}	$3 * m_{\text{poppet valve}} * a_{\text{gravitational}}$

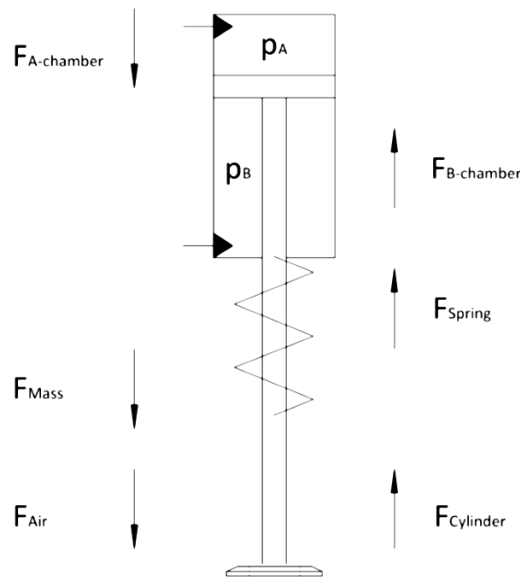


Рисунок 2.2 – Баланс сил, які діють на клапан

На рис. 2.2 зображено сили, які діють на клапан з гідروциліндром: $F_{A\text{-chamber}}$ – сила, яка діє з боку гідравлічного циліндра А; $F_{B\text{-chamber}}$ – сила, яка діє з боку гідравлічного циліндра В; F_{Spring} – сила, що діє з боку блока пружин, який притискає тарілки розпилу газу; F_{Cylinder} – сила що діє з боку газів, що утворюються в циліндрі; F_{Mass} – сила тяжіння, що діє на клапан; F_{Air} – сила, яка діє з боку повітря, що надходить до камери згоряння.

2.2 Процеси в п'єзрезонаторі та можливі конструкції п'єзоперетворювачів

Традиційний математичний апарат, який використовується для опису процесів у п'єзоактивному середовищі з різними способами перетворення

енергії, має як об'єкт різні ПР: в основному, з однією чи двома парами електродів для актуатора зі складального стовпця з рівнобіжним з'єднанням електродів, а також для ПЕД [3, 14 – 19, 21, 33 – 36, 70, 71, 72, 73, 74 та ін.]. При цьому підході механічні зсуви описуються однорідним хвильовим рівнянням, на основі рішення якого складається схема заміщення. Для кожного конкретного випадку перетворення енергії електричні параметри визначаються на основі аналізу схеми заміщення ПП.

Розгляд процесів електромеханічного перетворення енергії в ПП важливий не тільки з позицій оцінки енергетичних можливостей, але і з погляду створення адекватної їм математичної моделі.

Дослідження і розрахунок стаціонарних режимів у ПП дозволяє оцінити якісно і кількісно експериментальні залежності ПП і їхні аналітичні вирази в умовах дії сильних збурень, оцінити багатомірні статичні моделі.

Дослідження динамічних властивостей ПП дозволяє визначити функціональні принципи побудови приводу клапану подачі газу на їхній основі в силу багатомірного характеру фізичних процесів у них, що зв'язані з особливостями п'єзоелектриків [15, 18, 34, 36, 70]. При цьому основну роль грають динамічні властивості, що зв'язані з частотними обмеженнями і визначаються кінцевою швидкістю поширення зовнішніх впливів у ПП, таких як процеси, що виникають в клапанах подачі газу, постійне або перемінне навантаження.

Параметри ПП у динамічних режимах, у загальному випадку, є нелінійними і визначаються не тільки параметрами п'єзоматеріалу, топологією і станом (поляризацією) ПР, типом коливань і способом перетворення електромеханічної енергії, але й амплітудою і швидкістю зміни вхідних впливів [13]. Аналіз процесів у ПП у динамічних режимах середі, розподілення, нелінійності і багато зв'язаності його параметрів становить значних математичних труднощів.

Зазвичай процеси в п'єзоелектриках описують за допомогою матричних п'єзоелектричних рівнянь (фундаментальних рівнянь елементарного об'єму

п'єзоелектричної середі і рівняння руху, хвильового рівняння), причому їхні рішення справедливі в режимі стаціонарних резонансних коливань для одномірного випадку (вузькому діапазоні частот різних чи близьких до резонансної частоти f_P). Складні (двох- і тривимірні) задачі з додатковими граничними умовами практично вивчені мало.

Так, у [22, 30, 57, 58, 66] процеси в п'єзоелектриках описують за допомогою матричних п'єзоелектричних рівнянь (фундаментальних рівнянь елементарного об'єму п'єзоелектричної середі і рівняння руху (хвильового рівняння), причому їхні рішення справедливі в режимі стаціонарних резонансних коливань для одномірного випадку (вузькому діапазоні частот різних чи близьких резонансній частоті f_P). Складні (двох- і тривимірні) задачі з додатковими граничними умовами практично вивчені мало [25]. У роботах [25, 35, 61] в основному приводяться ряд загальних положень. Наприклад, у роботі [61] розглянуті в загальній формі динамічні властивості керованого п'єзо ефекту в п'єзоелектрику, обумовлені інерцією його вхідного ланцюга, часом встановлення електричного поля в п'єзоелектрику, часом установа стану поляризації, інерцією процесів на перемінному струмі.

Складність ПП, які являють собою нелінійну систему з розподіленими параметрами і нестаціонарними властивостями та мала вивченість процесів у п'єзоприводах обумовлює необхідність використання експериментальних методів визначення їхніх динамічних характеристик.

В пристроях автоматики робота актуатору та п'єзодвигуну здійснюється в основному в перехідних режимах відпрацьовування різного роду збурень, спрямованих на керування вихідним параметром, що вимагає знання їхніх динамічних характеристик.

Процеси електромеханічного перетворення енергії в п'єзоперетворювачах, до яких належать актуатори та лінійний і роторний двигуни важливі не тільки з позицій оцінки енергетичних можливостей, але і з погляду створення адекватної їм структурної та математичної моделей.

Процеси в ПП характеризуються сукупністю величин, що відображають

ступінь взаємодії різних фізичних ефектів (в основному, зворотного і прямого п'єзоефектів, а в цілому первинних ефектів і ефектів більш високого порядку) [3, 5, 9, 15, 19, 25, 28, 30, 34, 36, 61, 71].

Якість п'єзокераміки характеризується наступними, прийнятими за кордоном, основними параметрами [3, 15, 16, 35, 36, 61, 73]: $K_{ТЗЗ}$ ($\epsilon_{ТЗЗ}/\epsilon_0$) – відносна діелектрична проникність; $tg \delta$ – тангенс кута діелектричних втрат при частоті 1 кГц у слабких полях; T_c (T_k) – температура крапки Кюрі; K_p , K_{33} , K_{31} , K_{15} – коефіцієнти електромеханічного зв'язку; d_{33} , d_{31} , d_{15} – п'єзоелектричні модулі; g_{33} , g_{31} , g_{15} – електричні коефіцієнти по напрузі; Y_{E11} , Y_{E33} – модулі Юнга; N_L , N_T , N_R – частотні постійні; S_{E11} , S_{E33} – параметр еластичності; ρ – щільність; Q_m – механічна добротність.

Для опису стаціонарних режимів у вузькій області частот поблизу резонансу використовують лінійні п'єзоелектричні рівняння. Наприклад, для ПР (з поперечною поляризацією) системи п'єзоелектричних рівнянь у загальному випадку мають вид [15, 16, 17, 18, 36, 34, 70]:

$$S=S^E T+d_t E; D=d T+\epsilon^T E, \quad (2.1)$$

де S^E – постійна пружності; ϵ^T – діелектрична постійна; верхній індекс (E , T) означає вимір константи при постійному значенні величини, зазначеної в індексі; нижній індекс t означає транспоновану матрицю; константи між собою взаємозалежні [35, 36].

Рішення рівняння (2.1) для ПР із поперечною поляризацією (уздовж осі Z) розглядають при наступних обмеженнях: усі механічні напружки, крім T_1 , дорівнюють нулю на вільних поверхнях; електричне поле E рівномірне по ($E_1=E_2=0$) всьому об'єму, тому що товщина a і ширина b малі в порівнянні з довжиною l . З урахуванням цих особливостей (матеріалу і конструкції ПР) можна одержати:

$$S_1=S^E_{11} T_1+d_{31} E_3; \quad D_3=d_{31} T_1+\epsilon^T_{33} E_3,$$

де S_1 , T_1 , E_3 , D_3 – компоненти вектору, відповідно, деформації, механічної

напруги, електричного поля і зсуву [21].

В основі всіх ПР лежать п'єзоелементи з двома типами поляризації: поперечною (рис. 2.3, а) і подовжньою (рис. 2.3, б).

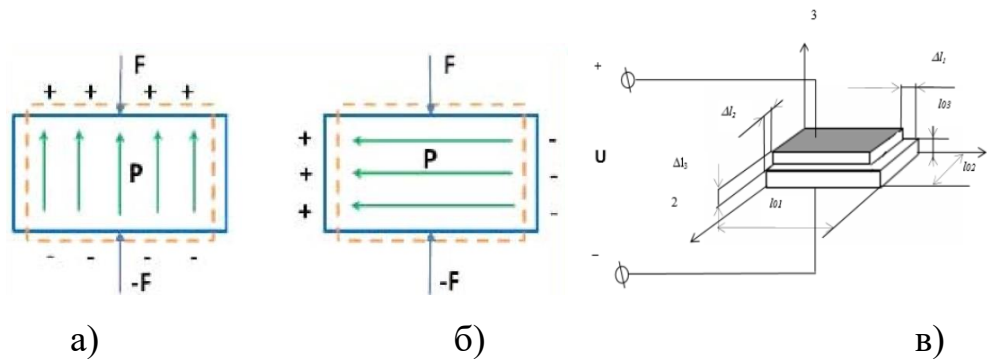


Рисунок 2.3 – П'єзрезонатор пластинчастого типу з поперечною (а) і подовжньою (б) поляризацією, варіанти деформації (в)

Рівняння для зсуву ПР

$$D_3 = \varepsilon_{33}^T E_3 + \frac{d_{31}}{S_{11}^E} S_1. \quad (2.2)$$

Для попереднього розрахунку основних конструкцій ПР із метою визначення деформації і зусилля, що розвивається, у залежності від геометричних розмірів і властивостей кераміки, що використовується, будемо керуватися співвідношеннями, які представлено в таблиці 2.4 [28, 38].

Слід зазначити, що остаточний розрахунок, зазвичай, не здійснюється, оскільки кожного разу відбувається остаточна доводка нового конструктивного рішення «руками».

Але не завжди є можливість отримати збільшене переміщення. На рис. 2.4 наведено конструкції різних конструкцій актуаторів, які забезпечують переміщення зі збільшенням ходу [8].

На рис. 2.4, а представлена пакетна конструкція, яку побудовано на основі актуаторів пакетного типу і може складатися з дисків, кілець, циліндрів і т. ін.

Таблиця 2.4 – Оцінні розрахунки параметрів актуаторів різних конструкцій

Параметр	Біморфна, консольно забита пластина (деформація кінця консолі)	Складальний пакет пластин, що працює на подовжньому п'єзоєфекті	Елемент, що працює на поперечному п'єзоєфекті
			
Деформація під дією керуючого поля Δ_E , м	$\Delta_E = \frac{3}{4} d_{31} U \frac{l^2}{h^2}$	$\Delta_E = N d_{33} U = d_{33} E \Delta_E = d_{31} E l = d_{31} U \frac{l}{h}$	
Деформація під дією зовнішнього навантаження Δ_F , м	$\Delta_F \cong \frac{1}{2} F_C l^3 / (Y_{11} b h^3)$	$\Delta_F = F_C l / (S_0 Y_{33})$	$\Delta_F = F_C l / (S_0 Y_{11})$
Коефіцієнт пружності K_y , Н/м	$K_y \cong 2 Y_{11} b h^3 / l_3$	$K_y = S_0 Y_{33} / l = S_0 Y_{33} / (N l_0)$	$K_y = S_0 Y_{11} / l = Y_{11} b h / l$
Коефіцієнти прямого і зворотного п'єзоєфектів K_{Π} і K_O , Н/В	$K_{\Pi} = K_O = \frac{3}{2} Y_{11} d_{31} \frac{l_1 l_2}{l_3}$	$K_{\Pi} = K_O = S_0 Y_{33} d_{33} / l_0$	$K_{\Pi} = K_O = Y_{11} d_{31} l_2$
Електрична ємність C_0 , Ф	$C_0 \cong 1,8 \varepsilon_0 \varepsilon_{33} b l / h$	$C_0 = \varepsilon_0 \varepsilon_{33} (1 - ((d_{33})^2 Y_{33} / (\varepsilon_0 \varepsilon_{33}))^2) N S_0 / l_0$	$C_0 = \varepsilon_0 \varepsilon_{33} (1 - ((d_{31})^2 Y_{11} / (\varepsilon_0 \varepsilon_{33}))^2) l_1 l_2 / l_3$
Еквівалентна приведена маса m_{Σ} , кг	$m_{\Sigma} = m_0 + 0,243 \cdot m_K$	$m_{\Sigma} = m_0 + 0,382 \cdot m_K$	$m_{\Sigma} = m_0 + 0,382 \cdot m_K$
Власна частота (при $m_0=0$; $U=0$) ω_M , с ⁻¹	$\omega_M = 2,03 \frac{h}{l^2} \sqrt{\frac{Y_{11}}{\rho_M}}$	$\omega_M = \frac{1,58}{l} \sqrt{\frac{Y_{33}}{\rho_M}}$	$\omega_M = \frac{1,58}{l} \sqrt{\frac{Y_{11}}{\rho_M}}$

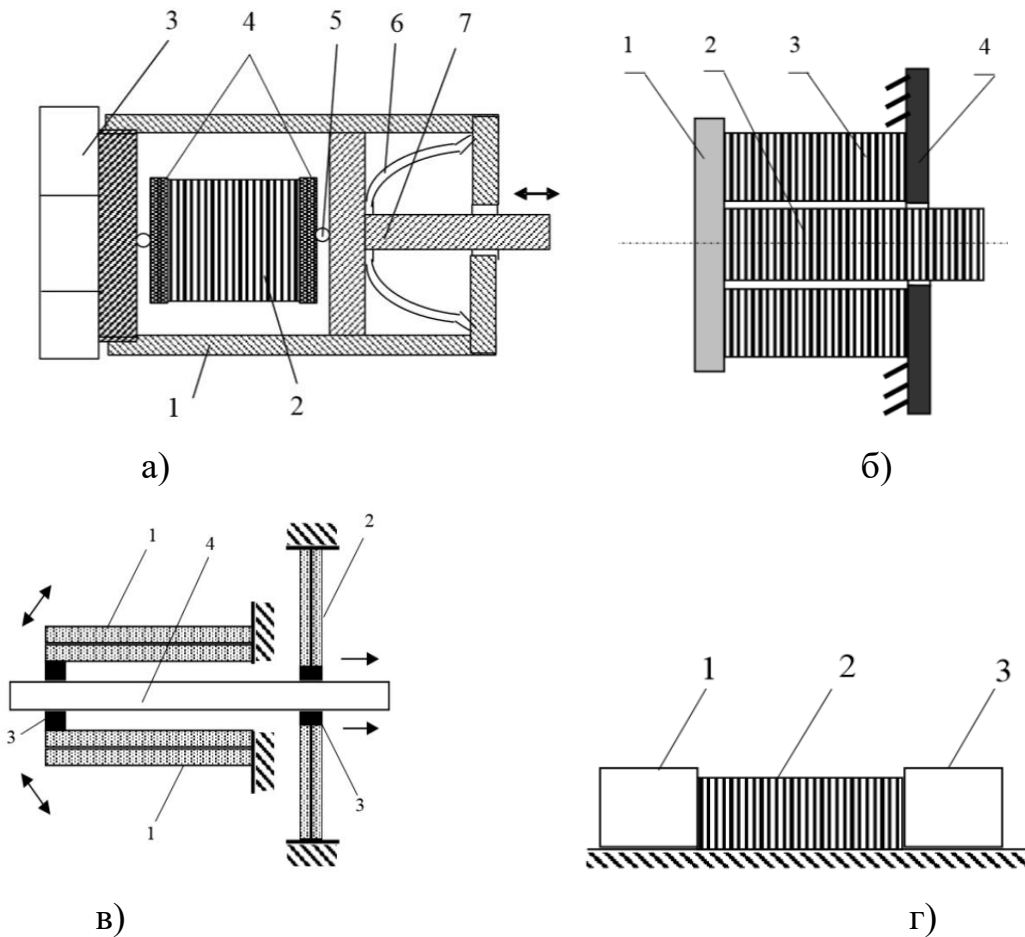


Рисунок 2.4 – Конструкції актуаторів: а – пакетний п'єзодвигун; б – диференціальна конструкція п'єзодвигуна; в – кроковий двигун з біморфним активним елементом; г – кроковий двигун з активним елементом пакетного типу

Жорсткість такої конструкції дозволяє забезпечувати максимально можливе зусилля серед усіх п'єзоелектричних конструкцій: 1 – корпус двигуна; 2 – п'єзопакет; 3 – гвинт; 4 – прокладки, що передають зусилля; 5 – сталеві центрувальні кульки; 6 – тарілкова пружина; 7 – шток. Такий двигун може розвивати чималих зусиль (до 200 Н) і служить для лінійних мікропереміщень об'єктів з досить великою масою (десятки кг).

На рис. 2.4, б приведена диференціальна конструкція, яку виконано на елементах пакетного типу, що дозволяє компенсувати температурну похибку (теплове розширення робочого елемента) і збільшити діапазон переміщень без суттєвого збільшення величини керуючої напруги і габаритів двигуна: 1 – підстава, яка рухається; 2, 3 – складальні стовпи, 4 – нерухома основа.

На рис. 2.4, в наведена конструкція крокового двигуна на основі біморфних п'єзоелементів: 1 – фіксуєчі ПЕ; 2 – робочі ПЕ; 3 – фрикційні прокладки; 4 – переміщуваний об'єкт.

На рис.2.4, г наведена конструкція крокового двигуна: 1, 3 – фіксуєчі елементи; 2 – складальний стовп.

Слід зазначити, що явище прямого п'єзоефекту утрудняє формування керуючого поля, особливо при реалізації динамічних процесів, які швидко протікають. При аналізі динаміки актуатора малої ємності (біморфні елементи) нехтують малою електростатичною постійною часу $T_E = R_{BT}C_0$. При керуванні ж актуатором великої ємності для компенсації явищ, зв'язаних із прямим п'єзоефектом, застосовуються спеціальні технічні міри, такі, як організація спеціальних швидкодіючих контурів регулювання керуючого поля, включення в схему підсилювача додаткових діодів, що утворюють ланцюги замикання наведених струмеінів [8, 37, 38].

Для випадку клапану подачі газу з п'єзоперетворювачем варто враховувати, що, якщо робочі частоти в системі лежать значно нижче частоти першого механічного резонансу, розподілення його параметрів і самого п'єзоперетворювача у першому наближенні можуть не прийматися в увагу. Однак у клапані з п'єзоперетворювачем є практична можливість реалізації керованих рухів, спектри яких містять частоти, що перевищують частоту резонансу комплексу клапан–п'єзоперетворювач, особливо, коли необхідно дістати переміщення більш 1 мм. А це вимагає обережності в питаннях зневаги розподілення параметрів і при використанні спрощеної моделі. Однак у нашому випадку переміщення складає 0.4 мм, тому можна використовувати спрощені моделі.

При складанні динамічних моделей актуатора з розподіленими параметрами необхідно пам'ятати про те, що швидкість поширення звукової хвилі в п'єзоматеріалі в загальному випадку залежить від граничних умов на «електричній» стороні. Відомо, наприклад, що швидкість звуку в п'єзопластині, що працює на поперечному п'єзоефекті, при наявності на бічних гранях

суцільних електродів, що вирівнюють потенціал поля уздовж пластини, завжди визначається модулем Юнга Y для випадку короткозамкненої пластини незалежно від того, розімкнуті її електроди чи замкнуті між собою в дійсності. У міжелектродному просторі окремих п'єзопластин, що працюють на подовжньому п'єзоєфекті, швидкість поширення звукової хвилі трохи вище і визначається модулем Юнга $Y_D > Y$ для режиму холостого ходу пластини. Відомо, що динамічні властивості складеного актуатора з ростом кількості N п'єзошайб у складальному стовпі наближаються по асимптоті до властивостей однорідного пружного стрижня, що характеризується швидкістю поширення звуку, яка дорівнює швидкості звуку в короткозамкненої пластини. У складальному стовпі «вирівнювання» поля здійснюється за рахунок рівнобіжного з'єднання електродів, що рівномірно пронизують активну зону. Ця дозволяє широко використовувати як складену частину моделей актуаторів за складальних стовпів моделі пасивних стрижнів, а також методи аналізу їхніх динамічних властивостей.

П'єзоелементи в режимі приводу реалізують в основному переміщення, що з достатньою точністю можуть бути зведені до одномірних, що дозволяє в більшості випадків з успіхом використовувати одномірні моделі актуаторів, у яких кожен вузол зв'язаний тільки з двома найближчими сусідніми: попереднім і наступним.

У [37, 38, 45, 74] показано, що, при певних обмеженнях, лінійні п'єзоелектричні двигуни (ЛПД) і обертальні (ПЕД) можуть бути зведені до одномірної механічної моделі.

Для побудови моделі п'єзоелектричного шару, як класичного об'єкта з розподіленими параметрами, використовують співвідношення, які наведені в [37, 38, 45, 56].

Умови рівноваги сил, які прикладені до рухомої границі активної частини, для випадку використання одного шару становить:

$$F_y = F_E - F_d - F_{\text{дин}} - F_C \pm F_{\text{Cylinder}} \pm F_{\text{Mass}} \pm F_{\text{Air}}, \quad (2.3)$$

де $F_y = K_y \Delta$ – зусилля пружної деформації шару, Н; $F_E = d_{\Pi} Y S_0 E$ – зусилля в шарі, яке викликане прикладеним електричним полем, Н; F_C – статичне зусилля (в нашому випадку F_{Spring} , яка виникає внаслідок дії блоку пружин), Н; $F_d = K_d d\Delta/dt$ – зусилля, що демпфірує, у шарі, Н; $F_{\text{дин}} = m_{\Sigma} d^2 \Delta/dt^2$ – динамічне зусилля в шарі, пропорційне швидкості зсуву поршня і викликаними при цьому процесами дисипації енергії в ньому, Н; $K_y = Y S_0 / l_0$ – коефіцієнт пружності шару, 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 камері згорання циліндру 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 [37, 38, 45, 56, 74], згорання якої приводить до наступної передавальної функції ПР, незалежно від типу поляризації і керованого від джерела е.р.с.:

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

де K_3 – коефіцієнт зворотного п'єзоефекту; K_{Π} – коефіцієнт прямого п'єзоефекту; $K_3 = K_{\Pi} = b \cdot Y_{11} \cdot d_{31}$; $R_{\text{вт}}$ – опір генератора вхідного сигналу; C_0 – електрична ємність актуатора; m_{Σ} – приведена маса актуатора 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.

В якості вихідної моделі одного шару стовпа була прийнята структурна

схема, яка запропонована Нікольським А. А [37] (рис. 2.5).

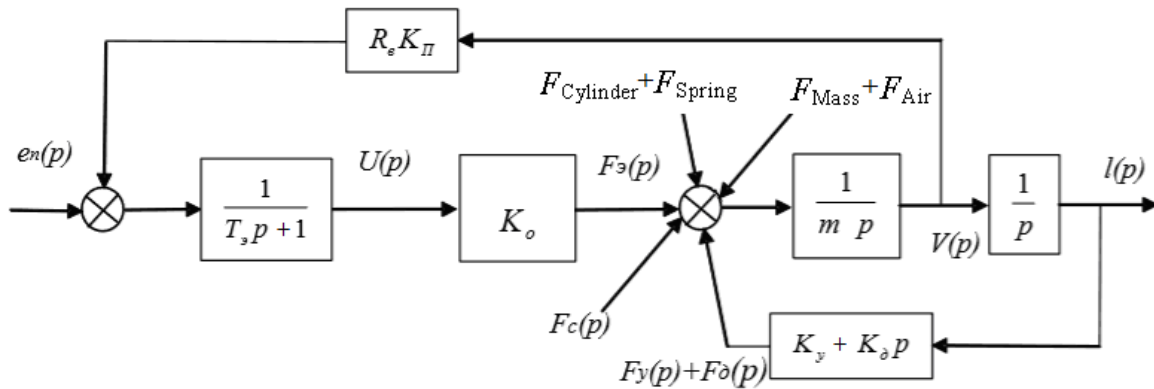


Рисунок 2.5 – Структурна схема п'єзоелектричного шару

2.3 Структурна схема клапану з п'єзоперетворювачем на складальному стовпі

Так, при побудові структурної схеми п'єзоперетворювача зі складального стовпа, варто враховувати, що він буде робити одномірні коливання в системі шар–клапан в області частот до 60 Гц, оскільки частота обертання середньо обертового двигуна становить 800 об/хв. Крім клапану переміщаються також елементи об'єму активної частини складального стовпа, маса якого в даному випадку m_k більше маси клапану. При цьому інерція елементарних об'ємів п'єзоперетворювача, що переміщаються, можна зневажити або, маючи у виді, що складальний стовп закріплений одним кінцем і ця його частина не приймає участі в русі (рис. 2.6, а), уточнити значення сумарної приведені рухомої маси m_Σ , включивши в неї крім маси m_0 частину маси актуатора m_k . Відповідно до комплексу зусиль, що діють на приведені маси m , і рівняння [37, 38, 45, 56, 74], що описують поведження актуатора, складена структурна схема, яку представлено на рис. 2.6, б.

Аналіз структурної схеми вказав на істотну особливість однолінійної моделі, що впливає і полягає в тому, що зусилля в складальному стовпі, які породжені в динаміці керуючим полем, діють безпосередньо тільки на границях активної зони. Усі процеси всередині активної зони протікають винятково під дією пружних зусиль, що демпфують. Останні можуть виникати у внутрішніх

шарах актуатора тільки внаслідок переміщень прикордонних шарів. Зовнішні збурювання «передаються» усередину активної зони через граничні ділянки. Нарешті, внутрішній зворотний зв'язок для складального стовпа з великого числа однакових п'єзошайб визначається тільки різницею швидкостей границь активної зони. Відзначені властивості вказують на виняткову важливість динамічних процесів на границях активної зони п'єзоперетворювача, у той час як рух його внутрішніх шарів подібний процесам у пасивних пружних елементах.

Точність опису складального п'єзоелемента зростає з ростом числа шайб у пакеті.

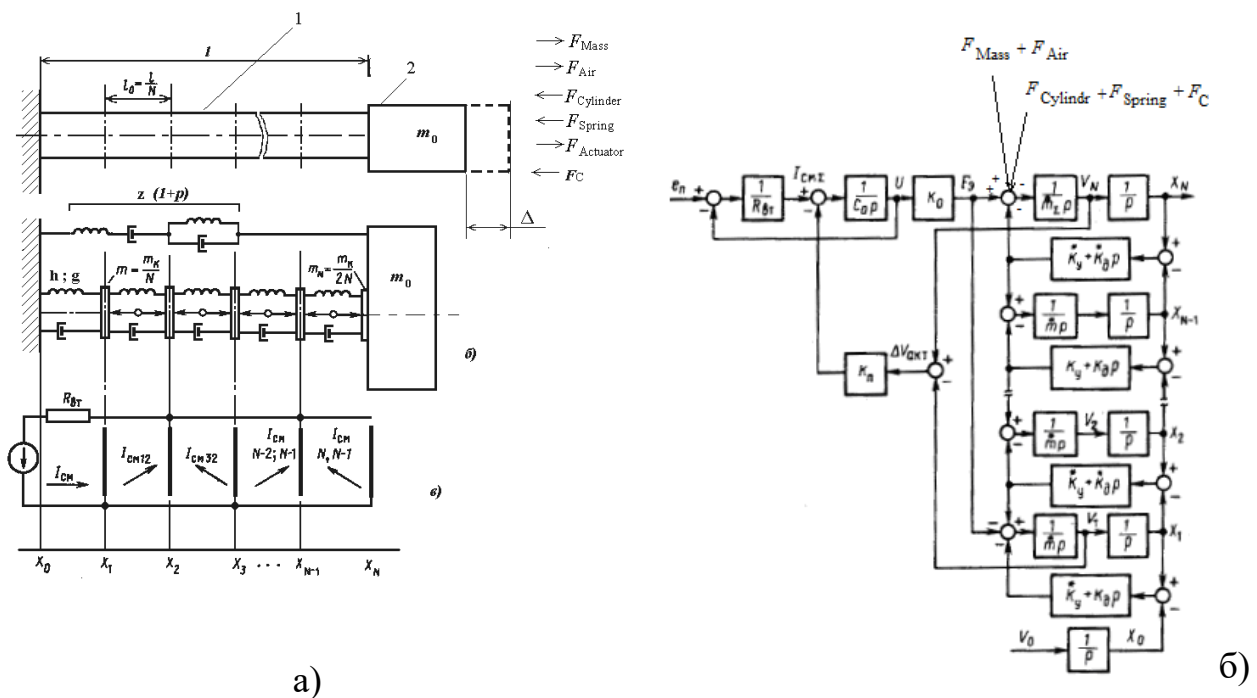


Рисунок 2.6 – Кінематична схема клапану з п'єзоперетворювачем на основі складального стовпа (а) та структурна схема (б) складального стовпа, який закріплено на нерухомій основі у випадку, коли $N_{\text{п'єзостовпа}} \geq 3 \div 5$

Зі збільшенням кількості шайб у стовпі його властивості наближаються до властивостей розподіленого стрижня з параметрами γ і h [37, 38], однак ця модель не прижилася при описі складальних стовпів, на наш погляд, завдяки сучасним середовищам моделювання, які дозволяють працювати з великою кількістю однакових елементів.

2.4 Структурна схема клапану подачі газу на основі лінійного п'єзодвигуна

У [74] Щербіним О. М. запропонована математична модель ЛПД, де п'єзоелемент (в закордонній літературі називається осцилятором) перебуває в постійному контакті з рухомою частиною. В [6, 45] було здійснено перехід до одномірних моделей. На рис. 2.7 показана схема одномірної моделі, яка враховує всі зусилля, які діють в парі ЛПД–клапан.

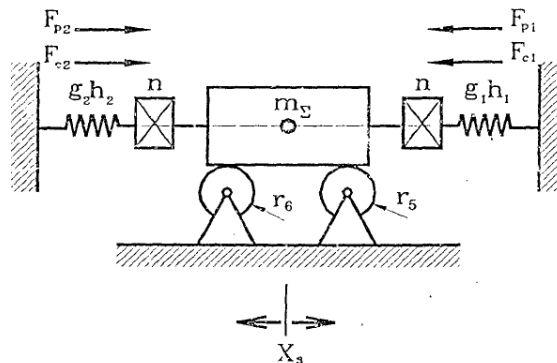


Рисунок 2.7 – Одномірна модель пари ЛПД–клапан

Аналіз сучасних конструкцій ЛПД провідних фірм розробників Physik Instrumente (PI) GmbH & Co. KG [95], ТОВ «Лілея» (м. Київ) та Discovery Technology International [90] довів, що у якості осцилятора реверсивних ЛПД та оберտального ПЕД використовують прямокутний п'єзорезонатор, зовнішній вигляд і схема якого зображені на рис. 2.8, що дозволяє зменшити кількість елементів підтримки осцилятора.

Основною частиною ЛПД є п'єзокерамічна пластина, поляризована вздовж напрямку W (рис. 2.8, *a*). На одну сторону пластини нанесені два позитивних електрода, інша сторона заземлена. При русі вліво або вправо на відповідний електрод подається керуючий синусоїдальний сигнал високої частоти (в діапазоні від 50 до 200 кГц). Під дією прикладеної напруги, п'єзокерамічна пластина деформується (рис. 2.8, *б*), змушуючи переміщатися прикріплений до неї штовхач.

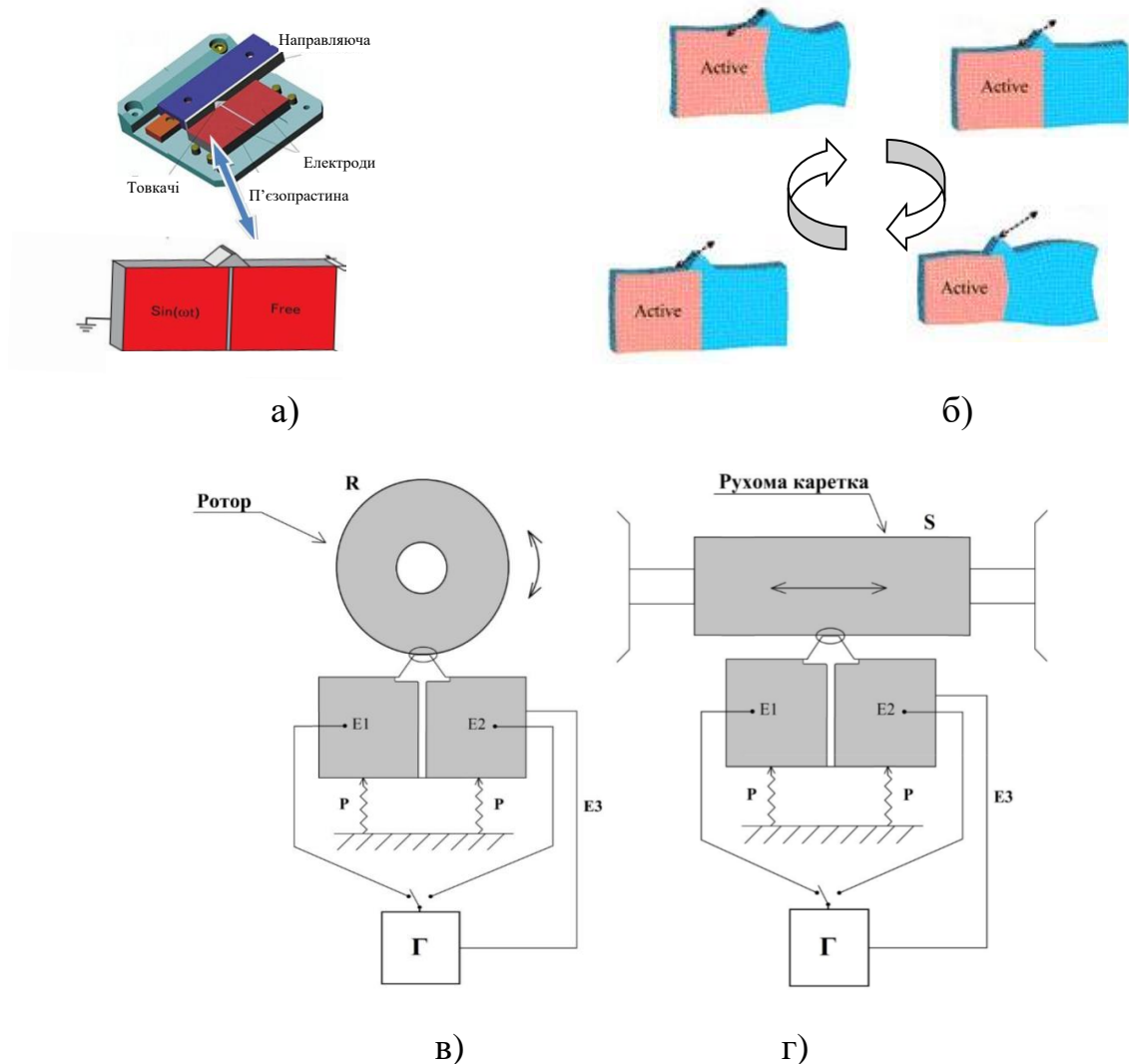
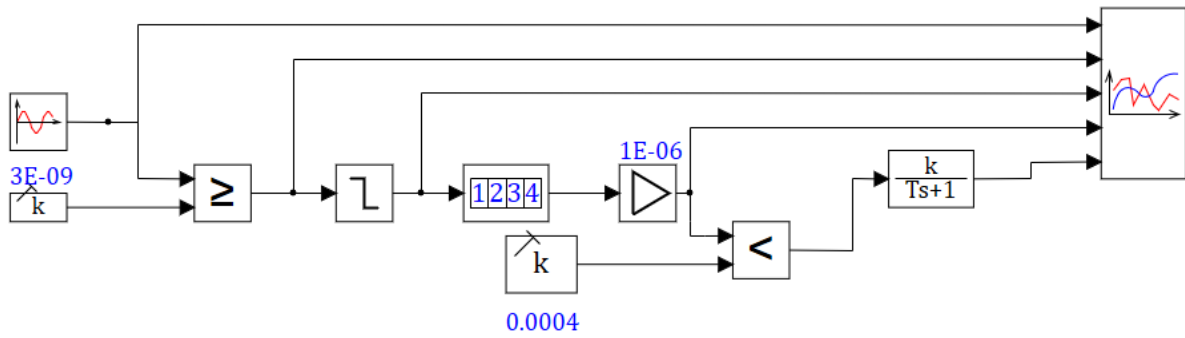
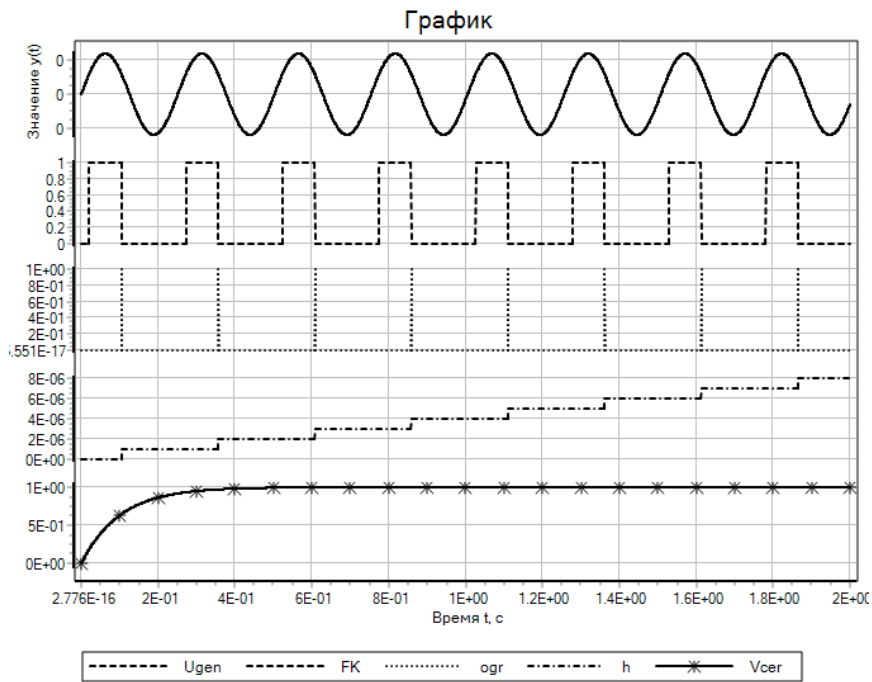


Рисунок 2.8 – Конструкція прямокутного осцилятора ЛПД (а); схема його деформації (б) під впливом синусоїдальної напруги (один цикл коливання п'єзопластини) [96]; схеми обертального ПЕД (в) і ЛПД (г), де R – ротор обертального двигуна, S – слайдер (рухома каретка) лінійного двигуна, E1, E2, E3 – електроди п'єзоелемента, P – пружина, Г – генератор [60]

Теорія фрикційного контакту була розроблена Лавриненко В.В. [26], яка була розвинута в [6, 46, 69], де було отримано варіанти фрикційного контакту (ФК).



а)



б)

Рисунок 2.9 – Модернізована модель фракційного контакту

На рис. 2.9 для побудови моделі використано наступні блоки бібліотеки:

- рівно або більше, що дозволяє відокремити фазу зачиплення ФК;
- блок формування імпульсу по задньому зрізу, який дозволяє зафіксувати наступний крок рухомої каретки;
- лічильник, який підраховує кроки;
- підсилювач, який дозволяє масштабувати кількість імпульсів відповідно кроку рухомої каретки;
- блок інерційна ланка 1-го порядку, який дозволяє зробити зворотне перетворення від координати до середньої швидкості.

При складанні моделі клапану подачі газу з ЛПД були прийняті наступні

обмеження:

а) градієнт температури $\Delta\theta^\circ=0$, тому що підтримувана температура роботи ПР повинна бути постійною;

б) електричний вплив є постійним.

Тому переважне значення мають механічні впливи з боку ЛПД на сам клапан в наслідок дії зворотного п'єзоефекту і з боку клапану на ПР в наслідок прямого п'єзоефекту. Адже саме величина прямого п'єзоефекту дозволяє оцінити навантаження ЛПД з боку клапану, яке проявляється в блокуванні рухомої частини ЛПД.

В [24] запропонована спрощена модель обертального двигуна, а в [67] – модель механічного перетворювача п'єзодвигуна (рис. 2.10), яка враховує не тільки залежність поведінки вихідної координати від керуючих впливів і зовнішніх чинників, а й вплив збурень на внутрішні параметри ПЕД.

Це дозволяє:

- відтворити перехідний процес в двигуні з високою точністю;
- зняти безпосередньо графік параметричної резонансної частоти, який є прихованим параметром двигуна;
- виконати лінеаризацію двигуна;
- дати кількісну оцінку реалізованого на базі моделі методу управління.

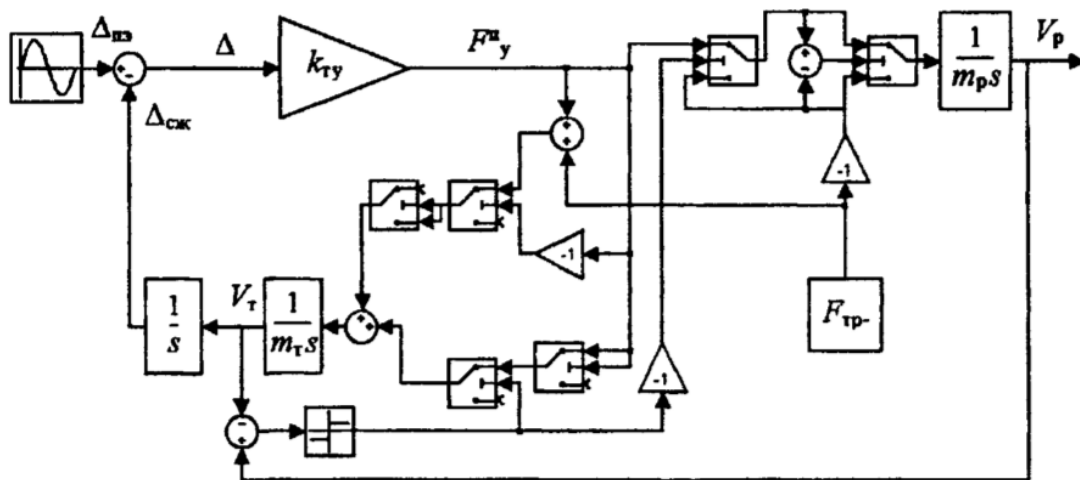


Рисунок 2.10 – Модель механічного перетворення ПЕД

Модель призначена для виконання синтезу приводів, що стежать, на базі

ПЕД.

Запропонована модель враховує конструктивні особливості обертальних ПЕД, так і ЛПД, а саме: змінні параметри, які визначають зміну резонансної частоти двигуна. На яку, в свою чергу справляють валив приведена маса ПЕ і коефіцієнт пружності штовхача. Наведена маса змінюється за період коливання напруги, що управляє внаслідок різного притиснення штовхача до ротора двигуна, в результаті приведена маса залежить від навантаження на валу і амплітуди напруги живлення.

Внаслідок того, що штовхач зазнає ізгібні коливання, еквівалентна пружність, при різних навантаженнях, змінна, що також призводить до залежності даного параметра від зовнішніх факторів. Резонансна частота, в свою чергу, квадратично залежить від співвідношення наведеної маси до пружності п'єзoeлементa. У моделі ці нелінійності враховуються шляхом введення залежності маси і еквівалентної пружності пьезoeлементa від часу контакту статора і ротора.

На наш погляд, ця модель складна. Її застосування доцільне для виробників п'єзодвигунів.

Однак, як вже зазначалося вище, можливе використання одномірних моделей, які значно спрощені, але не спотворюють загальні фізичні основи перетворення електричного сигналу керування в лінійне переміщення клапана подачі газу.

В [15, 28, 9] доведено, що при малих впливах як ПЕД, так і ЛПД є квазілінійною ланкою, а при великих – нелінійна ланка з перемінними розподіленими параметрами.

Нами запропоновано використання ЛПД для переміщення клапану подачі газу (рис. 2.11).

На рис. 2.11, а зображені: 1, 7 – п'єзорезонатор (ПР); 2 – точка торкання; 3 – шток; 4 – клапан; 5 – сідло; 6 – основа, до якої кріпляться ПР; 8 – блок пружин.

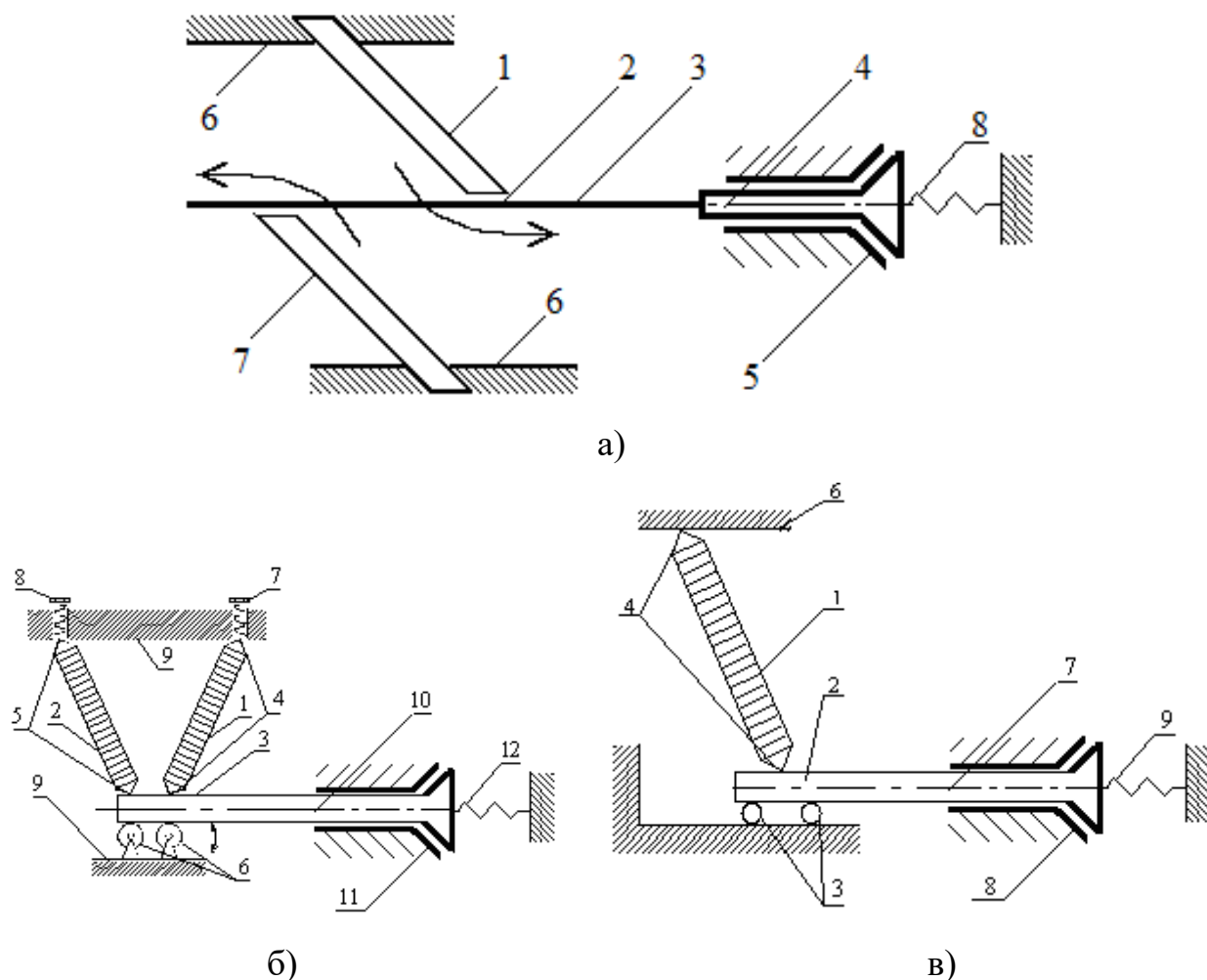


Рисунок 2.11 – Кінематична схема клапану подачі газу з реверсивним ЛПД (а), модель клапану з двома ЛПД (б), модель клапану з одним ЛПД (в)

На рис. 2.11, б зображені: 1, 2 – ПР; 3 – ролики; 4, 5 – кінцівки ПР; 6 – ролики; 7, 8 – місця закладення ПР; 9 – корпус; 10 – рухома частина; 11 – клапан; 12 – пружина попереднього навантаження.

На рис. 2.11, в зображені: 1 – ПР; 2 – шток; 3 – ролики; 4 – кінці ПР; 5 – пружина; 6 – корпус; 7 – рухома частина; 8 – клапан; 9 – пружина попереднього навантаження.

Метою створення моделі є оцінка можливості застосування п'єзоелектричних двигунів для управління клапаном подачі газу.

На рис. 2.12 наведено кінематичну схему пари ЛПД – клапан при застосуванні одного прямокутного осцилятора від ТОВ «Лілея», м. Київ (рис. 2.8).

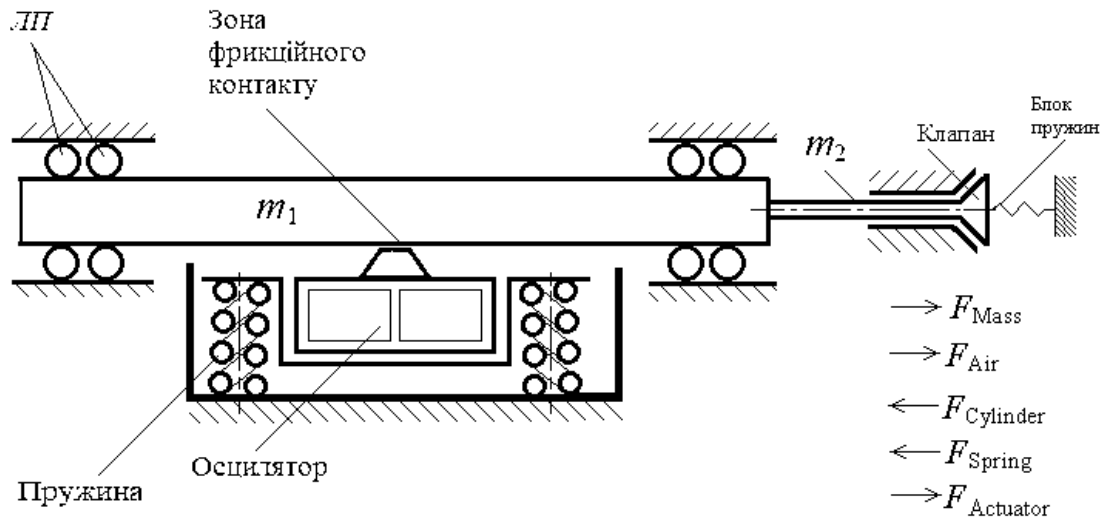


Рисунок 2.12 – Структурна схема клапану з одним осцилятором

Для створення моделі запропоновано замінити один ЛП (рис. 2.12) на три ПЕ (рис. 2.13, а) з поперечною поляризацією, де ПЕ1 виконує функцію заклинювання, ПР2 пересуває рухомий циліндр зверху вниз, а ПЕ3 – знизу вгору. Рухома частина масою m_1 рухається в лінійних підшипниках, до неї приєднаний клапан масою m_2 , який попередньо навантажений блоком пружин. Δ_1 , Δ_2 , Δ_3 – переміщення вільних кінцівок ПЕ1, ПЕ2, ПЕ3 відповідно. Цю модель можна поділити на дві частини в залежності від напрямку руху. На рис. 2.13, б зображено модель при русі вниз, а на рис. 2.13, в – при русі вгору.

Моделі на рис. 2.13, б і в можна звести до одновірних механічних моделей.

Для обліку реальних властивостей пари ЛПД – клапан спочатку побудуємо модель ПЕ із зосередженими параметрами, яка еквівалентна об'єкту з розподіленими параметрами по частоті власних коливань. Такі моделі складаються для пари ЛПД – клапан з наступним їхнім об'єднанням у спільну модель усієї системи.

Оскільки ЛПД в механічних моделях використовує один ПЕ, то умови рівноваги сил [28], які прикладені до рухомої границі активної частини ПЕ при русі вгору, становлять:

$$F_y = F_E - F_d - F_{\text{дин}} - F_C - F_{\text{тяжіння}} + F_{\text{Cylinder}} - F_{\text{Mass}} - F_{\text{Air}}. \quad (2.4)$$

При русі вниз:

$$F_y = F_E - F_d - F_{\text{дин}} - F_C + F_{\text{тяжіння}} - F_{\text{Cylinder}} + F_{\text{Mass}} + F_{\text{Air}}. \quad (2.5)$$

де $F_y = K_y \Delta$ – зусилля пружної деформації ПЕ, Н; $F_E = d_{\text{п}} Y S_0 E$ – зусилля в ПЕ, викликане прикладеним електричним полем, Н; F_C – статичне зусилля (в нашому випадку F_{Spring} , яка виникає внаслідок дії блоку пружин), Н; $F_d = K_d d\Delta/dt$ – зусилля, що демпфірує, у ПЕ, Н; $F_{\text{дин}} = m_{\Sigma} d^2\Delta/dt^2$ – динамічне зусилля в ПЕ, пропорційне швидкості зсуву поршня і викликаними при цьому процесами дисипації енергії в ПЕ, Н; $K_y = Y S_0 / l_0$ – коефіцієнт пружності ПЕ, Н/м; K_d – коефіцієнт внутрішнього демпфірування ПЕ, 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; $F_{\text{тяжіння}} = (m_1 + m_2)g$ – сила тяжіння, Н; $K_{\text{п}} = Y_{11} S_0 / l_0$ – коефіцієнт пружності ПЕ, Н/м; K_d – коефіцієнт внутрішнього демпфірування ПЕ, кг/с; $m_{\Sigma} = m_1 + m_2 + m_3$ – еквівалентна приведена сумарна маса рухомих частин, кг; Δ – деформація ПЕ, мм; l_0 – початкова довжина ПЕ, мм; σ – механічна напруга, Н/м²; Y – модуль Юнга, Н/м²; $d_{\text{п}}$ – п'єзомодуль, Кл/Н; E – напруга електричного поля, В/м; $C_0 = \epsilon_0 \epsilon_{33} (1 - ((d_{31})^2 Y_{11} / (\epsilon_0 \epsilon_{33}))^2) S_0 / l_0$ – ємність ПЕ, Ф; $K_{\text{п}} = K_y d_{\text{п}}$ – коефіцієнт прямого п'єзоefекту, К/м; $U = E l_0$ – напруга, яка прикладена до електродів ПЕ, В; $V = d\Delta/dt$ – швидкість виконавчого органа, м/с; $K_{\text{ЕМ}}^2 = d_{\text{п}}^2 Y / (\epsilon_0 \chi)$ – коефіцієнт електромеханічного зв'язку; $K_3 = Y S_0 d_{\text{п}} / l_0 = K_y d_{\text{п}}$ – коефіцієнт зворотного п'єзоefекту, Н/В.

Відзначимо, що коефіцієнти зворотного та прямого п'єзоefектів рівні між собою.

Крім того, окремо постає питання управління п'єзоперетворювачем на ЛПД. В [60] розглянуті питання підвищення точності керування п'єзоелектричним двигуном, а саме за струмом і швидкістю, з урахуванням специфіки частотної характеристики п'єзодвигуна з прямокутним резонатором,

який наведено на рис. 2.8.

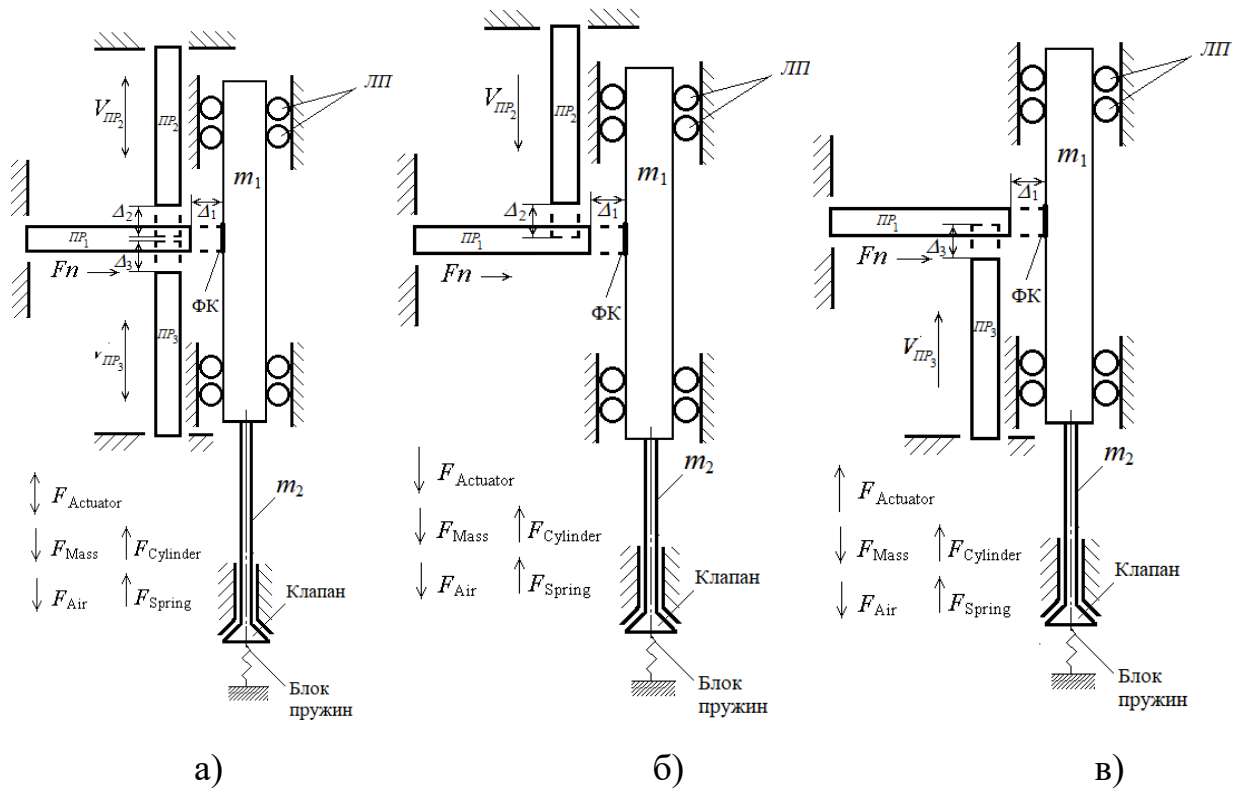


Рисунок 2.13 – Модель клапану: а – з трьома ПР; б – з двома ПР при русі вниз; в – з двома ПР при русі вгору

На рис. 2.14, а наведена схема керування двигуном за струмом, де: 1 – керований генератор; 2,3 – підсилювачі; 4,5 – вимірювачі струму; 6 – п'єзоелектричний двигун; 7 – схема порівняння; 8 – схема керування; 9 – джерело живлення; 10 – керуючий модуль. На рис. 2.15, б – схема керування двигуном за швидкістю, де: 1 – керований генератор; 2,3 – підсилювачі; 6 – п'єзоелектричний двигун; 7 – схема порівняння; 8 – схема керування; 9 – джерело живлення; 10 – керуючий модуль, 11 – датчик швидкості [60].

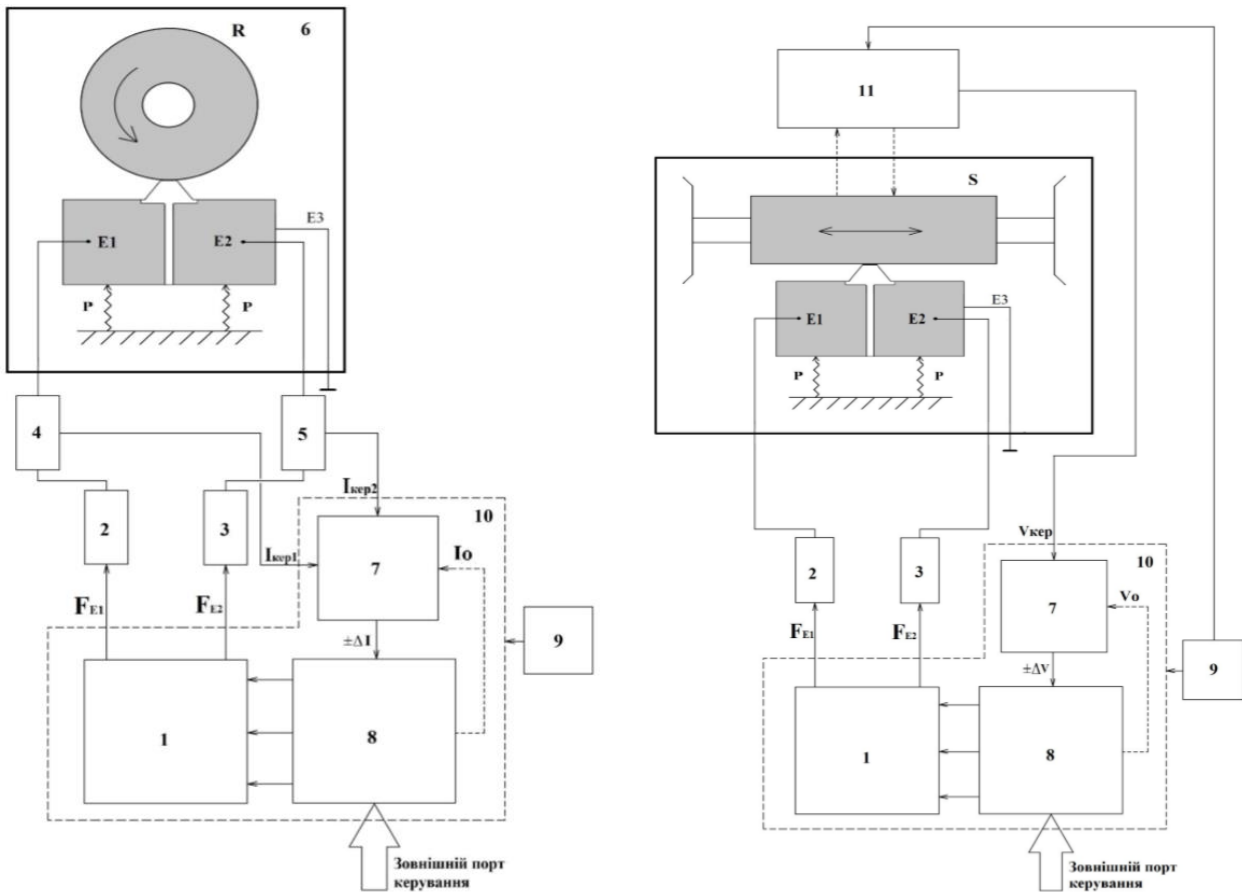


Рисунок 2.14 – Схема керування обертальним ПЕД (а) за струмом і ЛПД (б) за швидкістю [60]

Розроблені та апробовані на серійних п'єзоелектричних двигунах LPM-2M, LPM-5 і PM-1124R системи стабілізації за струмом та швидкістю забезпечили точність керування за струмом 1...2 %, точність керування за швидкістю 2...5 %, розширити діапазон керування за швидкістю у бік менших швидкостей і довести їх до 0,01 об/хв. для обертальних двигунів та 0,02 мм/с – для лінійних, розширити температурний діапазон роботи від $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$ внаслідок компенсації температурного зсуву резонансної частоти двигуна, забезпечити стабільність постійної швидкості при робочому моменті до 30 мН·м, силі до 2 Н, забезпечити стабільну роботу в імпульсному режимі керування [60]. Ці результати довели можливість використання ЛПД з прямокутним осцилятором в клапані подачі газу в судновий дизель.

2.5 Створення бібліотеки моделей п'єзоп'єрворювачів в середовищі SimInTech

В [6] для моделювання в SimInTech запропоновано субмодель п'єзоелектричного шару. Однак, недоліком цієї моделі є неможливість працювати з моделями іншого типу, крім математичної. Для оцінки роботи пари шар-клапан необхідно забезпечити субмодель додатковим виходом – Механічний з поступовим рухом.

На рис. 2.15, а представлений зовнішній вигляд субмоделі однієї п'єзоелектричної шайби (PiezoStack), а на рис. 2.15, б – її внутрішня структура.

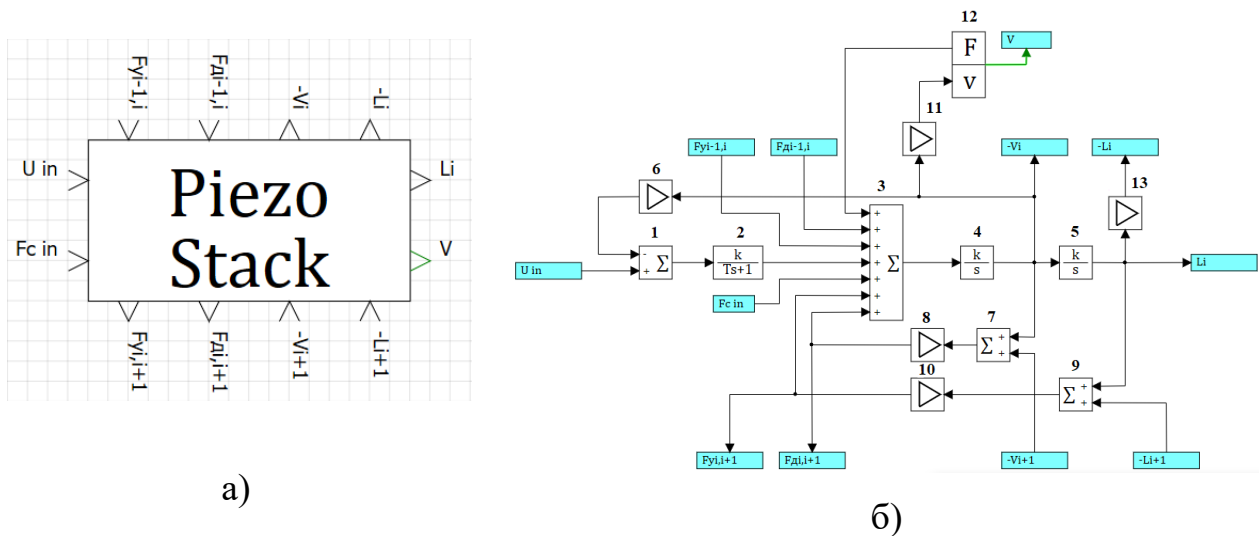


Рисунок 2.15 – Модернізована субмодель п'єзоелектричного шару з механічним виходом по швидкості: а – зовнішній вигляд; б – внутрішня схема субмодуля



На рис. 2.15, а з лівого боку розташовуються входи: U_{in} – вхідна напруга живлення; $F_{c in}$ – сила попереднього навантаження. В нашому випадку – це сила, що діє на п'єзошайбу з боку блока пружин клапана подачі газу.

З правого боку блоку субмоделі розташовано математичний вихід (L_i) переміщення «вільного кінця» шайби та механічний вихід, до якого приєднується блок клапан подачі газу.

Зверху блоку субмоделі розташовуються входи ($F_{y,i-1,i}$; $F_{d,i-1,i}$) і виходи ($-V_i$; $-L_i$), які уособлюють вільний кінець. Внизу-входи ($-V_{i+1}$; $-L_{i+1}$) і виходи ($F_{y,i+1,i}$; $F_{d,i+1,i}$), які відповідають за підключення до нерухомої

ОСНОВИ.

На рис. 2.15, б в субмоделі осцилятора використані наступні блоки: 1, 3, 7, 9 – суматори; 2 – інерційно-диференціальна ланка; 4, 5 – інтегратори; 6, 8, 10, 11, 13 – підсилювачі; 12 – двобічна шина (вихід) [47].

В SimInTech зв'язок між математичними та механічними моделями здійснюється за допомогою блоку з палітри субструктур  – двобічна шина (вихід) , який призначений для створення двобічної лінії зв'язку та має іменовані входні і вихідні сигнали (за замовчуванням, один вихідний сигнал з ім'ям А і один входний сигнал з ім'ям В), а також двонаправлений порт типу шина даних (багатожильна лінія) з ім'ям MAIN. В нашому випадку – вхід V який приєднано до виходу інтегратора (4) та вихід F, який приєднано до блоку (3).

На рис. 2.16 зображені запропоновані моделі п'єзоперетворювачів з трьома та п'ятью шарами, які розроблені шляхом застосування декількох однакових блоків.

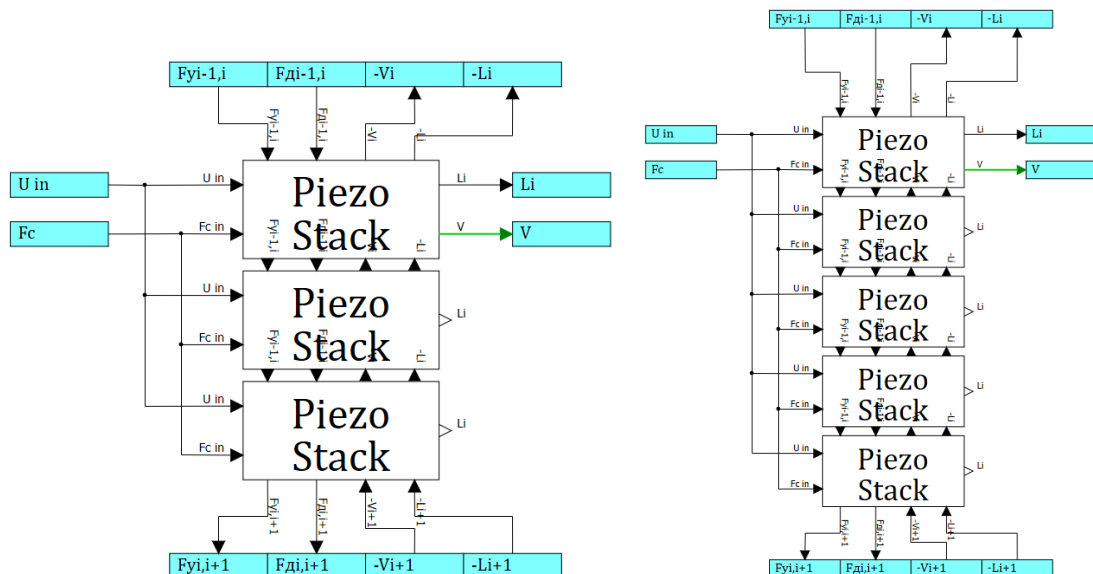


Рисунок 2.16 – Моделі п'єзоперетворювачів: а – 3 шари; б – 5 шарів

Слід зазначити, що всі наступні блоки, крім останнього, який є вільним кінцем, не мають механічного виходу.

По аналогії були розроблені моделі складальних стовпів, до складу яких входять десять та сто п'єзоелектричних шарів.

На рис. 2.17 наведено скриншот в SimInTech, в бібліотеку компонентів якої інтегровано вкладинку Actuators, а також зображення запропонованих моделей.

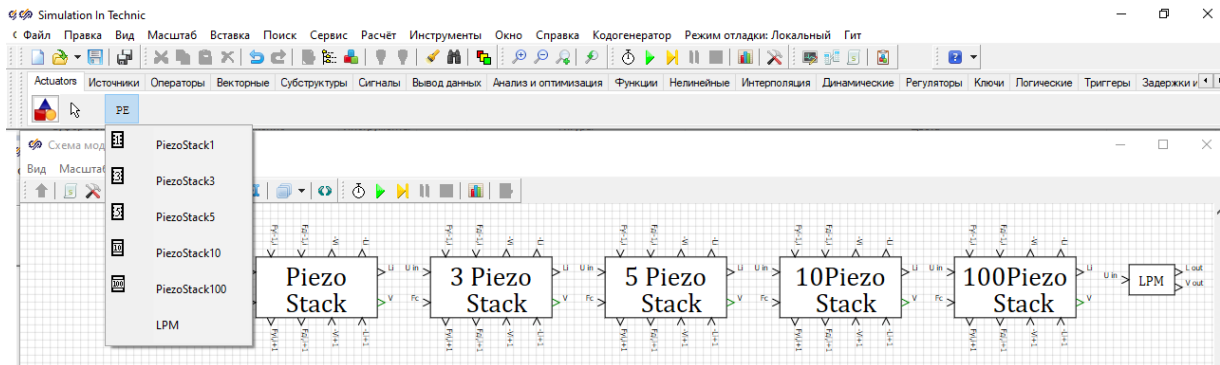


Рисунок 2.17 – Скриншот інтегрованої бібліотеки розноблених п'єзоелектричних перетворювачів

Для побудови перетворювачів було застосовано кераміку PIC255 [96], яка відноситься до сегнетожесткої кераміки. Вибір було зроблено спираючись на дослідження, які проводилися в [56]. Але надалі будуть проведені дослідження з вибору кераміки, яка дозволить здійснювати більше переміщення за короткий час. На рис. 2.18 наведені властивості та параметри, які відносяться до розроблених моделей за замовчуванням.

Назва	Імя	Формула	Значення
Діаметр слоя, м	d		0.01
Толщина слоя, м	l		0.005
Относительная диэлектрическая проницаемость	k33T		8.85E-12
Кoeffициент электромеханической связи	k33		0.69
Добротность	Qm		80
Плотность керамики, кг/м ³	p		7800
Диэлектрическая проницаемость, Ф/м	e33		1.750
Сопротивление источника, Ом	Rvt		50
Продольный модуль Юнга, Н/м ²	YE33		4.8E10
Поперечный модуль Юнга, Н/м ²	YE11		6.2E10
Поляризация (Да - продольная, Нет - поперечная)	Pol		<input type="checkbox"/> Нет

а)

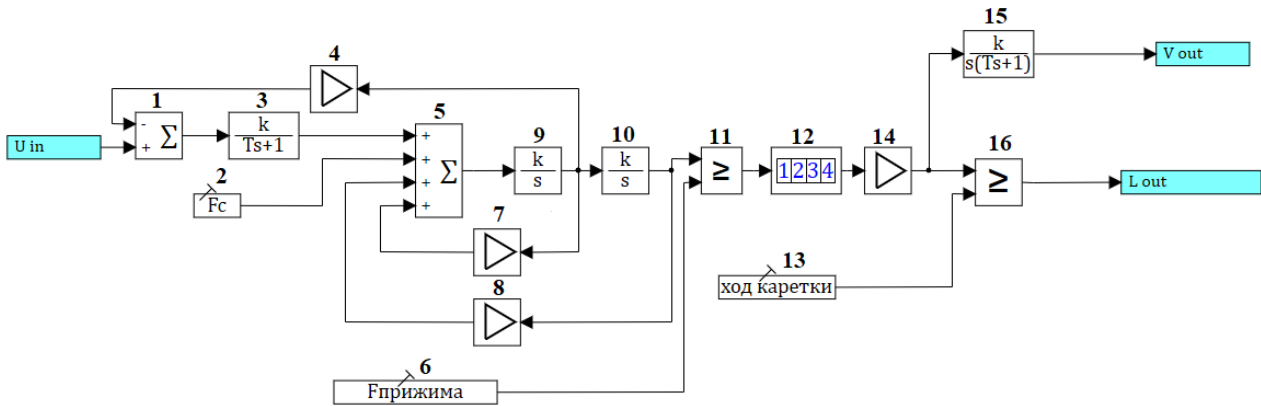
Назва	Імя	Значення
Площадь слоя, м ²	S	7.8539816E-5
Масса слоя, кг	m0	0.0030630528
Кoeffициент упругости, м ² /Н	Ky	-9.7389372E8
Кoeffициент демпфирования,	Kd	-38524.277
Емкость слоя, Ф	C	2.4327708E-10

б)

Рисунок 2.18 – Властивості (а) та параметри (б) п'єзоелектриків з розробленої бібліотеки компонентів

На рис. 2.19, а наведено зовнішній вигляд моделі лінійного п'єзоелектричного двигуна та властивостей (б), які також було обрано у відповідності до кераміки PIC255. 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.



а)

Свойства : LPM1				
Свойства	Параметры	Общие	Порты	Визуальные слои
Название	Имя	Формула	Значение	
Толщина осциллятора, м	a		0.01	
Высота осциллятора, м	b		0.01	
Толщина осциллятора, м	l		0.005	
Относительная диэлектрическая проницаемость	k33T		8.85E-12	
Кэффициент электромеханической связи	k33		0.69	
Добротность	Qm		80	
Плотность керамики, кг/м^3	p		7800	
Диэлектрическая проницаемость, Ф/м	e33		1750	
Сопротивление источника, Ом	Rvt		50	
Продольный модуль Юнга, Н/м^2	YE33		4.8E10	
Поперечный модуль Юнга, Н/м^2	YE11		6.2E10	
Поляризация (Да - продольная, Нет - поперечная)	Po1		<input checked="" type="checkbox"/> Да	
Сила прижима осциллятора, Н	Fc		5E-8	

б)

Рисунок 2.19 – Модель лінійного п'єзоелектричного двигуна (а) та властивості застосованої при розрахунках її кераміки (б)

На відміну від моделі фрикційного контакту, яку наведено на рис 2.9, тут для отримання середньої швидкості застосовано замість інерційної ланки 1-го порядку інерційно-інтегруючу ланку.

Таким чином, було розроблено бібліотеку п'єзоелектричних перетворювачів, які здійснюють лінійне переміщення.

Висновки до розділу 2

1. Сформовано вимоги до електричної частини клапану подачі газу для комп'ютерно-інтегрованої системи подачі палива в судновий дизель-генератор, що дозволило висунути вимоги до п'єзоелектричних перетворювачів, а саме зусилля, яке потрібне, та час вмикання/вимикання.

2. 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. Розроблено кінематичну та структурну схеми п'єзоперетворювача клапану подачі газу на базі п'єзоелектричних складальних стовпів. Все це дозволяє проектувати п'єзоприводи виконавчих механізмів з необхідними технічними параметрами та характеристиками, а також здійснювати дослідження механічної системи стовп–важіль–клапан при моделюванні роботи п'єзоприводу.

3. Отримала подальшого розвитку модель фрикційного контакту, яка дозволила формалізувати процеси, що забезпечило лінійність переміщення рухомої каретки ЛПД.

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. Розроблено кінематичну та структурну схеми п'єзоперетворювача клапану подачі газу на основі лінійного п'єзоелектричного двигуна.

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 середовища електронного моделювання SimIntech (Безлімітна ліцензія. Організація: НУ «ОМА». Серійний номер: D63B30FDA70), що дозволило проводити моделювання не тільки з математичними, а й з механічними моделями. Зокрема, розроблено бібліотеку компонентів для середовища SimInTech, до якої надійшли один шар та трьох-, п'яти-, десяти-, сто- шарові п'єзоперетворювачі.

Основні результати розділу 2 опубліковані в [41, 42, 43, 48, 55] або Додатку 9 [1, 2, 10, 12, 16].

РОЗДІЛ 3

ДОСЛІДЖЕННЯ МОДЕЛЕЙ СИСТЕМИ ТА КЛАПАНУ ПОДАЧІ ГАЗУ В СУДНОВИЙ ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОР

3.1 Модель п'єзоперетворювача та дослідження його властивостей

В [56] наведені результати моделювання складальних стовпів у складі АСК подачі палива в суднові ДВС з електронним управлінням упорскуванням палива та вихлопним клапаном в середовищі електронного моделювання Simulink. Однак, за витратами часу та для уникнення неоднозначності отриманих результатів була задіяне середовище електронного моделювання SimInTech control systems simulator (Безлімітна ліцензія. Організація: НУ «ОМА». Серійний номер: D63B30FDA70) [54].

При виборі середовища моделювання були взяті до уваги аргументи, які наведено в [62], а саме порівняння часу розрахунку моделі однополуперіодного випрямляча продуктами від компаній VisSim, MATLAB Simulink, SimInTech. Тести проведено з використанням двох методів завдання рівнянь: на вбудованій мові програмування; у вигляді схеми. В обох випадках SimInTech показав найкращі результати. Час виконання тестів на мові програмування менше в 5-6 разів в порівнянні з аналогами, а при реалізації схем – більше ніж в 5 разів в порівнянні з MATLAB Simulink.

Як було визначено в розділі 2, вимоги до блоку подачі палива для суднового двигуна наступні: зусилля, що розвивається – 100 Н; швидкість переміщення (час перехідного процесу) – не більше 20 мс; переміщення – 0.4 мм.

Для побудови моделі складального стовпа проведемо дослідження впливу властивостей і параметрів використовуваної п'єзокераміки на переміщення вільного кінця п'єзоелемента.

У якості відправної точки взята п'єзокераміка ЦТС-19 з наступними властивостями: діелектрична проникність – $\epsilon_{33} = 1750$ Ф/м; коефіцієнт

електромеханічного зв'язку – $K_p = 0.69$; модуль Юнга – $Y_{E33} = 7 \cdot 10^{10}$ Н/м²; щільність – $\rho = 7800$ кг/м³; механічна добротність – $Q_m = 80$; опір джерела живлення – $R_{vt} = 50$ Ом.

Форма ПЕ – кругла, розміри ПЕ – діаметр $d = 0.01$ м, товщина $l = 0.005$ м.

Інтерпретований скрипт (розрахункові формули):

initialization

$S = \pi * d * d / 4;$

$m0 = \rho * S * l;$

$Ky = -S * YE33 / l;$

$Kd = Ky * l / (1.58 * Qm);$

$C = k33T * e33 * S / l;$

end;

де S – площа ПЕ, π – число π , $m0$ – маса ПЕ, Ky – коефіцієнт пружності, Kd – коефіцієнт демпфірування, C – ємність ПЕ, $k33T$ – відносна діелектрична проникність, $e33$ – діелектрична проникність.

В результаті розрахунку отримані наступні параметри, які представлені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1. – Параметри ПЕ на основі ЦТС-19

Название	Имя	Значение
Площадь слоя, м ²	S	7.8539816E-5
Масса слоя, кг	m0	0.0030630528
Кoeffициент упругости, м ² /Н	Ky	-7.5398224E8
Кoeffициент демпфирования,	Kd	-29825.247
Емкость слоя, Ф	C	2.4327708E-10

Перед тим, як приступити до моделювання поведінки вільного кінця закріпленого на нерухомому підставі п'єзоелемента, необхідно визначити, який з видів поляризації буде прийнятним для використання в ролі актуатора, тобто буде здійснювати більше переміщення. Для цього була побудована модель, представлена на рис. 3.1, а.

На рис. 3.1, б представлені результати моделювання.

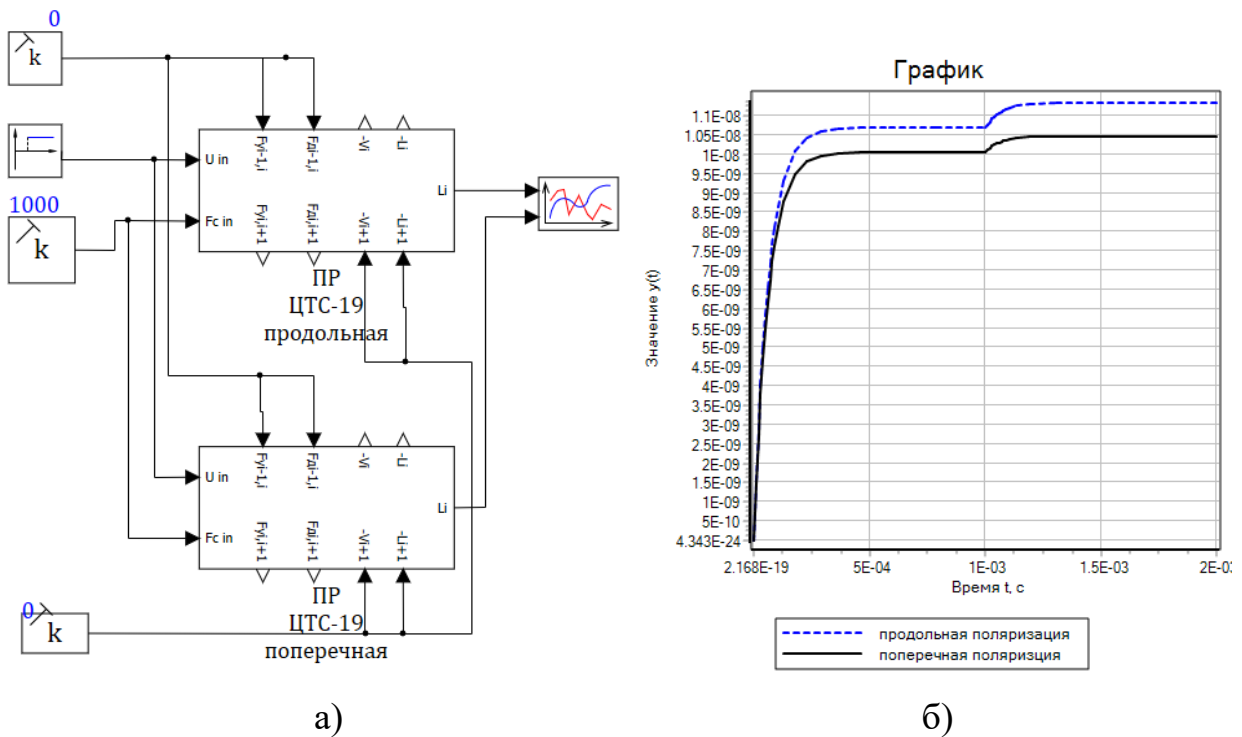


Рисунок 3.1 – Дослідження поведінки ПЕ на ЦТС-19 з поздовжньої і поперечної поляризацією: а – модель; б – переміщення вільного кінця

Аналіз результатів моделювання показав, що переміщення вільного кінця п'єзоелемента при поздовжньої поляризації значно перевищує переміщення для п'єзоелемента з поперечної поляризацією. Тому подальші дослідження поведінки актуатора будуть проводитися з п'єзоелементами з поздовжньою поляризацією.

Спочатку було проведено дослідження впливу механічної добротності Q_m . Для цього була складена модель (рис. 3.2, а) з трьома блоками на основі ЦТС-19 для трьох значень добротності 50, 250 і 500. Значення вибиралися виходячи з аналізу можливих варіантів існуючих типів керамік провідних виробників, присутніх на ринку.

На рис. 3.2, б наведено результати моделювання, аналіз яких показав, що добротність не впливає на величину переміщення, проте сильно впливає на час перехідного процесу, причому, чим вище значення добротності, тим менше час перехідного процесу. Так при зміні добротності в 5 разів з 50 до 250 час перехідного процесу зменшується в 2 рази, при збільшенні з 250 до 500 – близько 30 %. Тому можна зробити висновок, що для проведення подальших

випробувань, необхідно використовувати кераміку з високим значенням добротності.

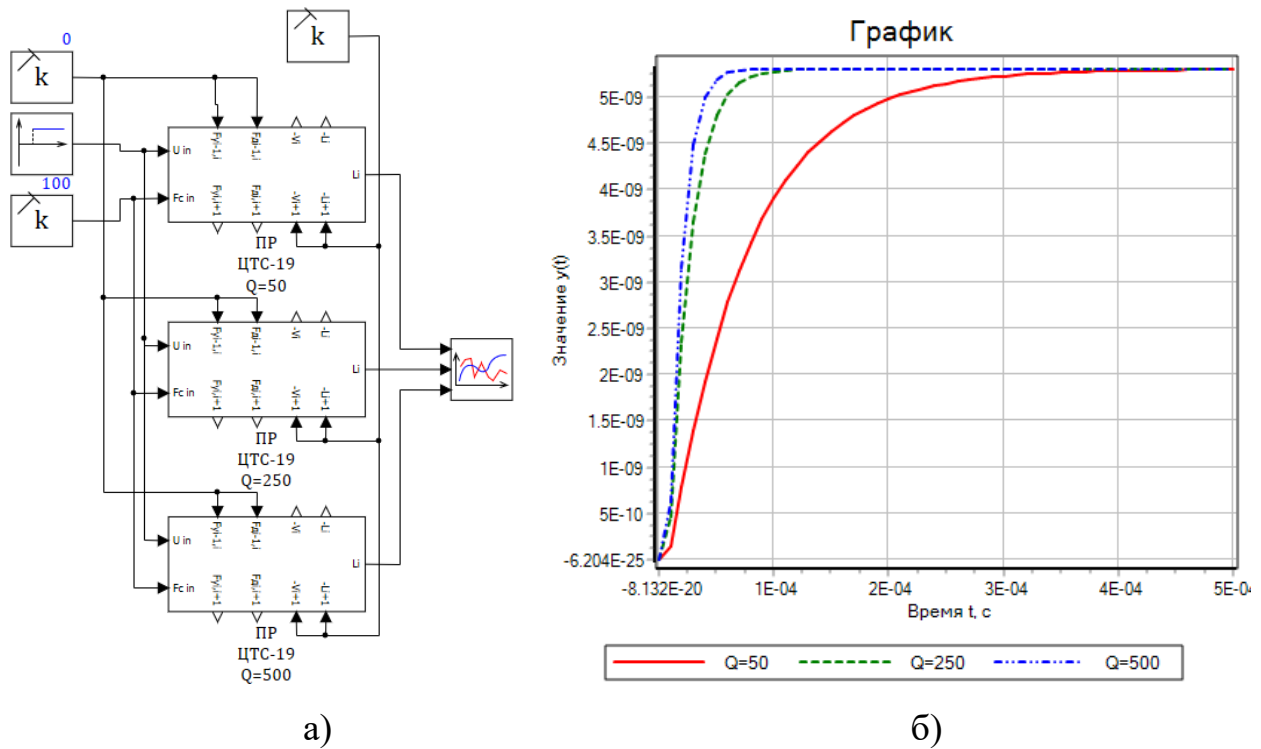


Рисунок 3.2 – Дослідження впливу добротності на переміщення вільного кінця ПЕ: а – модель; б – графік залежності $\Delta = f(Q_m)$

Далі дослідженню було піддано вплив коефіцієнта електромеханічного зв'язку K_p . Для цього була складена модель (рис. 3.3, а) з трьома блоками на основі ЦТС-19 для трьох значень K_p : 0.4; 0.6; 0.8.

На рис. 3.3, б наведено результати моделювання, аналіз яких показав, що коефіцієнт електромеханічного зв'язку впливає, як на величину переміщення, так і на час перехідного процесу. Причому, при зміні значення K_p на 33 %, відбувається зміна переміщення вільного кінця ПЕ і часу перехідного процесу рівно на 33 %. Тому можна зробити висновок, що для проведення подальших випробувань зі складальними стовпами, доцільно використовувати кераміку з максимально можливим значенням коефіцієнта електромеханічного зв'язку.

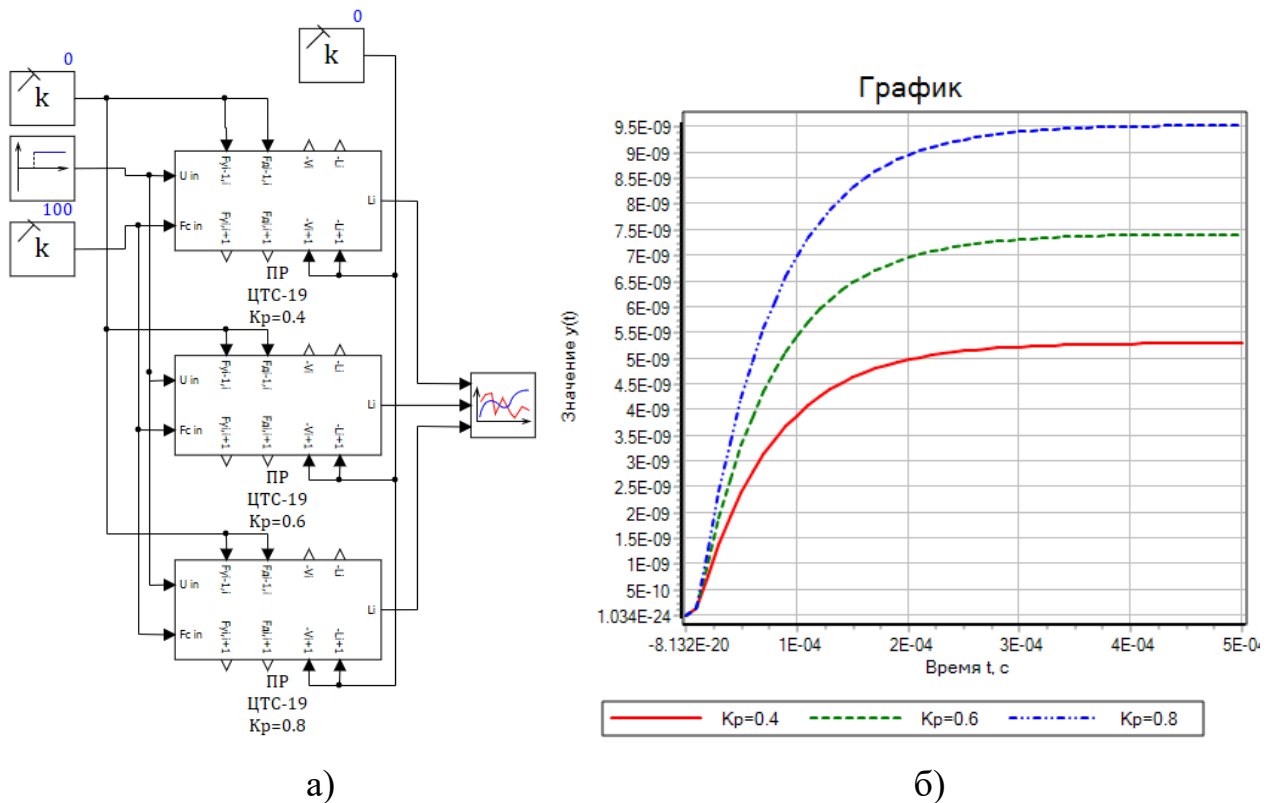


Рисунок 3.3 – Дослідження впливу коефіцієнта електромеханічного зв'язку на переміщення вільного кінця ПЕ: а – модель; б – графік залежності $\Delta = f(K_p)$

Подальші дослідження були спрямовані на вивчення впливу модуля Юнга на характеристики ПЕ. На рис. 3.4, а представлена модель, в якій використовуються відхилення значень в діапазоні 33 %, а саме: $4 \cdot 10^{10}$; $6 \cdot 10^{10}$; $8 \cdot 10^{10}$, Н/м².

На рис. 3.4, б представлені результати моделювання.

Аналіз графіків показав, що при пропорційному збільшенні модуля Юнга, відбувається нелінійне зменшення переміщення вільного кінця ПЕ. Так, при зміні значення модуля Юнга від $4 \cdot 10^{10}$ до $6 \cdot 10^{10}$, переміщення зменшується на 25 %, а вже при збільшенні від $6 \cdot 10^{10}$ до $8 \cdot 10^{10}$ – 33 %. Очевидно, що час перехідного процесу при збільшенні модуля Юнга також збільшується.

На наступному етапі були проведені дослідження впливу габаритних розмірів ПЕ-діаметра (d) (рис. 3.5) і товщини ПЕ (l) (рис.3.6).

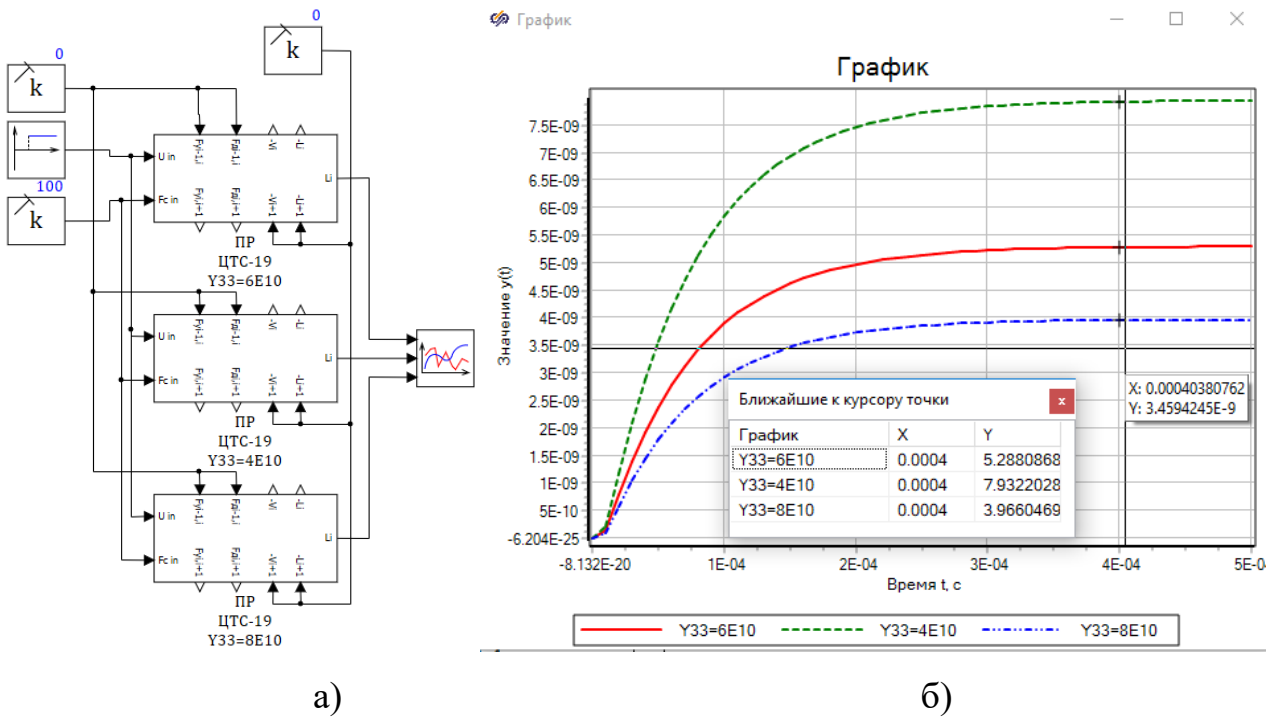


Рисунок 3.4 – Дослідження впливу модуля Юнга на переміщення вільного кінця ПЕ: а – модель; б – графік залежності $\Delta = f(YE33)$

На рис. 3.5, а представлено модель дослідження впливу діаметра ПЕ на переміщення вільного кінця, а на рис. 3.5, б – графік залежності.

На рис. 3.6, а представлено модель дослідження впливу товщини ПЕ на переміщення ПЕ, на рис. 3.6, б – графік залежності.

Аналіз двох графіків (рис. 3.5, б і рис. 3.6, б) показав, що зміна діаметра на порядок від 0.01 м до 0.1 м призводить до зменшення переміщення вільного кінця в 100 разів і збільшення часу перехідного процесу. У той же час збільшення товщини ПЕ в 10 разів з 0001 м до 0.01 м призводить до збільшення в 10 разів переміщення при одночасному збільшенні часу перехідного процесу.

У всіх вище наведених дослідженнях сила попереднього навантаження становила 100 Н. Тому, очевидно, було проведено дослідження його впливу на переміщення вільного кінця ПЕ і час перехідного процесу, результати якого представлені на рис. 3.7.

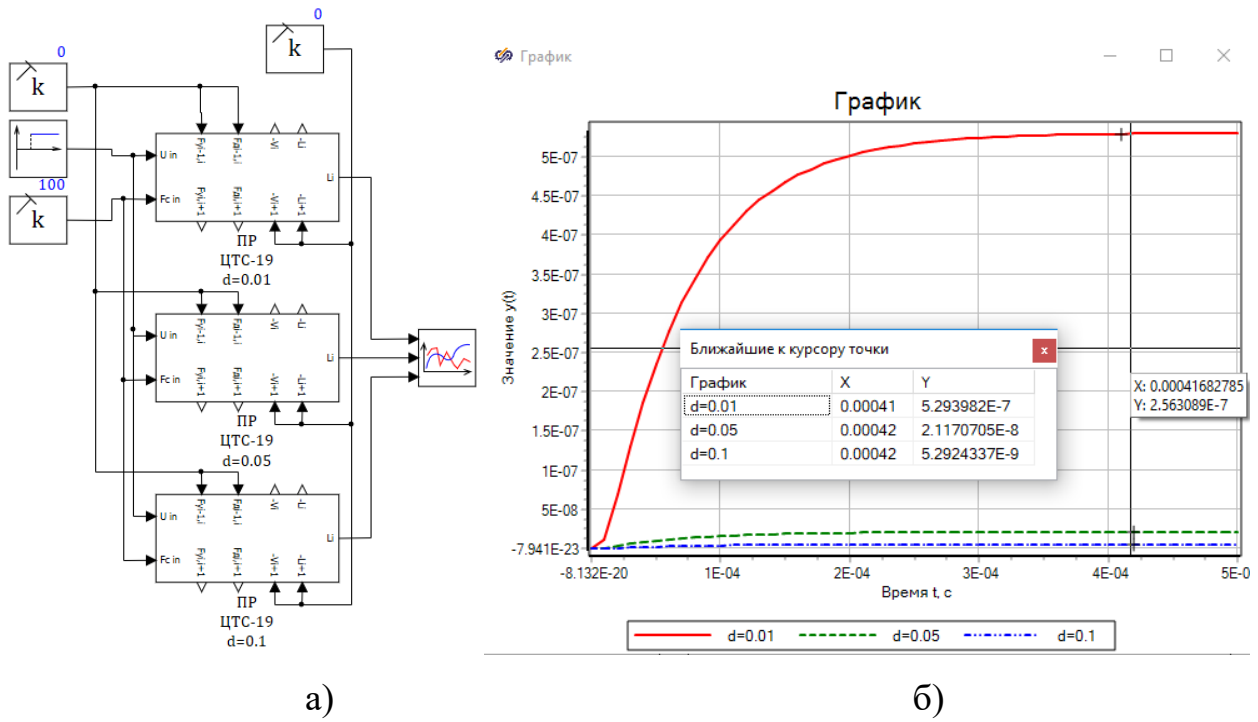


Рисунок 3.5 – Дослідження впливу діаметра ПЕ на переміщення вільного кінця ПЕ: а – модель; б – графік залежності $\Delta = f(d)$

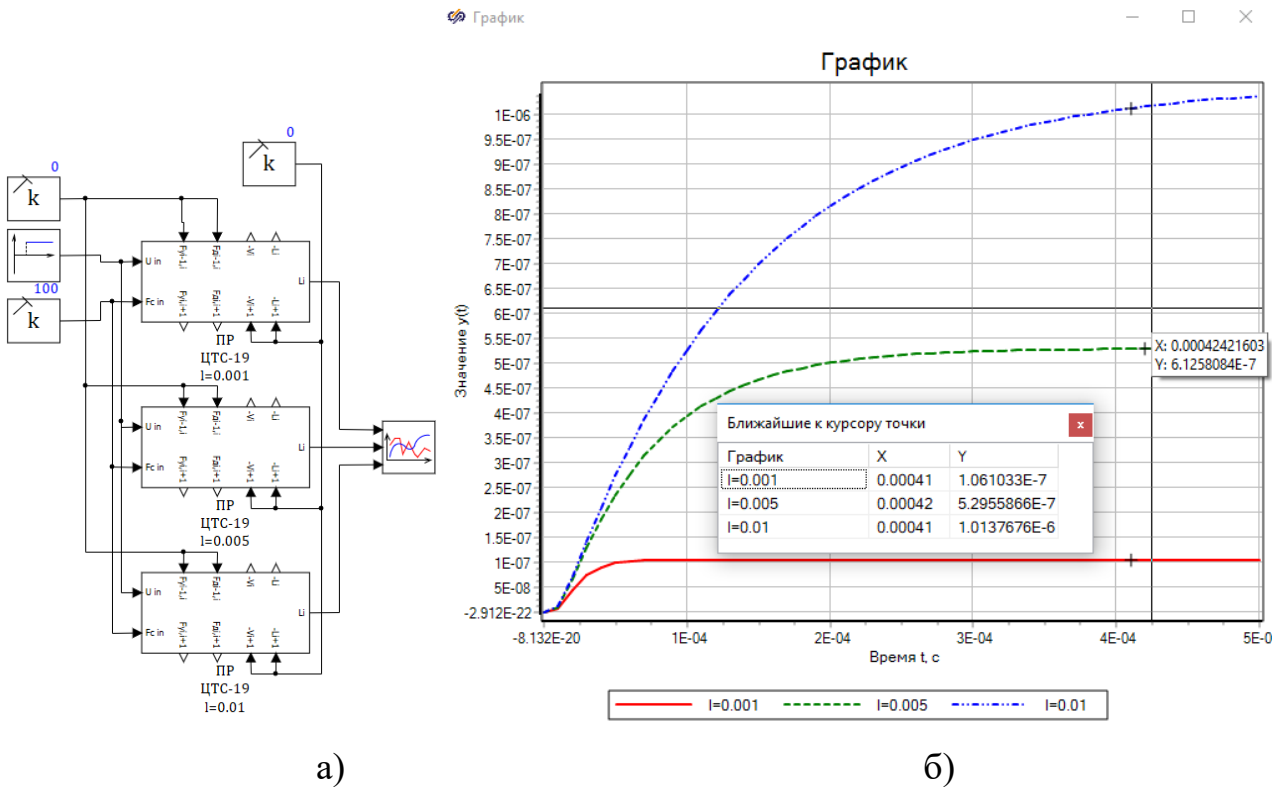


Рисунок 3.6 – Дослідження впливу товщини ПЕ на переміщення вільного кінця ПЕ: а – модель; б – графік залежності $\Delta = f(l)$

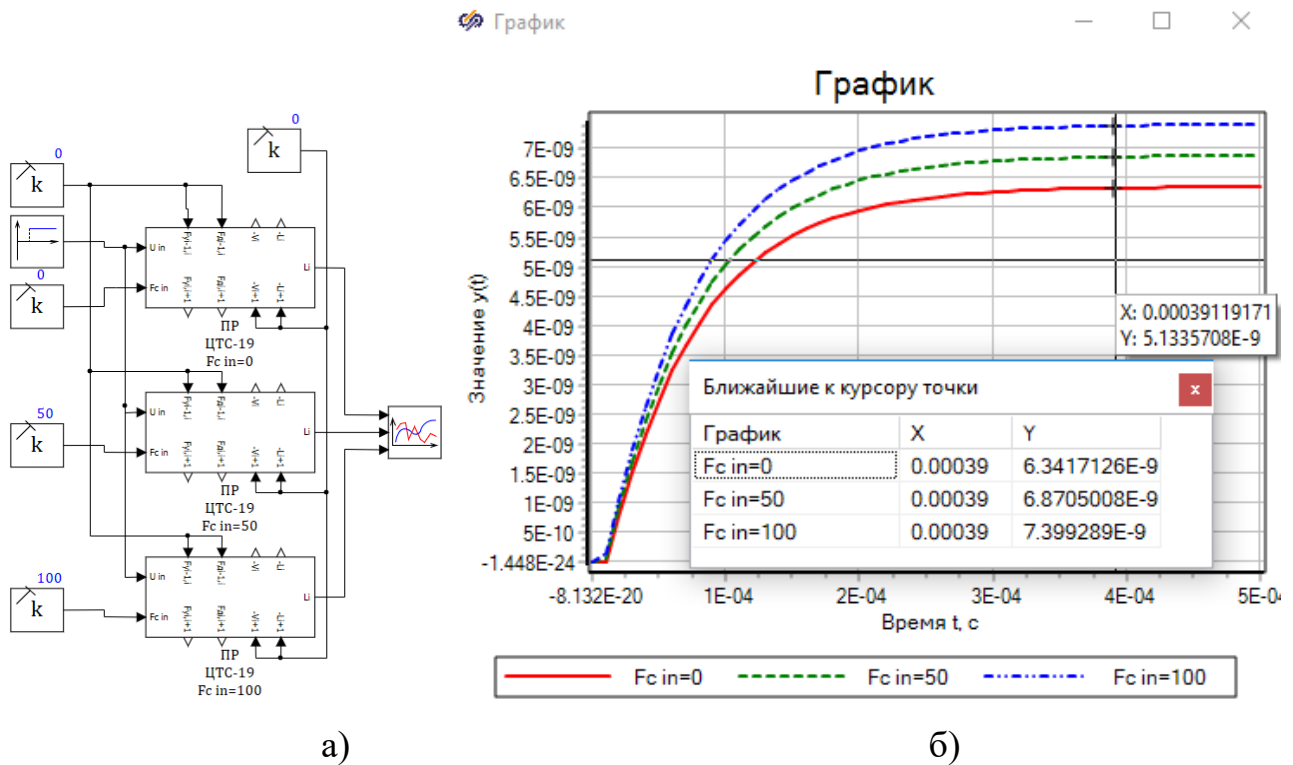


Рисунок 3.7 – Дослідження впливу сили навантаження на переміщення вільного кінця ПЕ: а – модель; б – графік залежності $\Delta = f(F_{c in})$

Аналіз результатів моделювання (рис. 3.7, б) показав, що в разі попереднього навантаження (100 Н) переміщення вільного кінця збільшується майже на 15 % в порівнянні з його відсутністю.

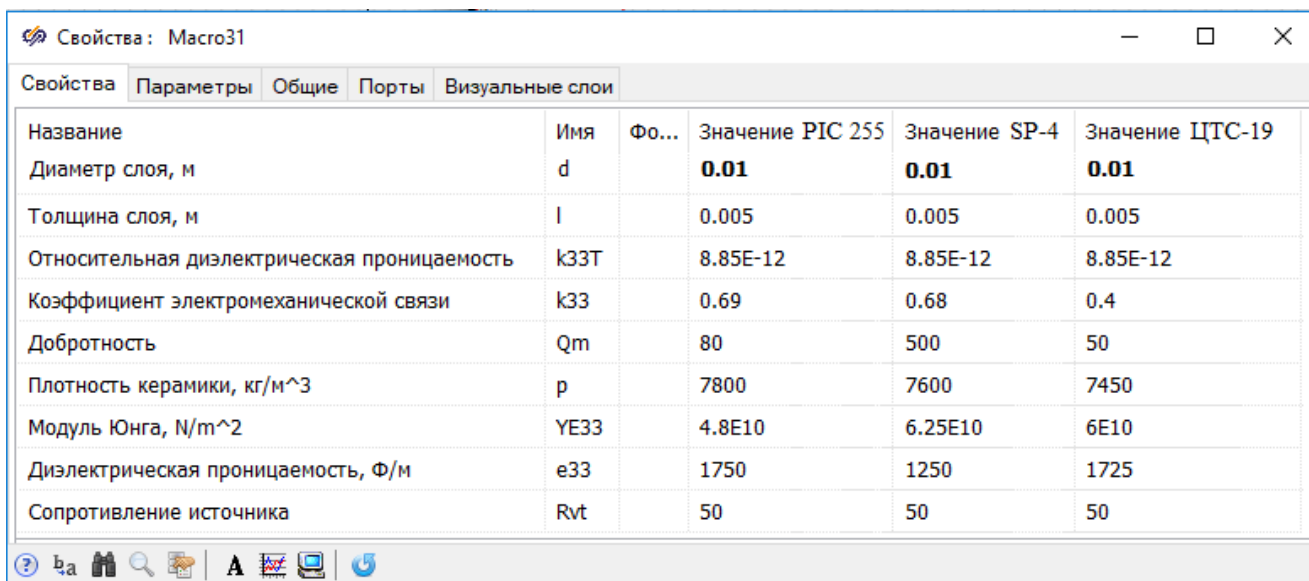
Таким чином, за результатами проведених досліджень впливу властивостей п'єзокераміки і габаритних розмірів ПЕ можна скласти таблицю 3.2, де \downarrow – зменшення, \uparrow – збільшення значення.

Таблиця 3.2 – Порівняльні показники впливу властивостей і розмірів

Властивості	$Q_m \uparrow$	$K_p \uparrow$	$Y_{E33} \uparrow$	$d \uparrow$	$l \uparrow$	$F_c \uparrow$
Реакція	Δ	\uparrow	\downarrow	\downarrow	\uparrow	\uparrow
	τ	\downarrow	\downarrow	\uparrow	\uparrow	\downarrow

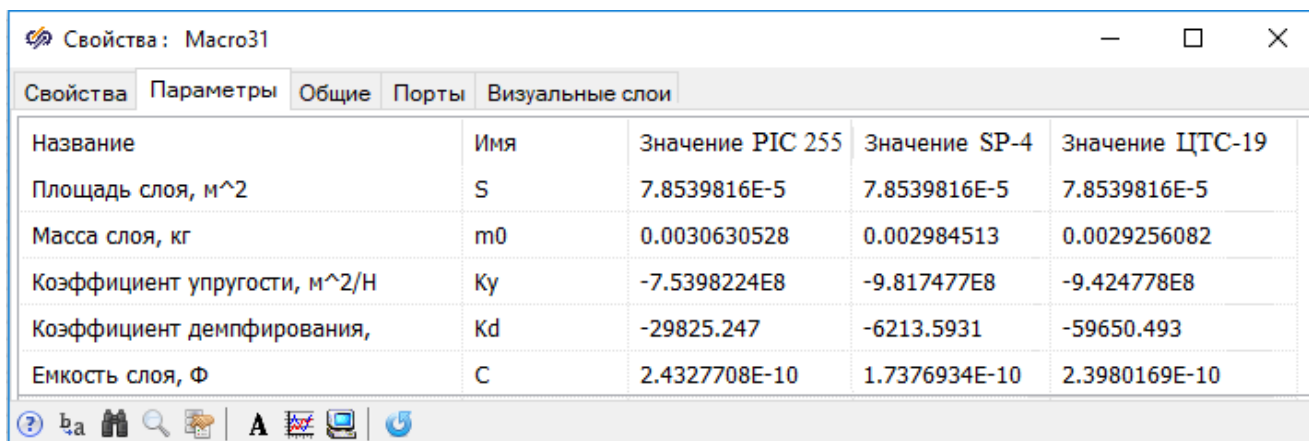
Проведений аналіз п'єзоматеріалів провідних виробників США, Європи, Індії [75, 76, 96, 100] дозволив провести моделювання поведінки п'єзо шайб з поздовжньою поляризацією для керамік PIC255, SP-4 і ЦТС-19, властивості яких представлені на рис. 3.8, а. На рис. 3.8, б наведені розрахункові значення параметрів для шайб діаметром 0.01 м і товщиною 0.005 м, напруга

управління – 1000 В, сила попереднього навантаження – 100 Н.



Название	Имя	Фо...	Значение PIC 255	Значение SP-4	Значение ЦТС-19
Диаметр слоя, м	d		0.01	0.01	0.01
Толщина слоя, м	l		0.005	0.005	0.005
Относительная диэлектрическая проницаемость	k33T		8.85E-12	8.85E-12	8.85E-12
Коэффициент электромеханической связи	k33		0.69	0.68	0.4
Добротность	Qm		80	500	50
Плотность керамики, кг/м ³	p		7800	7600	7450
Модуль Юнга, Н/м ²	YE33		4.8E10	6.25E10	6E10
Диэлектрическая проницаемость, Ф/м	e33		1750	1250	1725
Сопротивление источника	Rvt		50	50	50

а)



Название	Имя	Значение PIC 255	Значение SP-4	Значение ЦТС-19
Площадь слоя, м ²	S	7.8539816E-5	7.8539816E-5	7.8539816E-5
Масса слоя, кг	m0	0.0030630528	0.002984513	0.0029256082
Коэффициент упругости, м ² /Н	Ky	-7.5398224E8	-9.817477E8	-9.424778E8
Коэффициент демпфирования,	Kd	-29825.247	-6213.5931	-59650.493
Емкость слоя, Ф	C	2.4327708E-10	1.7376934E-10	2.3980169E-10

б)

Рисунок. 3.8 – Властивості (а) і параметри (б) п'єзоматеріалів

На рис. 3.9, а представлено структурну схему моделі, а на рис. 3.9, б – результат моделювання при використанні методу інтегрування – неявний Ейлера, а на рис. 3.9, в – метод діагонально неявний (метод 3-го порядку з 3-ма неявними стадіями) DIRK3.

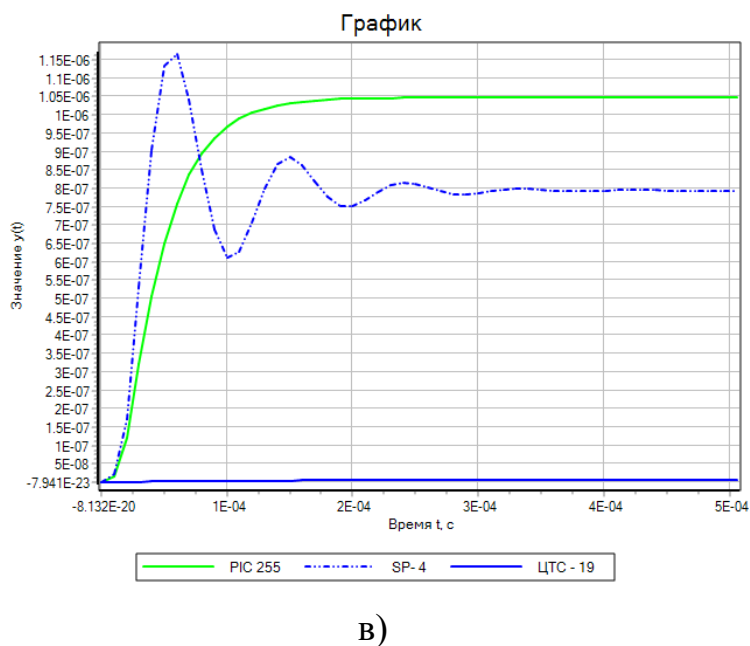
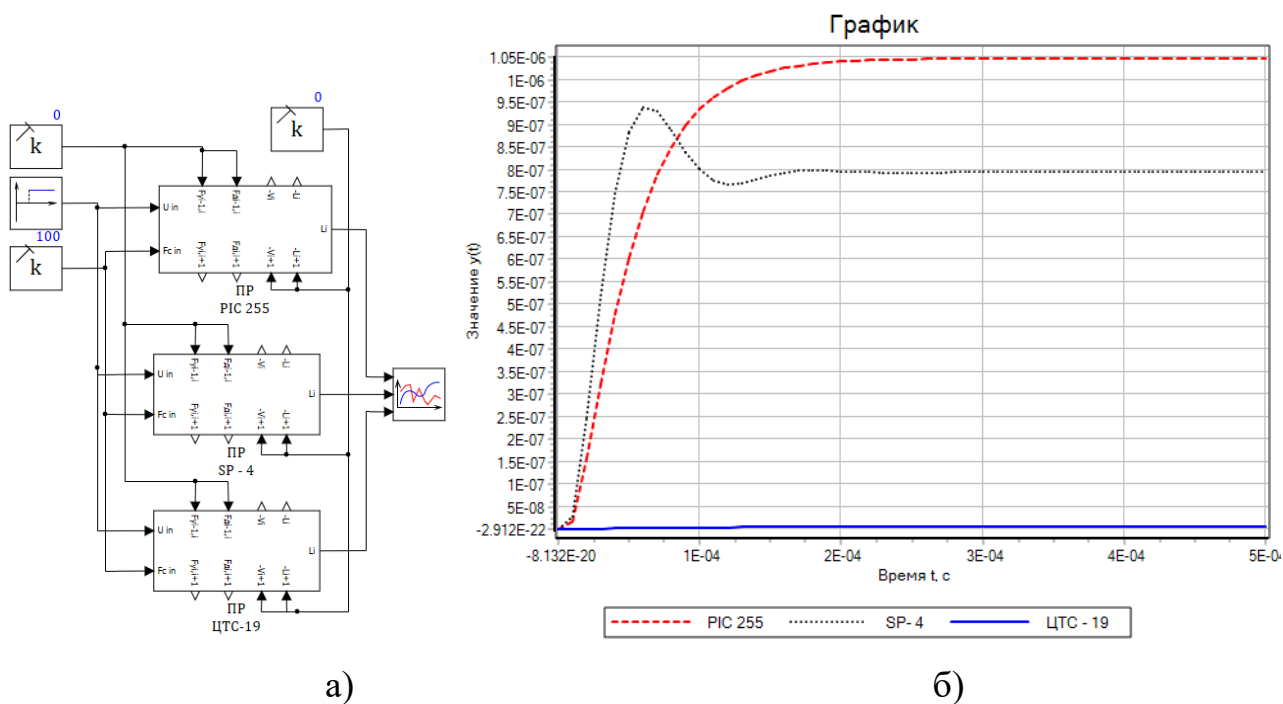


Рисунок 3.9 – Дослідження впливу методів інтегрування на характеристики ПЕ: а – модель; б – неявний Ейлера; в – діагонально неявний DIRK3

Аналіз отриманих результатів показав, що найбільше переміщення вільного кінця розвиває шайба на основі PIC255, шайба на основі SP-4 розвиває переміщення на 20 % менше, а шайба на основі ЦТС-19 – на кілька порядків менше. Тому з подальших досліджень буде виключена кераміка ЦТС-19.

Крім того, слід зазначити, що перехідний процес закінчується швидше у PIC255.

Порівняння методів інтегрування показало, що використання методу діагонально неявного DIRK3 призводить до високого значення коливальності.

Подальше моделювання проводилося для складального стовпа з трьох п'єзоелектричних шайб основі PIC255 [95, 96] при входній напрузі управління 100 В і попередньому навантаженні в 100 Н. Результат моделювання представлений на рис. 3.10.

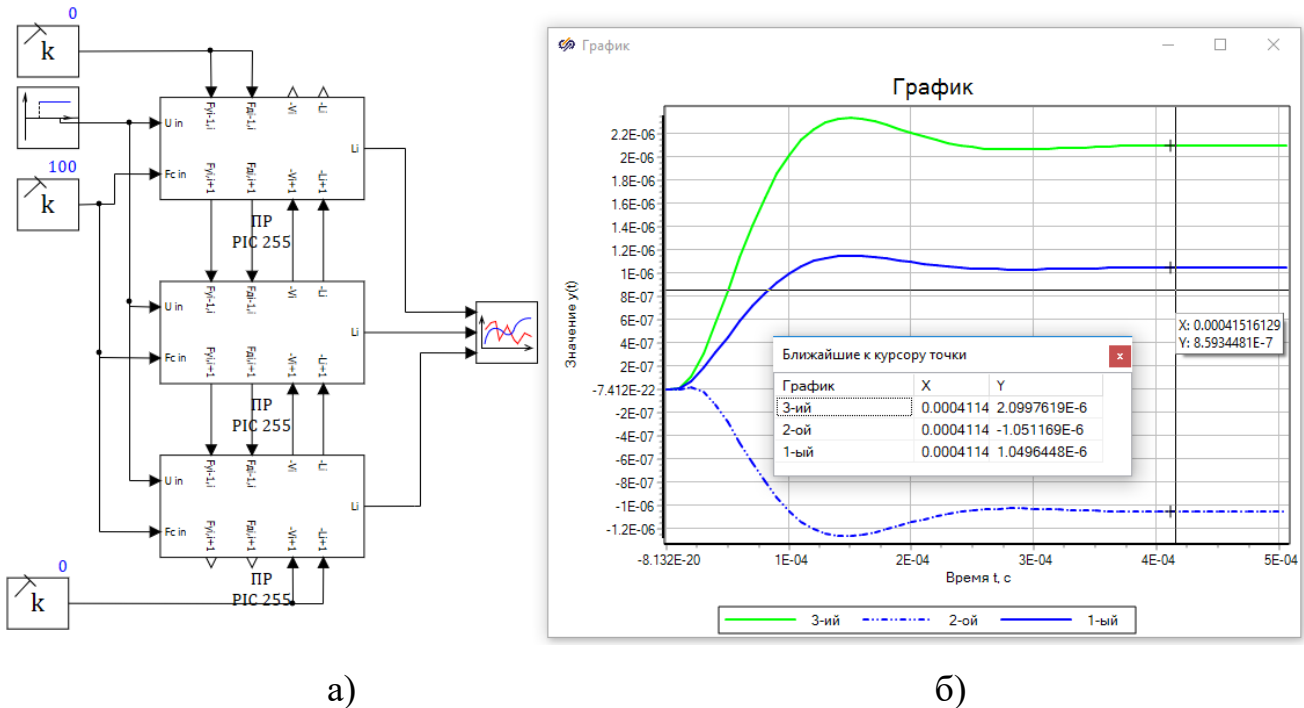
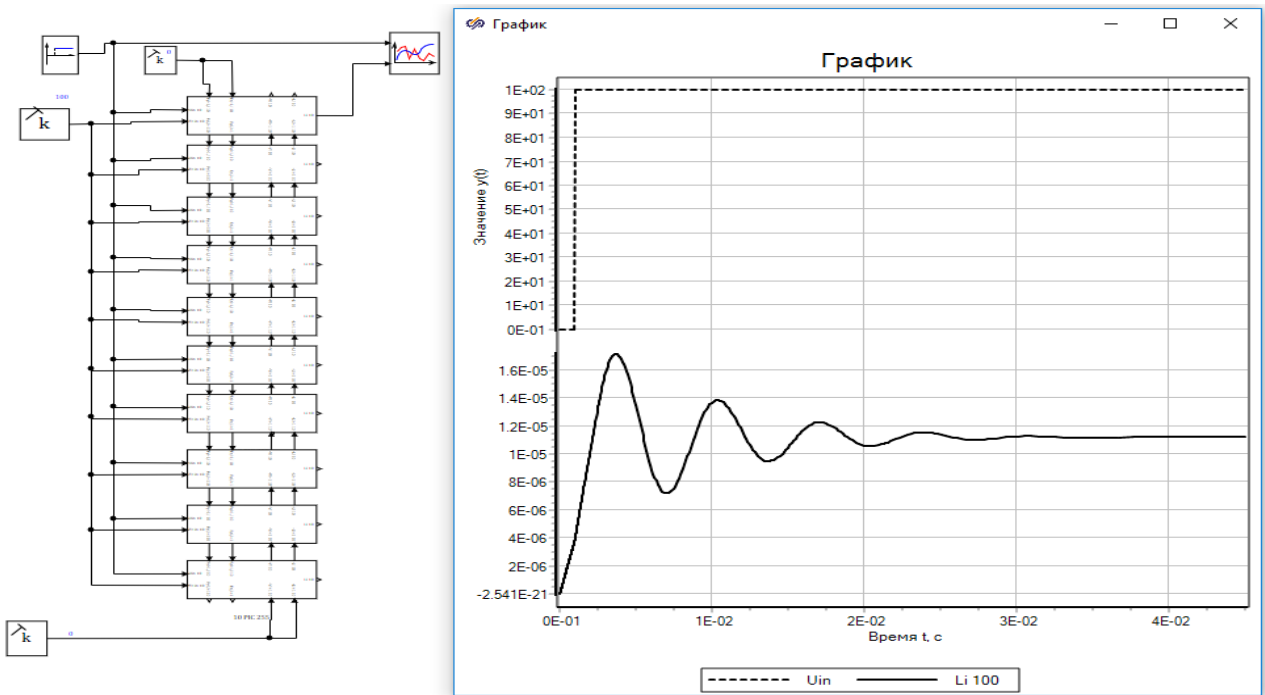


Рисунок 3.10 – Дослідження поведінки складального стовпа на PIC255: а – модель; б – графік залежності $\Delta = f(t)$

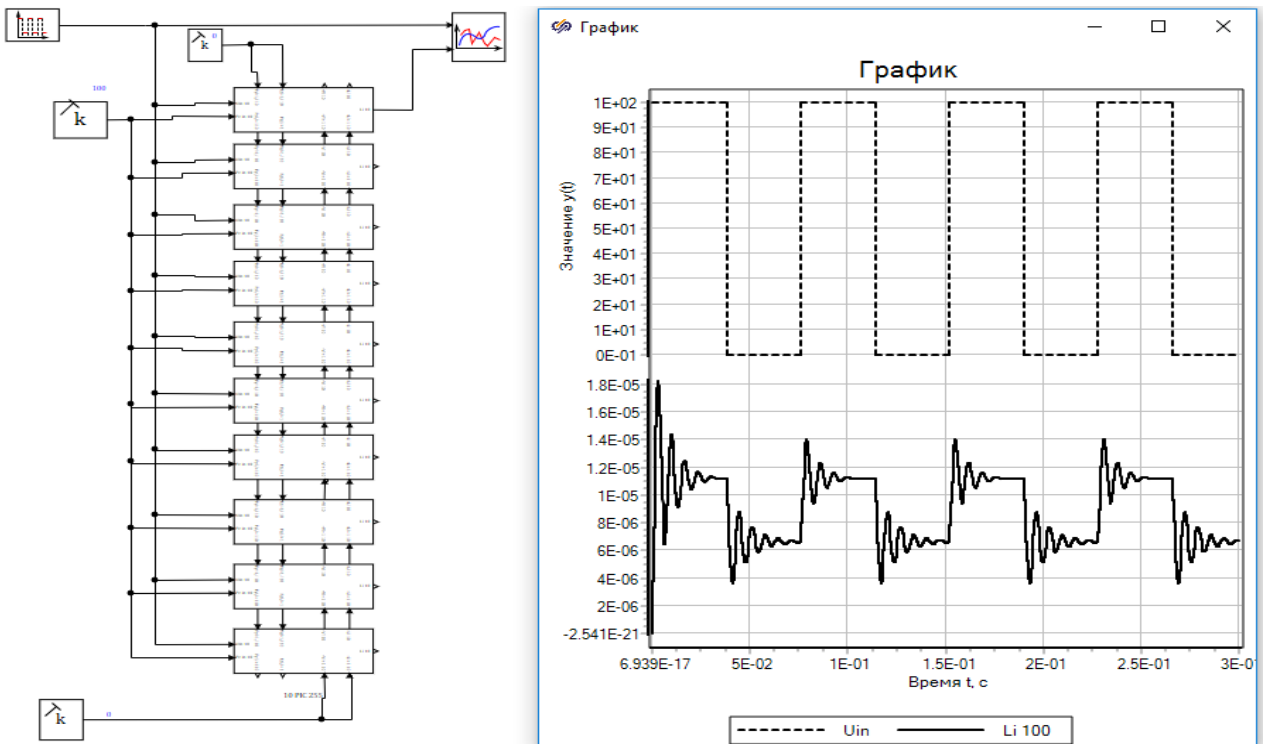
Таким чином, складальний стовп з трьох шайб розвиває переміщення 1.85 мкм.

3.2 Модель п'єзоперетворювача клапану подачі газу суднового дизель-генератора на основі складального стовпа

Для того, щоб досягти 0.4 мм, необхідно 200 комбінацій. Тоді розмір стовпа при товщині шайби складе 1 м без урахування електродів і клейового шва. Тому подальші дослідження будуть спрямовані на пошук конструктивних рішень в форматі підсилювачів у вигляді коромисел або гідравлічних систем низького тиску.




а)



б)

Рисунок 3.11 – Дослідження складального стовпа 100 ПЕ на PIC255: а – модель (ліворуч) і реакція на «сходінку» (праворуч); б – графік залежності $\Delta = f(y(t))$

Блок  формує на виході сигнал з рівномірних прямокутних імпульсів із заданими параметрами часу та амплітуди [65]:

$$y(t) = \begin{cases} y_1, \text{ при } \frac{t}{T_1+T_2} \leq \frac{T_1}{T_1+T_2} \\ y_2, \text{ при } \frac{t}{T_1+T_2} > \frac{T_1}{T_1+T_2} \end{cases}$$

де y_1, y_2, T_1, T_2 – властивості блоку, $y(t)$ – вихідний сигнал, t – поточний час моделювання в секундах, $\frac{t}{(T_1+T_2)}$ – дробова частина.

Слід зазначити, що в [48] були наведені результати моделювання складального стовпа моделі Р-056.90 на основі кераміки РС 255 з наступними параметрами: переміщення Δ – $180 \cdot 10^{-6}$ м; діаметр шару – 0,056 м; довжина – 0,154 м; зусилля – 78000 Н; електрична ємність C_0 – $2,7 \cdot 10^{-5}$ Ф; частота резонанса – 7000 Гц; маса стовпа – 2,96 кг. Передавальна функція набула наступного вигляду:

$$W_{\Delta}(p) = \frac{1094}{3,105 \cdot 10^{-3} p^3 + 2,95 p^2 + 1,8 \cdot 10^6 p + 1,599 \cdot 10^9}.$$

На рис. 3.12 наведено графіки АЧХ (а) і реакції (б) на одиничний ступінчастий вплив, аналіз яких дозволив зробити висновок, що при використанні даної конструкції можливо отримати необхідне перміщення при необхідному зусиллі, не перевищив сучасних вимог до часу перехідного процесу, яке склало менш 1 мс при потрібних 2 мс для вмикання / вимикання клапану.

Крім того, лінійність АЧХ в діапазоні частот від 0 до 100 Гц говорить про можливість використання даної конструкції в судових дизель-генераторах з частотою обертання до 6000 хв^{-1} . Однак, через сильне внутрішнє демпфування п'єзокераміки з'являються коливання виконавчого органу, що призводить до зниження рівномірності подачі палива і збільшення зносу пари сідло–клапан та тарілкового розпилювача газу.

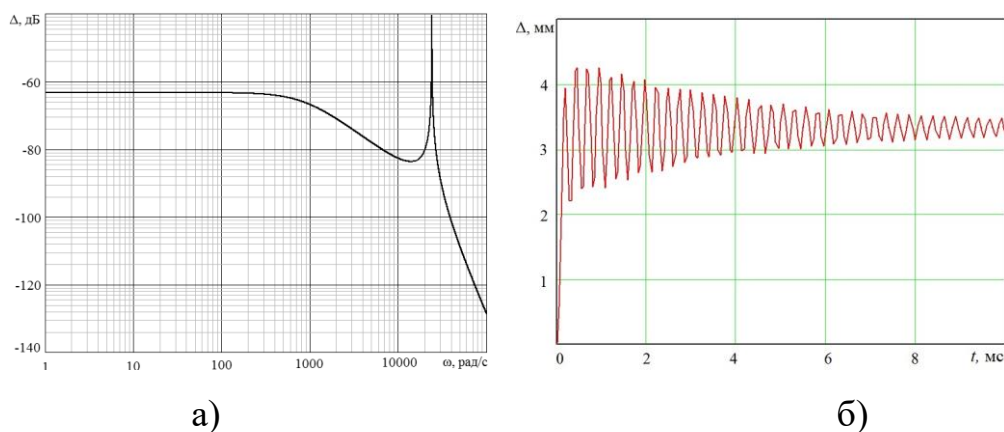


Рисунок 3.12 – Реакція складального стовпа п'єзоелектричних шайб: а – АЧХ; б – на вплив у вигляді «сходінка»

Застосування системи позиціонування з ПД-регулятором [43, 48] дозволило знизити амплітуду коливань при збільшенні часу перехідного процесу, але не виключило їх повністю.

Пошук можливих варіантів додаткового зменшення амплітуди коливань показав, що застосування нечіткого регулятора призводить до практично повного виключення коливань в клапані подачі палива з п'єзоелектричним перетворювачем електромеханічної системі. Це послужило передумовою для створення нової автоматизованої системи управління ПП, яку засновано на принципах нечіткої логіки [43, 48].

Апробація запропонованої нечіткої системи позиціонування на математичній моделі [43, 48] продемонструвала її ефективність. Так, коливання клапану подачі газу практично виключені, при дотриманні вимог, що пред'являються до часу вмикання.

Огляд ринку показав, що компанія Physik Instrumente (PI) [96], пропонує маніпулятори, які забезпечують пересування до 0,3 мм. Отже, з'єднавши їх електрично паралельно, можна отримати переміщення до 0,6 мм. Для їх виробництва використовується матеріал PС 151, який має наступні параметри: щільність ρ – 7800 кг/м³; відносна діелектрична проникність ϵ – 2400; п'єзомодуль d_{33} – $500 \cdot 10^{-12}$ Кл/Н; коефіцієнт електромеханічного зв'язку k_{33} – 0,69; модуль Юнга Y_{33} – $10 \cdot 10^{10}$ Н/м²; опір R_{BT} – 50 Ом; коефіцієнт демпфірування k_d – $8,9 \cdot 10^{-3}$ кг/см²; коефіцієнт пружності K_y дорівнює $2,011 \cdot 10^8$

Н/м; коефіцієнти прямого і зворотного п'єзоефекту K_p і K_z рівні 12,3 Н/В і 12,3 В/Н відповідно.

Для проведення дослідження було обрано складальної стовп моделі Р-025.200, який виконаний з матеріалу РІС 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.

Паралельне з'єднання складальних стовпів дозволяє отримати необхідне переміщення без застосування додаткових передач, що збільшує електричну ємність системи в 2 рази. Передавальна функція після підстановки значень матиме вигляд:

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

Дослідження розробленої системи позиціонування з двома паралельно з'єднаними складальними стовпами, з ПД- і нечітким регулятором підтвердило можливість її застосування на судових дизель-генераторах (рис. 3.13).

В [37, с. 139-140] згадувалося, що всередині типового блоку присутній цілий ряд коефіцієнтів масштабування K_y і K_d , які налаштовуються виходячи з очікуваних результатів. Тому були проведені дослідження для двох значень цих коефіцієнтів: 1 та 0.5 (рис. 3.14).

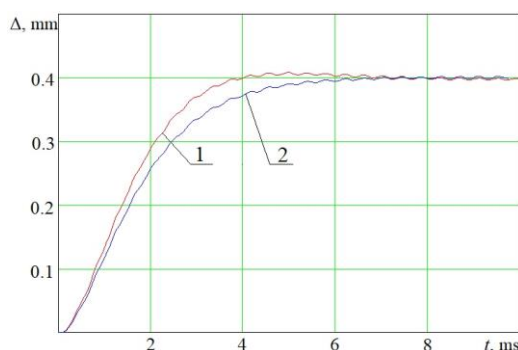


Рисунок 3.13 – Переміщення тарілки клапана подачі газу при ступінчастій зміні завдання для системи управління: 1 – з ПД-регулятором; 2 – з нечітким регулятором

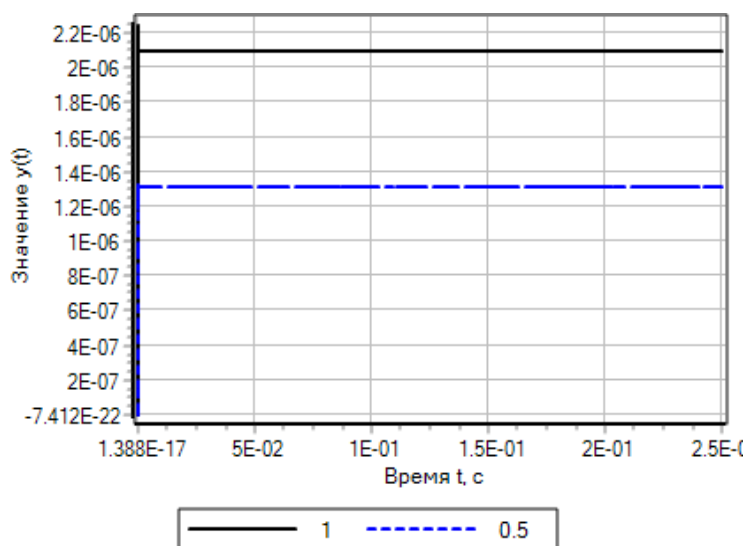
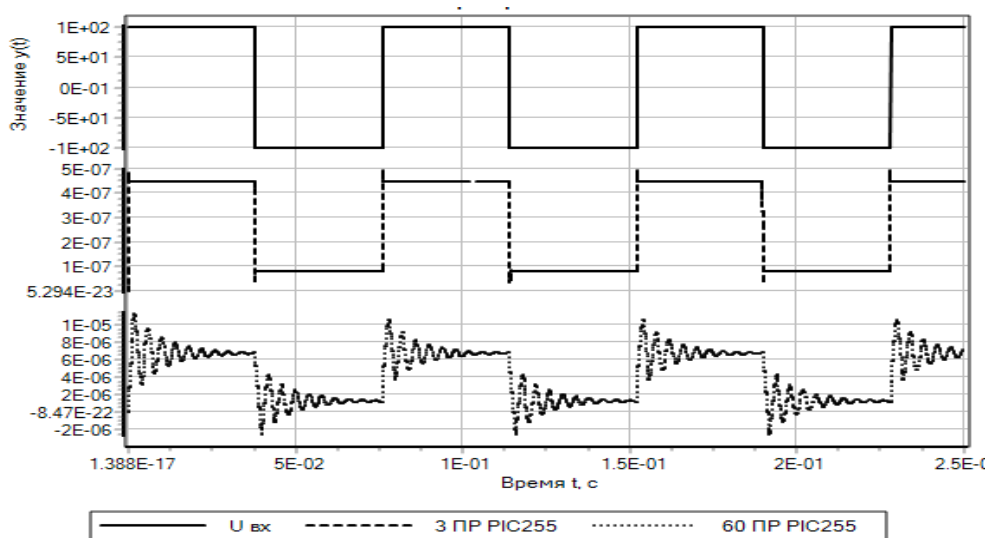


Рисунок 3.14 – Дослідження впливу масштабних коефіцієнтів K_y та K_d

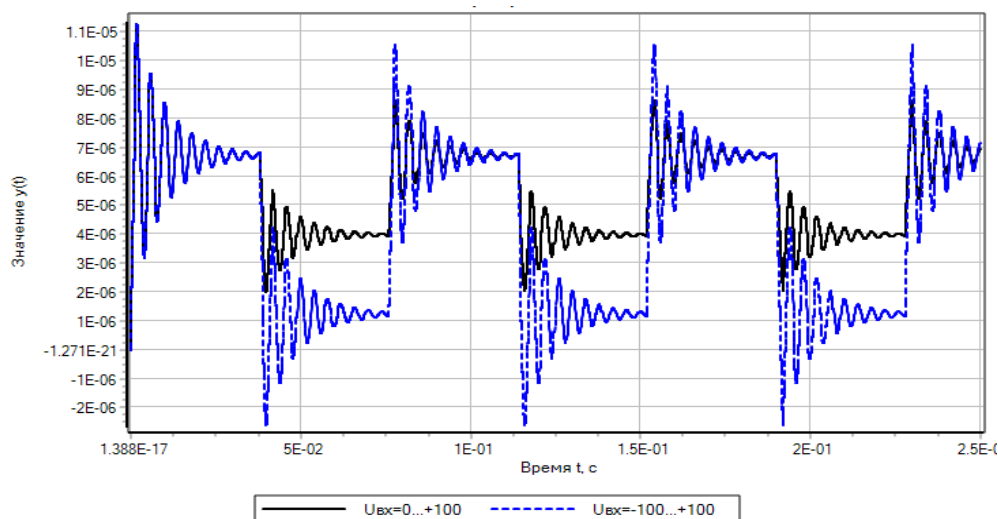
В результаті було встановлено, що переміщення вільного кінця складального стовпа зменшується практично в 2 рази.

На рис. 3.15 представлені дослідження стовпів з 3 і 60 п'єзоелектричних шайб [49] при зміні вхідної напруги від 0 до +100 В (рис. 3.15, а) і стовпа з 60 шайб при подачі двополярного сигналу управління від -100 В до +100 В (рис. 3.15, б).

В результаті моделювання встановлено, що на рис. 3.15, а кінець стовпа не повертається в початковий стан, а при подачі двополярного сигналу управління (рис. 3.15, б) повертається в початковий стан. Однак в цьому випадку може відбутися руйнування конструкції, про що йдеться в інструкції по монтажу складальних стовпів НПФ «Елпа», зокрема «... при встановленні не плутати полярність в уникненні виходу з ладу» [20].



а)



б)

Рисунок 3.15 – Дослідження переміщення складальних стовпів при однополярній (а) та двополярній (б) напрузі сигналу управління


Аналіз складальних стовпів Physics Instrument показав, що в лінійці силових перетворювачів серій P-010.xxP – P-056.xxP (Додаток Г) існує цілий ряд складальних стовпів, які можуть здійснювати переміщення від 0.12 до 0.18 мм (тал. 3.3).

У поєднанні з мультиплікаторами різних конфігурацій можливо отримати переміщення 0.4 мм. Причому зусилля, що блокує, настає при 2300 Н при подачі напруги 1000 В. Коефіцієнт передачі мультиплікатора може скласти 1:4 для складального стовпа P-010.80P діаметром 10 мм.

Таблиця 3.3 – Силові перетворювачі PI на основі PIC255

Order number	Displacement [μm] (0–1000 V) -10/+20%	Diameter OD [mm]	Length L [mm] ± 0.5	Blocking force (0–1000 V) [N]	Stiffness [N/ μm]	Capacitance [nF] $\pm 20\%$	Resonant frequency [kHz]
P-010.80P	120	10	111	2300	19	370	10
P-016.80P	120	16	111	5900	49	1000	10
P-016.90P	180	16	163	6000	33	1600	7
P-025.80P	120	25	113	14000	120	2600	10
P-025.90P	180	25	165	14000	80	4000	7
P-035.80P	120	35	114	28000	230	5200	10
P-035.90P	180	35	166	29000	160	7800	7
P-045.80P	120	45	116	44000	370	8800	10
P-045.90P	180	45	169	45000	250	13000	7
P-056.80P	120	56	116	68000	570	14000	10
P-056.90P	180	56	169	70000	390	21000	7

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

Блок  реалізує розрахунок важеля в узагальненій формі. Блок має три механічних порти (A, B і C) поступального руху. Будь-який порт може бути приєднаний до нерухомої опори, що перетворює важіль на важіль першого (точка опори на кінці) або другого (точка опори посередині) класу. Передбачається, що точка C знаходиться між точками A і B. Математична модель блоку описується наступними рівняннями [65]:

$$V_C(t) = K_{AC} \cdot V_A(t) + K_{BC} \cdot V_B(t),$$

$$F_A(t) = K_{AC} \cdot F_C(t),$$

$$F_B(t) = K_{BC} \cdot F_C(t),$$

$$K_{AC} = L_{BC} / (L_{AC} + L_{BC}),$$

$$K_{BC} = L_{AC} / (L_{AC} + L_{BC}),$$

де: $V_A(t)$, $V_B(t)$, $V_C(t)$ – швидкості точок A, B та C;

$F_A(t)$, $F_B(t)$, $F_C(t)$ – зусилля в точках A, B та C;

L_{AC} , L_{BC} – довжини плечей.

На рисунку 3.16 зображено властивості (а) та параметри важеля (б), який було задіяно при дослідженні стовпа зі 100 шайб.

Название	Имя	Формула	Значение
Плечо AC, м	AC	0.04	0.04
Плечо BC, м	BC	0.01	0.01
Цвет	cl		46848

а)

Название	Имя	Значение
Скорость порт A, м/с	Va	6.9734794E-9
Сила порт A, Н	Fa	15.61421
Скорость порт B, м/с	Vb	-1.7433698E-9
Сила порт B, Н	Fb	62.45684
Скорость порт C, м/с	Vc	0
Сила порт C, Н	Fc	-78.071049

б)

Рисунок 3.16 – Властивості (а) та параметри (б) важеля



Блок моделює механічний елемент поступального руху, на який діють сила інерції, позиційна сила, сила в'язкого тертя і сила сухого тертя. Маса елемента постійна. Позиційна сила лінійно залежить від переміщення елемента. При нульовому переміщенні елемента позиційна сила може мати як нульове, так і не нульове значення. Сила в'язкого тертя лінійно залежить від швидкості елемента. Сила сухого тертя розділена на силу тертя при страгуванні і силу тертя при русі, кожна з яких є постійною величиною. Математична модель блоку складається з наступних рівнянь [65]:

$$\frac{dV}{dt} = \begin{cases} 0, \text{ если } V \cdot V_{old} \leq 0 \text{ и } |F_{sum}| \leq F_{tr}^{str} \\ 0, \text{ если } A_{old} > 0 \text{ и } x_{old} \geq x_{max} \\ 0, \text{ если } A_{old} < 0 \text{ и } x_{old} \leq x_{min} \\ A, \text{ при прочих условиях} \end{cases}$$

$$\frac{dx}{dt} = \begin{cases} 0, \text{ если } V \cdot V_{old} \leq 0 \text{ и } |F_{sum}| \leq F_{tr}^{str} \\ 0, \text{ если } A_{old} > 0 \text{ и } x_{old} \geq x_{max} \\ 0, \text{ если } A_{old} < 0 \text{ и } x_{old} \leq x_{min} \\ V, \text{ при прочих условиях} \end{cases},$$

$$F_{sum} = F_{dvizh} - (F_{upr}^0 + c_{upr} \cdot x),$$

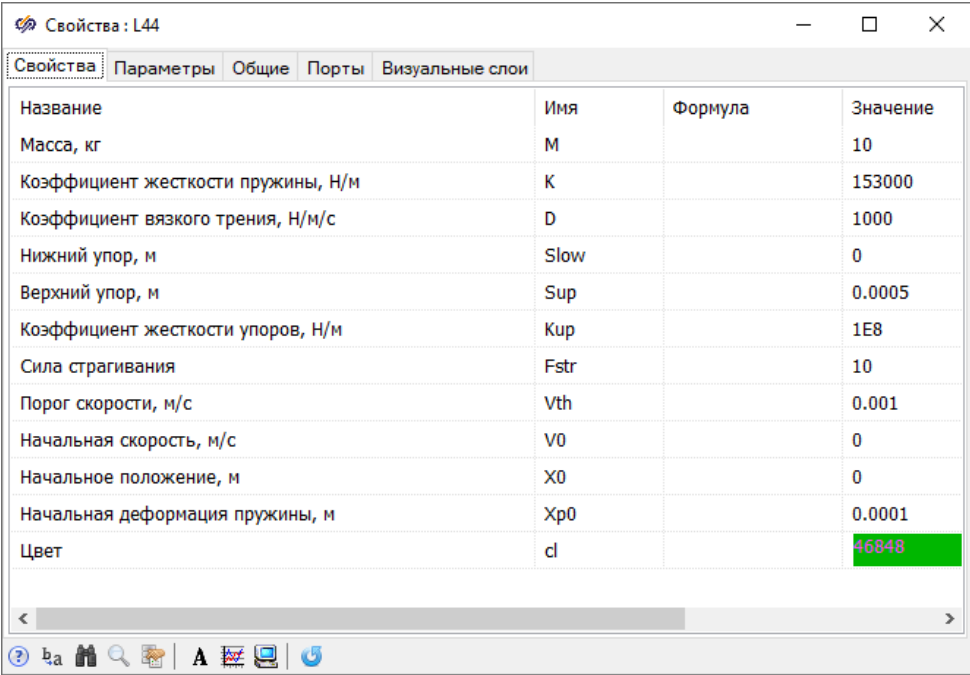
$$A = \frac{1}{M} \cdot [F_{dvizh} - (F_{upr}^0 + c_{upr} \cdot x) - K_{tr}^v \cdot V - F_{tr}^{dvizh} \cdot sign(V)],$$

$$F_{dvizh} = \sum_{i=1}^n F_i,$$

$$x = \begin{cases} x_{min}, \text{ если } x \leq x_{min} \\ x, \text{ если } x_{min} < x < x_{max} \\ x_{max}, \text{ если } x \geq x_{max} \end{cases}$$

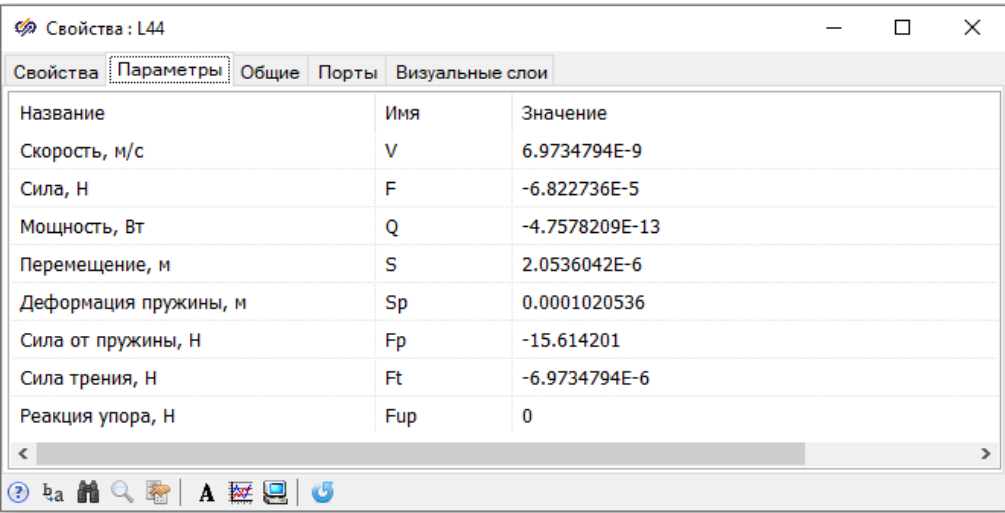
де V – швидкість переміщення механічного елемента; t – час; V_{old} – швидкість переміщення механічного елемента на попередньому кроці інтегрування; F_{sum} – сумарна сила, якій при спокої механічного елемента протидіє сила сухого тертя; F_{trstr} – сила сухого тертя при страгуванні; A_{old} – прискорення механічного елемента на попередньому кроці інтегрування; x_{old} – переміщення механічного елемента на попередньому кроці інтегрування; x_{max} – максимально можливе переміщення механічного елемента; x_{min} – мінімально можливе переміщення механічного елемента; A – прискорення механічного елемента; F_{dvizh} – сумарна рушійна сила, яка визначається, як сума зовнішніх сил; F_{upr}^0 – позиційне навантаження (сумарна сила від дії пружних елементів) при нульовому переміщенні механічного елемента; c_{upr} – еквівалентна жорсткість пружних елементів; x – переміщення механічного елемента; M – маса механічного елемента; K_{trv} – коефіцієнт в'язкого тертя; $F_{trdvizh}$ – сила сухого тертя при русі; $sign$ – Сігнум-функція, яка визначає знак швидкості переміщення механічного елемента; F_i – i -ая з n зовнішніх рушійних сил.

На рис. 3.17 зображено властивості, які обрано для моделювання роботи стовпа зі 100 шарами, та отримані параметри.



Название	Имя	Формула	Значение
Масса, кг	M		10
Коэффициент жесткости пружины, Н/м	K		153000
Коэффициент вязкого трения, Н/м/с	D		1000
Нижний упор, м	Slow		0
Верхний упор, м	Sup		0.0005
Коэффициент жесткости упоров, Н/м	Kup		1E8
Сила срагивания	Fstr		10
Порог скорости, м/с	Vth		0.001
Начальная скорость, м/с	V0		0
Начальное положение, м	X0		0
Начальная деформация пружины, м	Xp0		0.0001
Цвет	cl		46848

а)



Название	Имя	Значение
Скорость, м/с	V	6.9734794E-9
Сила, Н	F	-6.822736E-5
Мощность, Вт	Q	-4.7578209E-13
Перемещение, м	S	2.0536042E-6
Деформация пружины, м	Sp	0.0001020536
Сила от пружины, Н	Fp	-15.614201
Сила трения, Н	Ft	-6.9734794E-6
Реакция упора, Н	Fup	0

б)

Рисунок 3.17 – Властивості та параметри механічного елемента поступального руху для складального стовпа зі 100 шарами

На рис.3.18, 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. 3.18, б наведено результати моделювання.

Аналіз результатів довів, що при збільшенні кількості п'єзоелектричних шарів зменшується коливальність на відміну від результатів, які наведені на

рис. 3.11. Це пояснюється дією сил, які характеризують роботу важеля та блоку поступового руху. Однак, при збільшенні затягуються фронти механічної реакції.

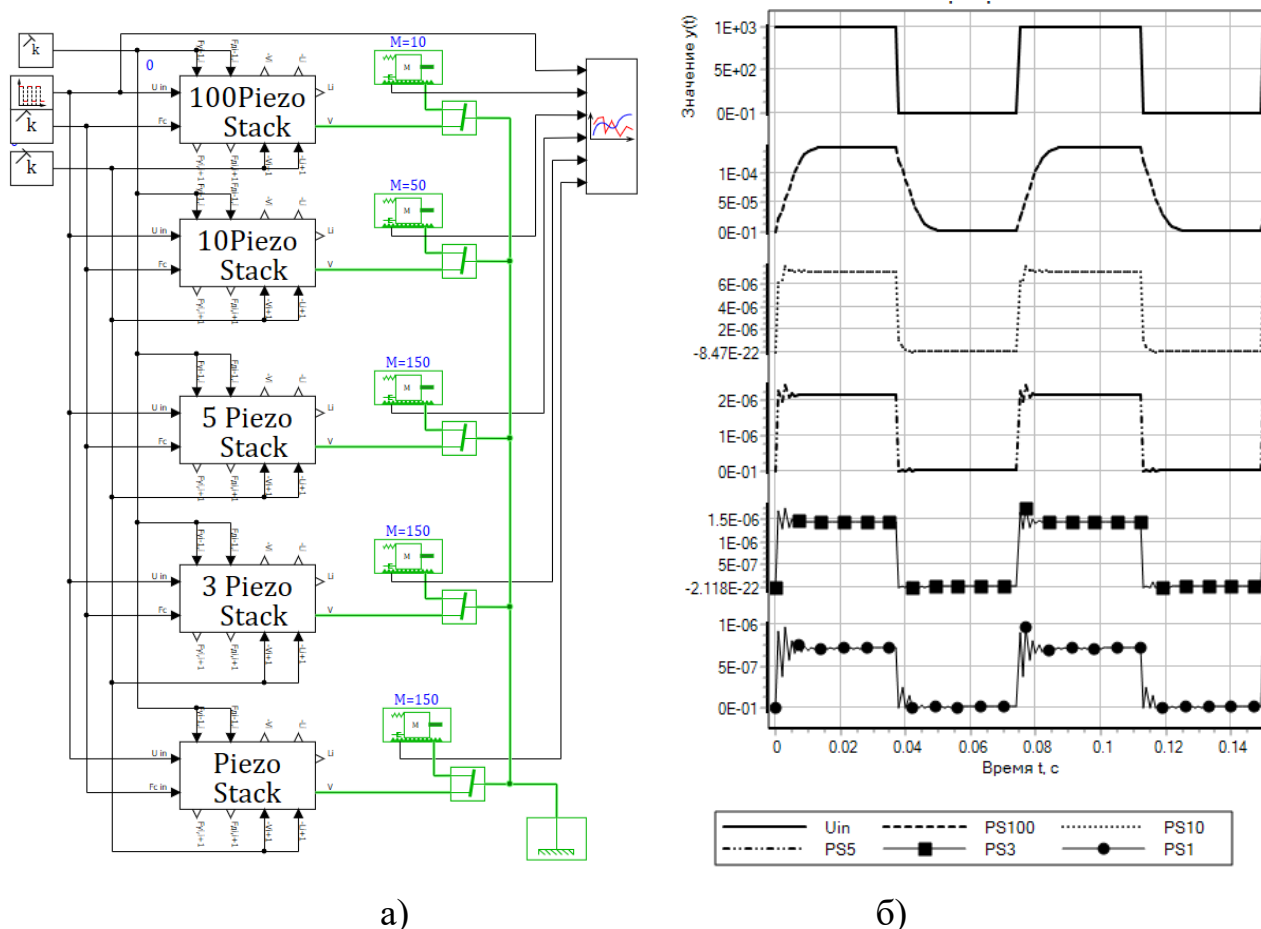
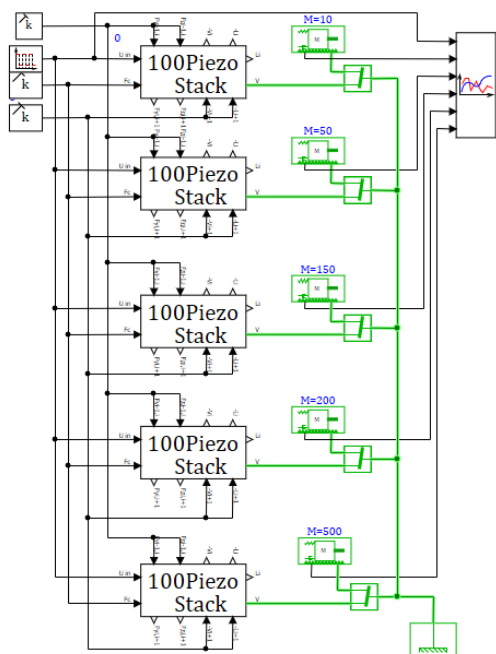


Рисунок 3.18 – Модель складальних стовпів з механічними важелем та елементом поступового руху (а), результат моделювання (б)

Крім того, було проведено дослідження поведінки складального стовпа зі 100 шарів при зміні навантаження, а саме ваги елемента поступального руху. На рис. 3.19, а наведено модель дослідження. Складальний стовп навантажується важелем, до якого під'єднаний елемент поступального руху, для якого на рис. 3.19, б наведені значення для властивостей. На рис. 3.19, в наведені результати моделювання.

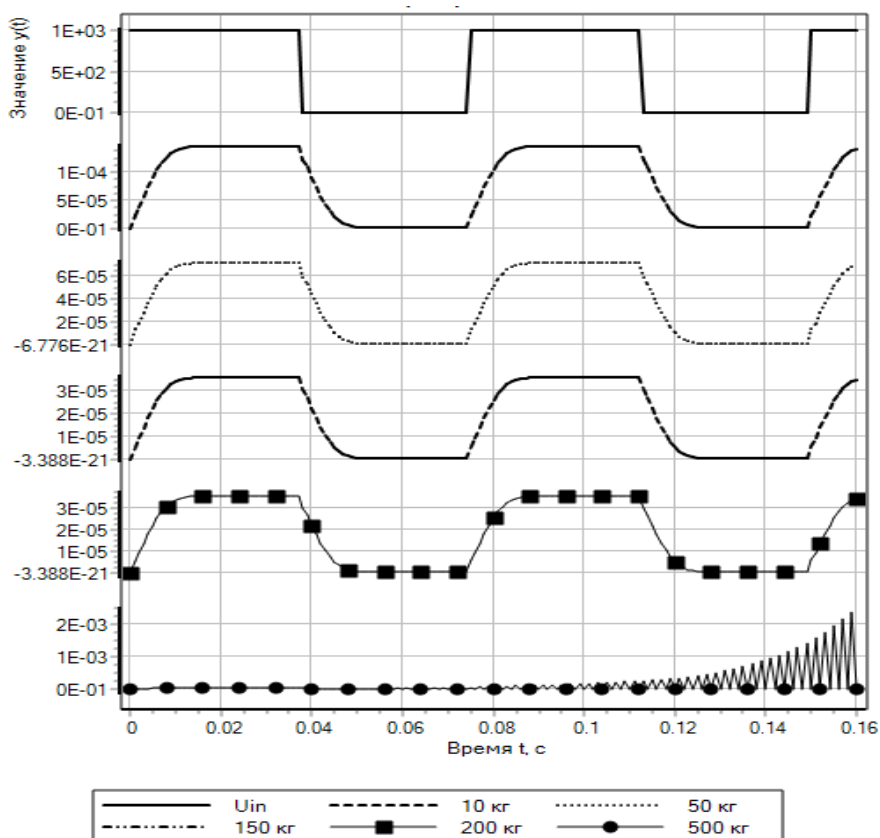


а)

Свойства: L44

Свойства			
Название	Имя	Формула	Значение
Масса, кг	M		10
Коэффициент жесткости пружины, Н/м	K		153000
Коэффициент вязкого трения, Н/м/с	D		1000
Нижний упор, м	Slow		0
Верхний упор, м	Sup		0.0005
Коэффициент жесткости упоров, Н/м	Kup		1E8
Сила срагивания	Fstr		10
Порог скорости, м/с	Vth		0.001
Начальная скорость, м/с	V0		0
Начальное положение, м	X0		0
Начальная деформация пружины, м	Xp0		0.0001
Цвет	cl		#6898

б)



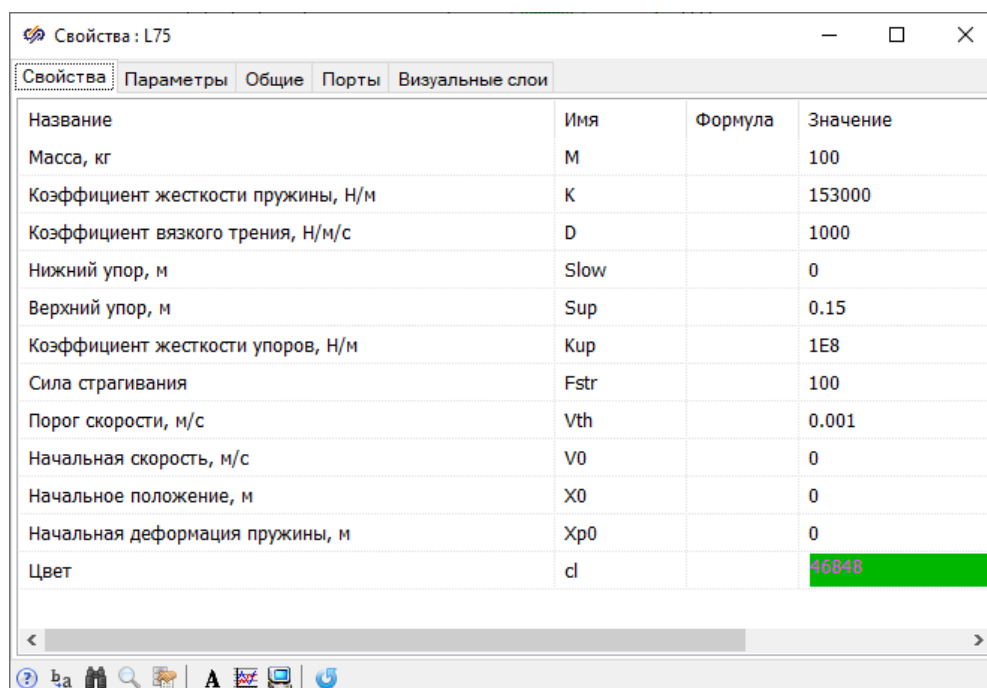
в)

Рисунок 3.19 – Модель складальних стовпів з механічним важелем та елементом поступального руху при різних значеннях ваги (а), властивості елемента поступального руху (б), результат моделювання (в)

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.

Наступне дослідження було проведено з метою визначення впливу важеля на роботу системи стовп–важіль–клапан (елемент поступального руху). На рис. 3.20 наведено властивості важеля а на рис. 3.21 наведено результати моделювання.



Название	Имя	Формула	Значение
Масса, кг	M		100
Коэффициент жесткости пружины, Н/м	K		153000
Коэффициент вязкого трения, Н/м/с	D		1000
Нижний упор, м	Slow		0
Верхний упор, м	Sup		0.15
Коэффициент жесткости упоров, Н/м	Kup		1E8
Сила страгивания	Fstr		100
Порог скорости, м/с	Vth		0.001
Начальная скорость, м/с	V0		0
Начальное положение, м	X0		0
Начальная деформация пружины, м	Xp0		0
Цвет	cl		46848

Рисунок 3.20 – Властивості важеля

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.

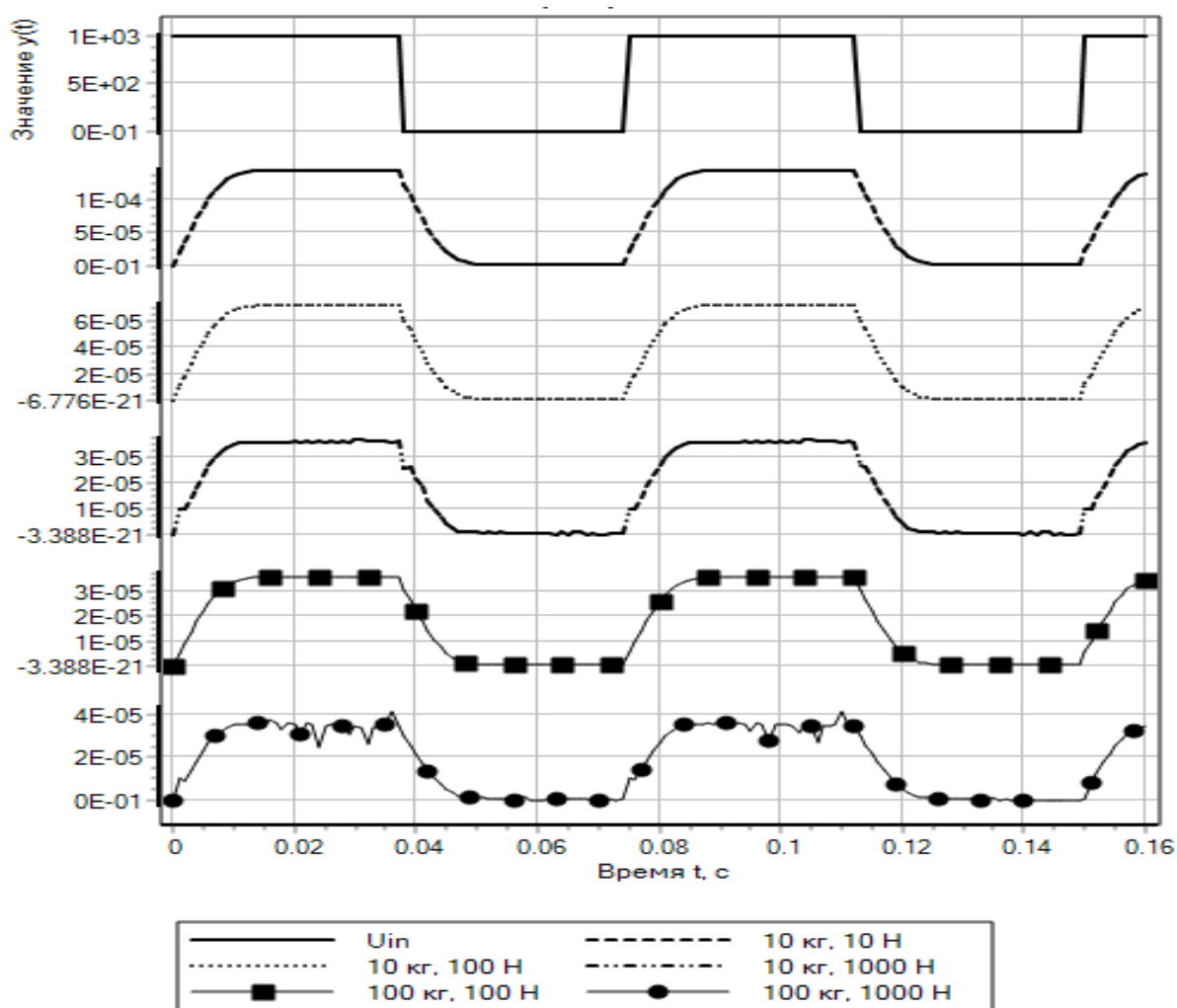


Рисунок 3.21 – Результат моделювання системи стовп–важіль–клапан при зміні властивостей важеля

Слід зазначити, що для того, щоб зменшити затягування фронтів можливе використання стовпів з диференціальною конструкцією (рис. 2.4, б). 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, дослідженню яких буде присвячено наступний параграф.

3.3 Модель п'єзоперетворювача клапану подачі газу суднового дизель-генератора на основі лінійного п'єзодвигуна

Нами пропонується конструкція «цифрового» клапану з п'єзоелектричним приводом, а саме реверсивним лінійним п'єзодвигуном.

В [43, 49, 55] було обґрунтовано можливість використання в якості приводу лінійного п'єзоелектричного двигуна і запропонована нова конструкція клапана [44] на основі двигуна LPM-5 [Додаток Е] (Small Scientific Production Enterprise "LILEYA" Ltd, м. Київ), який розвиває зусилля 2 Н.

На рис. 3.22 приведена модель ЛПД, до складу якої входять субмодель одного п'єзоелементу та субмодель фрикційного контакту, які реалізовано в середовищі моделювання SimInTech [6].

У субмоделі осцилятора була використана сегнетожорстка кераміка SP-4 [76], з наступними параметрами: $\epsilon_0=8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м; $\epsilon_{33}=1250$; $h=8,9 \cdot 10^{-3}$ кг/с; $g_{31}=-11 \cdot 10^{-3}$ Н/м; $\rho=7600$ кг/м³; $Y_{11}=8,3 \cdot 10^{10}$ Па; $d_{31}=-11,5 \cdot 10^{-12}$ Кл/Н; $R_{em}=50$ Ом; $K_{П1}=K_3=0,6$. При розмірах ПР $b=11,3 \cdot 10^{-3}$ м, $l=11,3 \cdot 10^{-3}$ м, $h=4 \cdot 10^{-3}$ м, $m_{\Sigma}=0,0019$ кг.

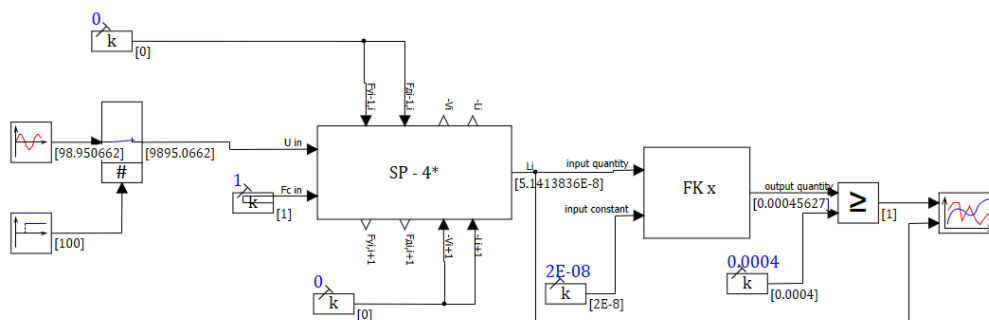


Рисунок 3.22 – Модель ЛПД (а) та субмоделі одного п'єзоелементу (б) та субмоделі фрикційного контакту (в)

Параметри для цих блоків для ЛПД LPM-5 складають: (1) – $k=0,6$, $T=1.75203E-11$; (2) – $k=257,6$; (3) – $k=1$; (4) – $k=30$; (5) – $k=2.6495675E9$; (6) – $k=0.0089$.

На рис. 3.23, б наведені результати моделювання роботи субмоделі осцилятора, який входить до складу субмоделі ЛПД (рис. 3.23 а), а на

рис. 3.23, в – результати моделювання фрикційного контакту та рис. 3.23, г – графіки швидкості та переміщення каретки.

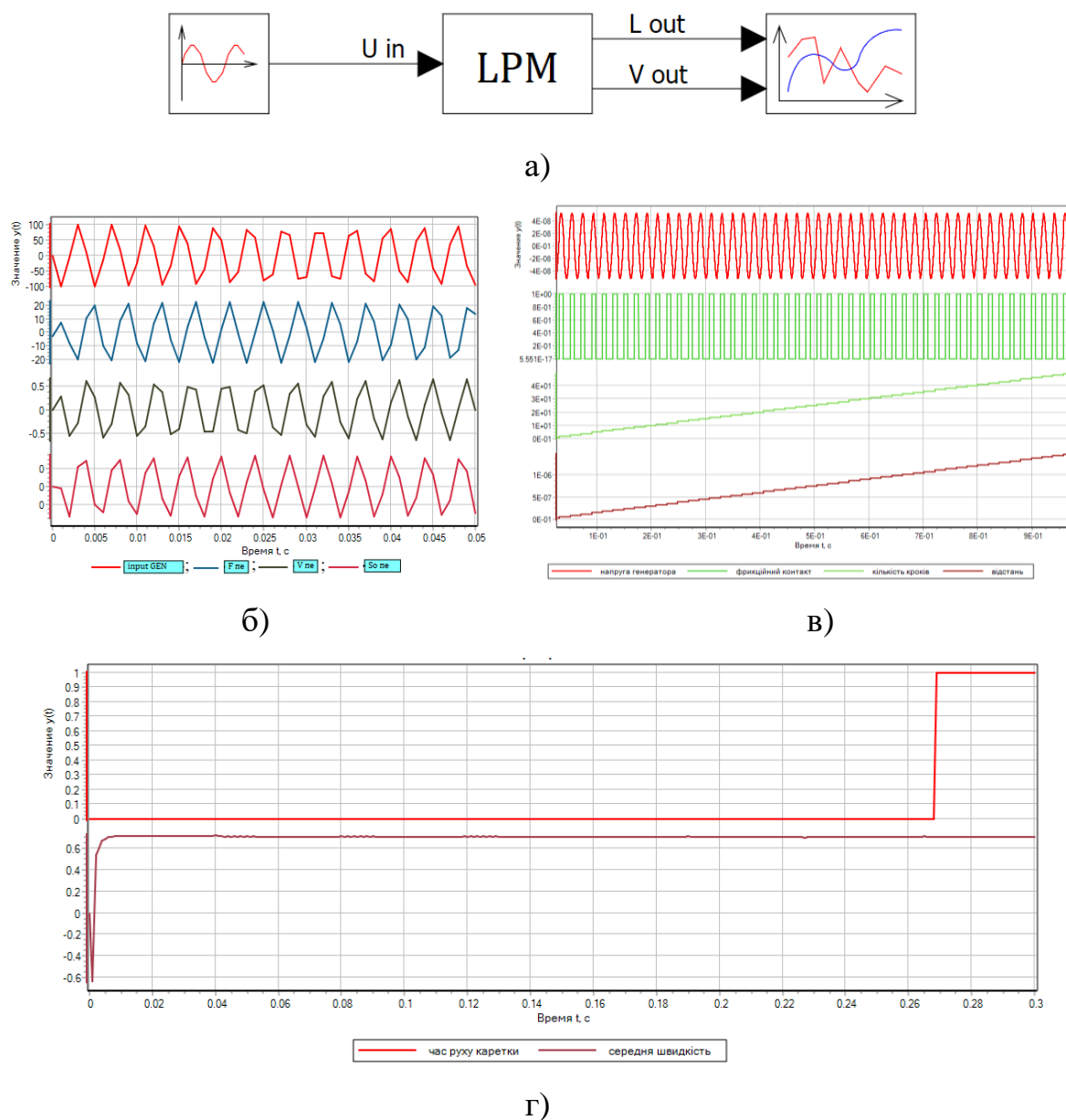
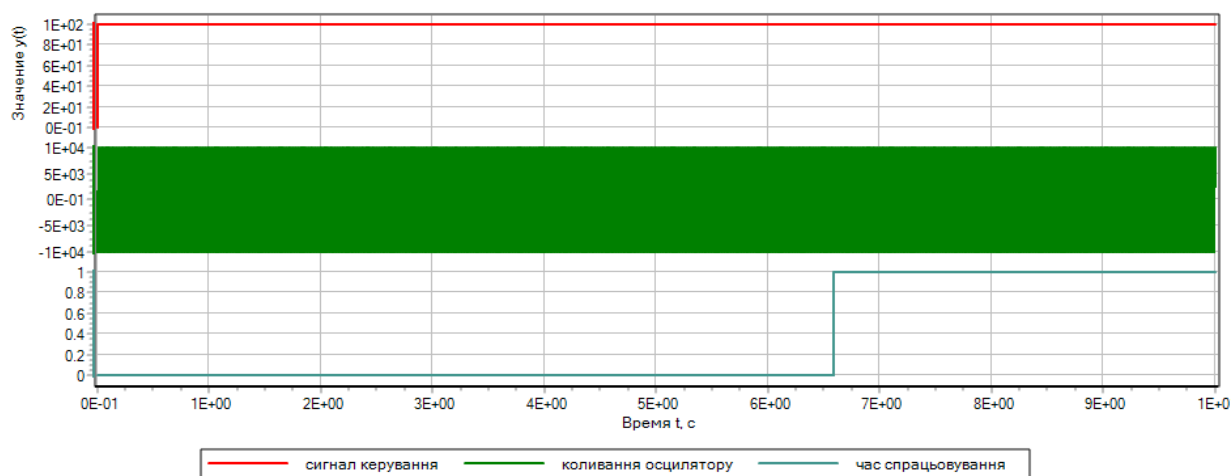


Рисунок 3.23 – Схема дослідження моделі ЛПД (а), результати моделювання роботи осцилятора (б) і субмоделі фрикційного контакту (в), графіки середньої швидкості та часу спрацьовування (г)

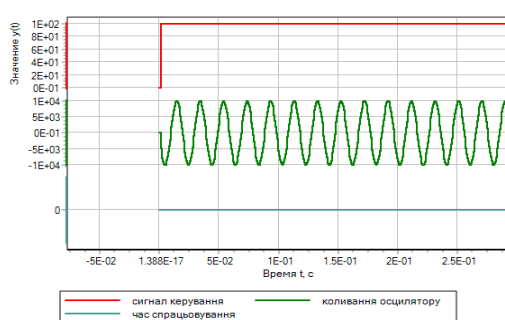
На рис. 3.24 наведені результати моделювання роботи лінійного п'єзоелектричного двигуна, які довели спроможність долати відстань 0.4 мм за 2 мс.

Однак, бувають випадки, коли потужності одного ЛПД не вистачає для подолання спротиву рідини, тому потрібно збільшувати потужність ЛПД.

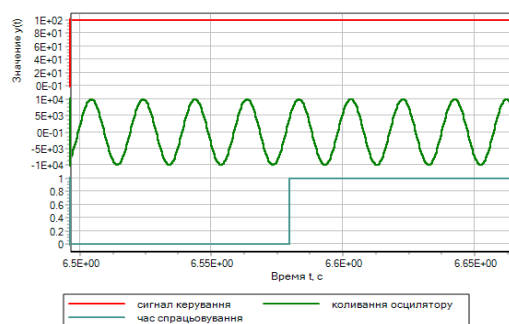
Збільшення потужності можливе завдяки паралельно-послідовному вмиканню декількох ЛПД. Використання сучасних технологій 3-D друку дозволяє спростити виготовлення таких конструкцій.



а)



б)



в)

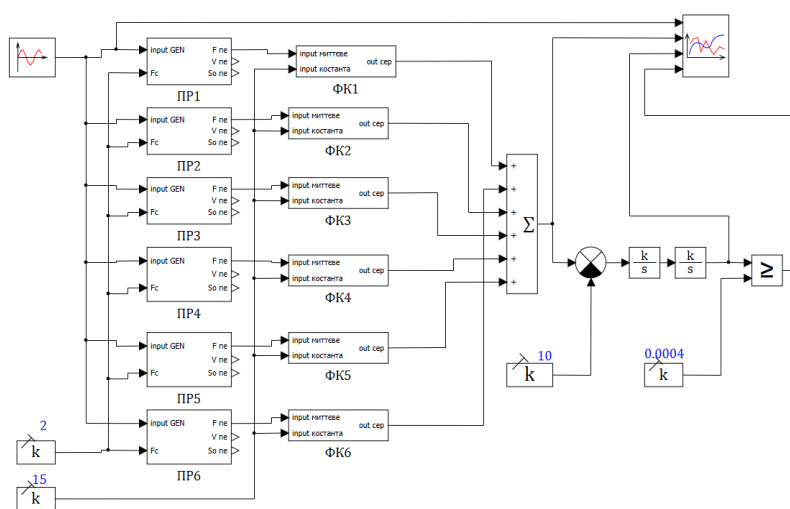
Рисунок 3.24 – Результат моделювання роботи одного п'єзодвигуна

На рис. 3.25, а представлена 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.

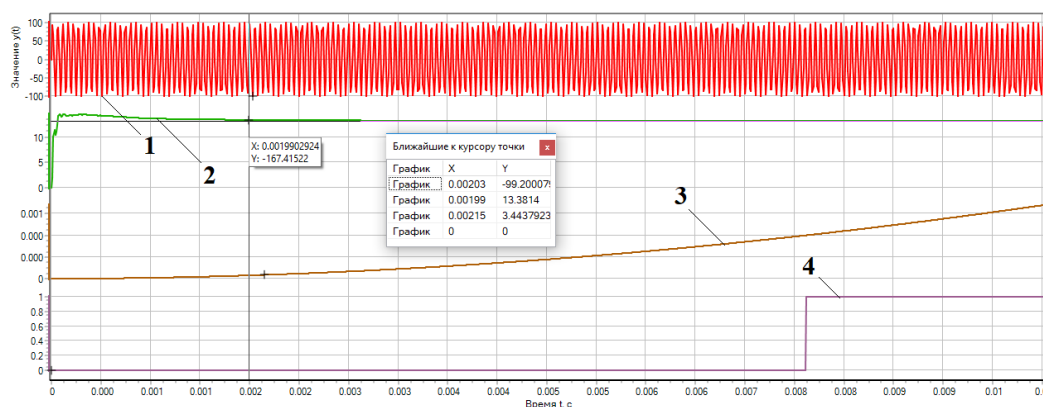
На рис. 3.25, б представлені графіки: 1 – вхідна напруга живлення осцилятора (частота – 120 кГц, амплітуда – 100 В); 2 – зусилля, що розвивається блоку ЛПД; 3 – переміщення клапана; 4 – час спрацьовування клапана. Слід зазначити, що частота коливань осцилятора була збільшена з 100 кГц до 120 кГц. Це дозволило збільшити зусилля, що розвивається одним осцилятором до 2,23 Н.

Отже, сумарне зусилля, що розвивається, через 0,3 мс складе 13,38 Н. Це

дозволяє відкрити клапан за 1.3 мс. На рис. 3.25, б вісь часу – це час виконання моделювання.



а)



б)

Рисунок 3.25 – Субмодель блоку з 6 ЛПД (а) і графіки сигналів (б)

Таким чином, поставлена мета була досягнута. Доведено можливість застосування ЛПД для приводу ПНВТ суднового дизеля з електронним управлінням.

Висновки до розділу 3

1. Моделювання впливу властивостей кераміки на характеристики п'єзоелектричних перетворювачів з трьох шарів довело, що на переміщення, а саме його збільшення, впливають коефіцієнт зворотнього п'єзоефекту, модуль Юнга, сила попереднього навантаження та габаритні розміри п'єзоперетворювача. На зменшення часу спрацьовування впливають також

збільшення добротності, коефіцієнту зворотнього п'єзоефекту, сили попереднього навантаження та модуля Юнга, а збільшення габаритних розмірів, навпаки, призводить до збільшення часу.

2. В результаті моделювання п'єзоперетворювача у вигляді складального стовпа встановлено, що блоки з трьох і шістдесяти шайб задовольняють вимогам, що пред'являються до швидкодії клапана подачі газу суднового двохпаливного середньо обертального дизель-генератора. Однак, для збільшення переміщення, необхідно використовувати більш 200 шарів, що призводить до збільшення габаритних розмірів, що в кілька разів перевершує розміри соленоїда.

3. Дослідження п'єзоелектричної кераміки від провідних виробників Німеччини, РФ та Індії довели, що найбільш сприятливі властивості має сегнетожорстка кераміка, зокрема PIC255.

4. В процесі моделювання встановлено коливальний характер системи, яка хоча й нижча, ніж у електромагнітного соленоїда, але все рівно присутня в режимі холостого ходу. Для усунення цієї коливальності було проведено дослідження використання ПД та нечіткого регуляторів, яке довело ефективність їх використання. Додатково, можлива послідовна корекція і корекція за допомогою гнучких і жорстких зворотних зв'язків, використання керованих джерел струму.

5. Було встановлено, що вільний кінець складального стовпа не повертається в нульовий стан. Запобігти цьому можливо за допомогою додаткового навантаження. Використання двополярного сигналу управління дозволяє повернутися в нульовий стан, але на практиці такий метод керування приводить до руйнування конструкції.

6. Проведені дослідження моделей перетворювачів з механічними підсилювачами дозволили підтвердити можливості їх застосування. Однак збільшення коефіцієнту підсилення призводить до зменшення навантаження, яке може п'єзоперетворювач пересувати. Тому потрібно збільшувати кількість складальних стовпів.

7. Дослідження лінійного п'єзоелектричного двигуна довели можливість використання в клапані подачі газу. Час спрацьовування такого клапану вкладається в становлені вимоги. Однак, істотного зменшення часу досягти не вдалося при теперішніх властивостях п'єзокераміки.

Тому подальші дослідження будуть спрямовані на розробку конструкцій клапана з п'єзоелектричним приводом з прийнятними маса-габаритними показниками.

Вірогідність отриманих результатів підтверджена при електронному моделюванні в SimInTech.

Практична цінність отриманих результатів полягає в можливості проектування п'єзоперетворювачів для клапану подачі газу в судновий дизель-генератор.

Основні результати розділу 3 опубліковані в [48, 49, 51, 52, 53, 55] або Додатку 9 [5, 7, 12 – 14, 16].

РОЗДІЛ 4

РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЙ П'ЄЗОПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ НА МАКЕТІ

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

4.1 Розробка клапану подачі газу з п'єзоперетворювачем на основі складального стовпа п'єзоелементів

Результати теоретичних досліджень розглянуті у розділі 2, експериментальні – у розділі 3. Розглянемо, як отримані положення реалізуються у конструкціях.

Один з варіантів такої конструкції наведений на рис. 4.1 [50].

Клапан подачі газу може бути реалізовано за допомогою стандартних елементів для боків, а саме: складальний стовп п'єзоелементів [96]; корпус клапану з пластиною для подачі газу [99]; систему керування [37].

Клапан подачі газу (рис. 4.1) містить корпус 1, в середині якого розташований клапан 2, який розділяє впускний 15 та випускний 16 отвори. До клапану 2 за допомогою гвинта 3 приєднано тарілку розпилу газу 4, яка під дією восьми пружин 5 прижимає клапан до сідла, які, в свою чергу, здійснюють попереднє навантаження складального стовпа п'єзоелементів, що забезпечує надійне закриття клапану при відсутності живлення електрикою. На верхній частині корпусу 1 клапану змонтовано складальний стовп п'єзоелементів 7, який розташований між основою та клапаном і утримується в стані попереднього навантаження блоком з восьми пружин 5, шайбою 8 та гайкою 9. П'єзоелектричні шайби, які входять до складу складального стовпу, з'єднані механічно послідовно, а електрично – паралельно. Між електродами

встановлено контакти 10, які надалі об'єднані кабелем 11. Складальний стовп п'єзоелементів 7 переміщує клапан 2 при подачі на них по кабелю 11 напруги від блоку керування 12. Для забезпечення герметичності клапану поверх складального стовпу п'єзоелементів змонтовано захисний корпус 13, в якому зроблено отвір для кабелю, який, в свою чергу, ущільнений резиною 14.

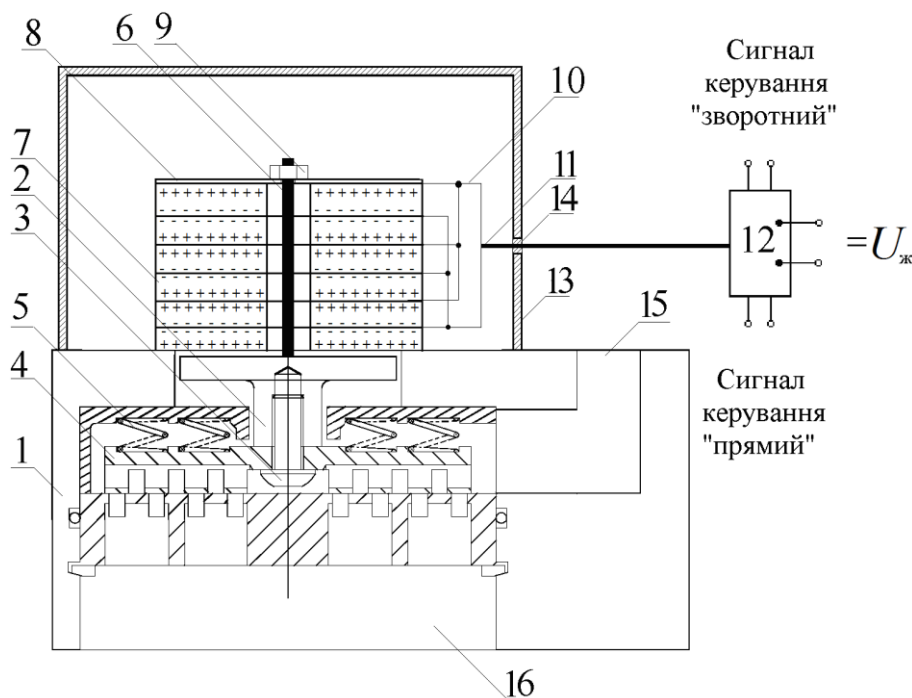


Рисунок 4.1 – Конструкція клапану подачі газу з п'єзоперетворювачем зі складального стовпа п'єзоелементів

У вихідному стані при вимкненому живленні клапан 2 з тарілкою розпилу газу 4 під дією пружин 5 знаходиться у закритому стані, тобто перекриває подачу газу з впускного отвору 15 до випускного отвору 16. При вмиканні живлення перетворювач напруги 12 перетворює постійну напругу у високочастотні імпульси різної тривалості, які подаються за допомогою кабелю 11 на складальний стовп п'єзоелементів, внаслідок чого збільшується його подовжній розмір, що призводить до руху клапану 2 з тарілкою розпилу газу 4. Газ починає поступати з впускного отвору 15 до випускного отвору 16. Через деякий час (2 мс) зі складального стовпа п'єзоелементів знімається напруга від блоку керування 12 і його подовжній розмір зменшується, а клапан під дією блока пружин повертається у закритий стан.

Перевагами такого рішення є:

- високий пусковий момент;
- лінійна швидкість переміщення клапану в діапазоні 0...0,2 м/с за рахунок подачі на нього сигналів управління для забезпечення лінійної швидкості переміщення клапану та зміни закону управління;
- відсутність коливання клапану з тарілкою розпилу газу;
- високу надійність і ресурс (більш 5000 год.);
- гарантовану безпеку у разі вимкнення електрики.

Слід зазначити недоліки конструкції, які обумовлені збільшеним ходом клапана – відносно велике переміщення (Δ) при значному зусиллі сили (F):

- збільшення τ часу перехідного процесу;
- збільшення габаритних розмірів.
- Зменшення τ можливо трьома способами:
- поділ одного стовпа на кілька (умовно 6) відповідно до принципу «мінімізації» (с. XX), кожен з яких буде управлятися від окремого блоку управління;
- застосування механічних підсилювачів (мультиплікаторів/важелів);
- використання рухового режиму, а, відповідно, і блоку двигунів.

Так на рис. 4.2 представлена конструкція клапана [54, 55], в якому один стовп замінений на блок з 7 складальних стовпів, причому 7-ий виконаний на основі кільцевих п'єзоелементів для підвищення ефективної площі. Крім того, можливий варіант використання складальних стовпів з прямокутними п'єзоелементами.

Позначення елементів на рис. 4.2 відповідає рис. 4.1.

Однак, таке конструктивне рішення дозволяє знизити тільки час перехідного процесу τ , а лінійні розміри складальних стовпів залишаться на колишньому рівні, більше 30 см. Тому наступне конструктивне рішення сприяє зниженню лінійних розмірів. Втім, конструкція ускладнюється.

На рис. 4.3 представлена конструкція клапана подачі газу, яка розроблена

на основі рішень компанії Siemens AG при створенні насос-форсунки з п'єзоелектричним приводом на основі складальних стовпів в поєднанні з механічними мультиплікаторами [63].

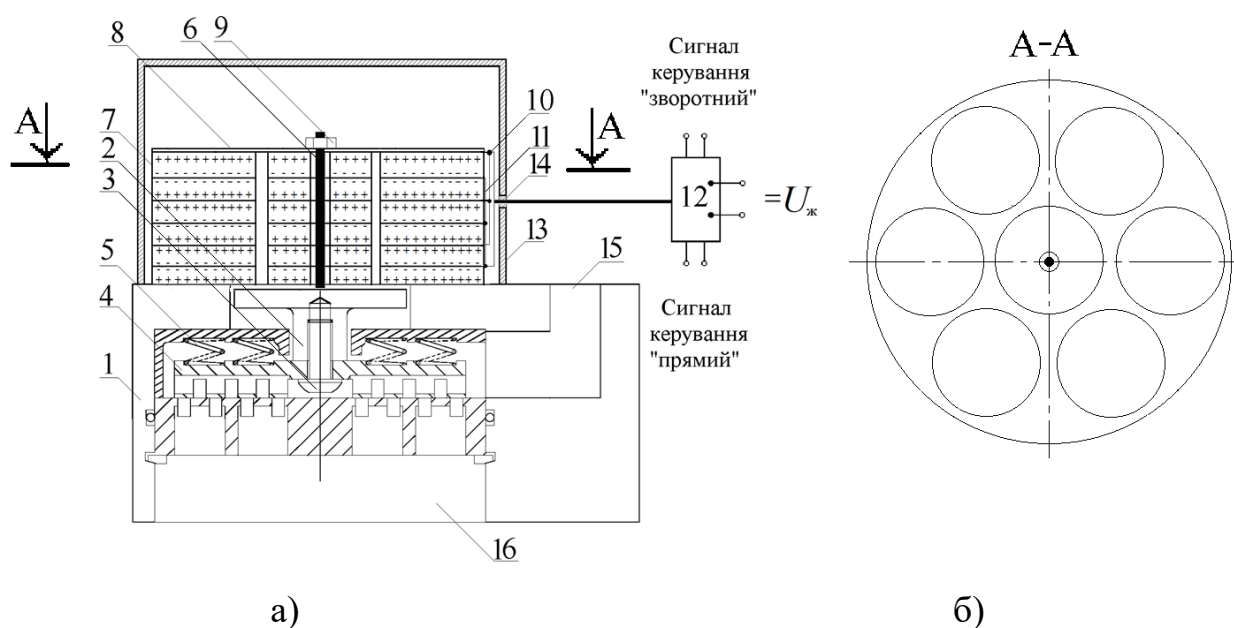


Рисунок 4.2 – Конструкція клапану подачі газу з п'єзоперетворювачем із набором із 7 складальних стовпів п'єзоелементів: а – конструкція; б – переріз

Зокрема, конструктивні елементи під номерами (1)–(16) відповідають елементам, наведеними на рис. 4.1, (17) і (18) – елементи мультиплікаторів, (19) – упор-покриття вільного кінця складального стовпа, (20) – упор, (21) – зовнішній циліндр, який вкручується в основу корпусу клапана (на рисунку різьбове з'єднання не показано), (22) – внутрішній циліндр (нарізне сполучення також не показано). У пази циліндрів (21) і (22) встановлюються елементи мультиплікаторів (17) і (18). Тут у порівнянні з попереднім конструктивним рішенням задіяно 6 складальних стовпів. Співвідношення елементів мультиплікатора дозволяє зменшити лінійний розмір стовпів в 2–3,5 рази.

Слід зазначити ще раз, що конструкція занадто складна. Її збірка відбувається в наступній послідовності:

- в основу вкручуються циліндри (21) і (22);
- заводиться шток клапана (6);
- встановлюються складальні стовпи;

- через отвори в циліндрі (21) пропускаються дроти для подачі напруги живлення (на рисунку ці отвори не показані);
- все складальні стовпи покриваються упором-покриттям (19);
- до відповідних пазів циліндрів (21) і (22) укладаються елементи мультиплікаторів (17) і (18);
- одягається стопорна шайба (8) і закручується гайка (9).

Слід зазначити, що момент затяжки визначає ступінь попереднього навантаження складальних стовпів щоб уникнути прояву таких явищ, як повзучість і гістерезис.

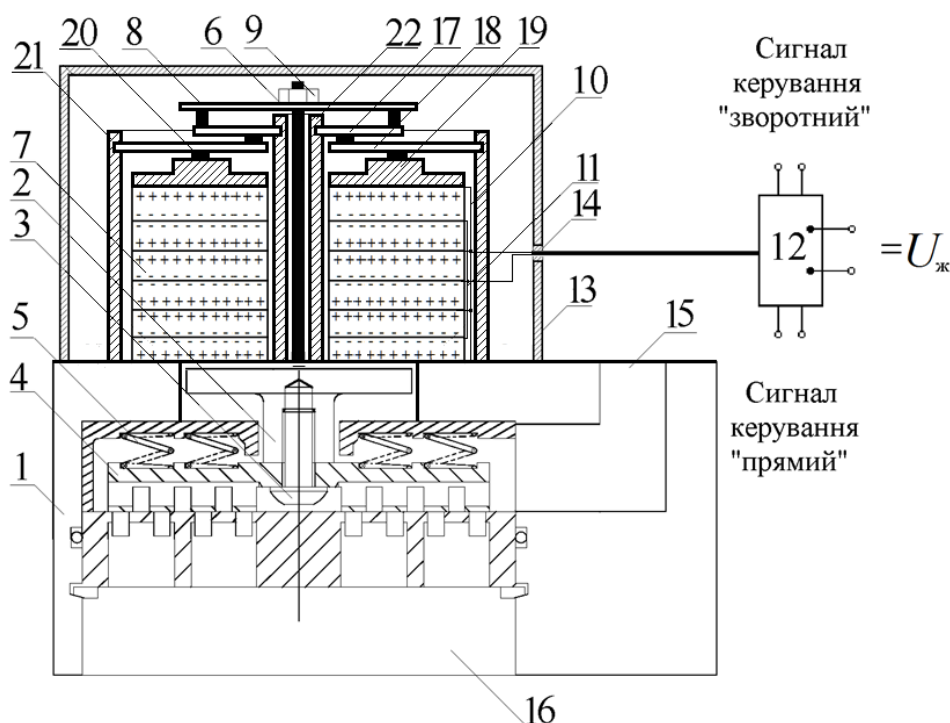


Рисунок 4.3 – Конструкція клапана подачі газу з п'єзоперетворювачем із набором із 6 складальних стовпів п'єзоелементів із мультиплікаторами

Недоліком такого клапана є складна схема управління проміжними станами клапана з метою забезпечення попереднього вприску газу.

Тому відповідно до принципу мінімізації була розроблена конструкція, яка представлена на рис. 4.4, яка дозволяє використовувати сучасні досягнення «цифрової рідини». Зокрема, кожен складальний стовп управляє окремим клапаном. На рис. 4.4 в розрізі показані 3 «цифрових» клапана на основі

складальних стовпів. У цій конструкції передбачено 7 клапанів, що дозволяє значно спростити схему управління за рахунок застосування простих драйверів. Однак, на виході, змінюючи комбінацію підключення окремих клапанів, можна отримати 7 станів об'єднаного клапана. Це дозволить застосувати будь-який закон управління подачею газу. Слід зазначити, що в разі виходу одного або декількох складових клапанів з ладу, подача газу в камеру згоряння не припиниться, що дозволить системі управління, помінявши співвідношення порції пілотного палива і газу, продовжити подальшу роботу. Сучасні ж рішення з електромагнітними соленоїдами виключають таку можливість. У такій ситуації система управління переводить дизель повністю на рідке паливо. У разі використання таких конструктивних рішень в якості генератора електростанції комп'ютерна система, як варіант, може відключити споживачів відповідно до їх пріоритету. І якщо використовувати електричний пропульсивний комплекс, то судно залишається на ходу, що дозволяє забезпечити гарантовану безпеку.

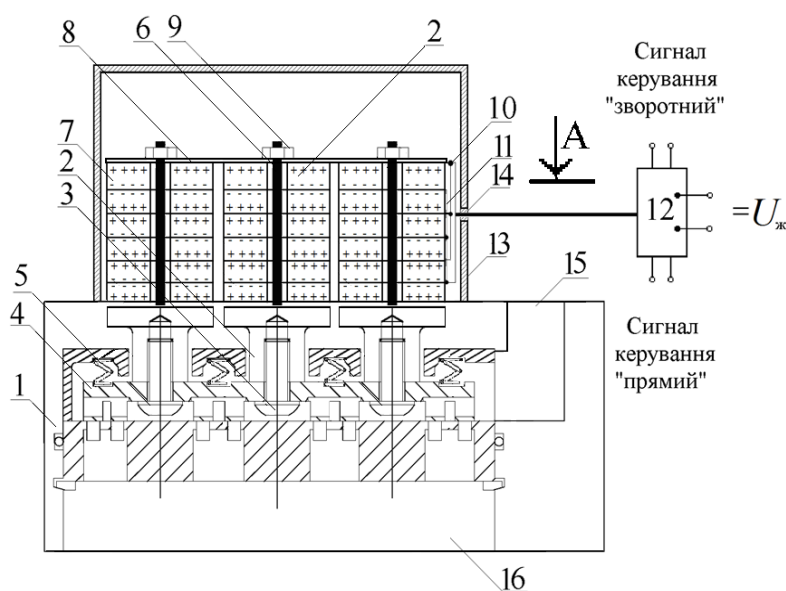


Рисунок 4.4 – Конструкція клапану подачі газу з п'єзоперетворювачем із набором із 6 складальних стовпів п'єзоелементів із мультиплікаторами

Однак, недоліком цієї конструкції залишаються великі лінійні розміри складальних стовпів. Застосування ж мультиплікаторів приведе до

невиправданих ускладнень конструкції, а, відповідно, і подорожчання клапана в цілому.

Слід зазначити, що конструктивно можливо переробити клапан на блок насос-форсунок II-го покоління зі складальними стовпами і мультиплікаторами. На поверхні діаметром 10 см можна розташувати 6 насос-форсунок.

Однак, значного зменшення лінійних розмірів блоку перетворювачів в порівнянні з електромагнітними не вдається досягти. Але якщо змінити тиск газу, що подається, зменшити хід клапана, то можна скоротити габаритні розміри. Але такі зміни зажадають тривалих досліджень процесів подачі палива і режимів роботи двигуна.

Тому, наступним етапом стало використання п'єзоелектричних двигунів.

4.2 Розробка клапану подачі газу з п'єзоперетворювачем на п'єзодвигунах

Як зазначалося в розділі 2, п'єзодвигуни бувають роторні і лінійні.

На рис. 4.5 представлена конструкція клапану подачі газу з роторним ПЕД, де 1 – корпус, 2 – реверсивний роторний ПЕД і 3 – дросельна заслінка.

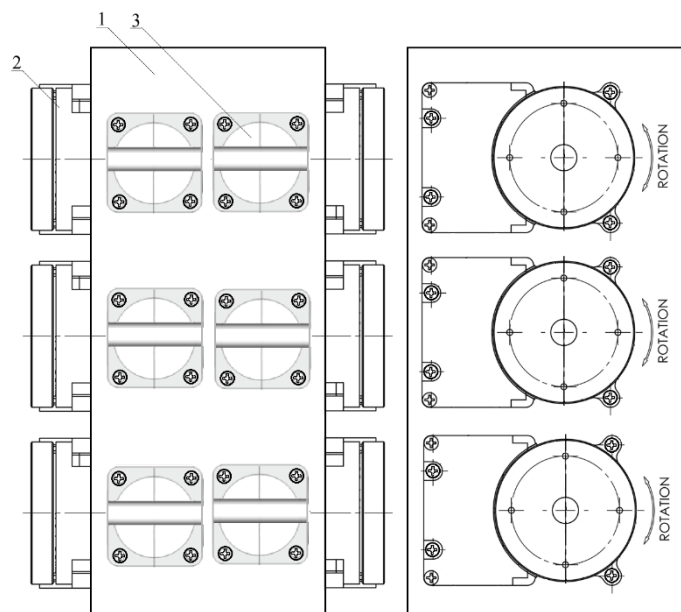


Рисунок 4.5 – Конструкція клапану подачі газу з п'єзоперетворювачем на основі реверсивного роторного п'єзодвигуна

В такому виконанні можливе використання реверсивних обертальних

двигунів [59, 91].

Оснащенні енкодарами обертання такі клапани дозволять вдосконалити конструкцію системи подачі газу, тому що ресурс таких ПЕД становить 5 тис. годин і вище в залежності від конструкції. В разі використання двигунів з корпусами, які виготовленні за допомогою 3-D друку, відбувається зниження металоємності конструкції, а, відповідно, вартості та надійності ПЕД.

Для відкриття заслінки на кут 90° за 2 мс необхідно, якби частота осцилятора становила більше 100 кГц. Таким умовам відповідають двигуни від компаній «Лілея» та «Discovery Technology International».

Однак, «дроселювання» в частині управління потоком паливної суміші менш ефективно в порівнянні з цифровими технологіями управління клапаном. Використання редукторів для перетворення обертального руху в поступове призведе до ускладнення та підвищення вартості конструкції.

Тому, було прийнято рішення про використання реверсивних лінійних п'єзодвигунів. Результати теоретичного дослідження за цією тематикою описано у підрозділі 2.3. Розглянемо, як отримані положення реалізуються конструктивно.

Застосування лінійних п'єзодвигунів в порівнянні з роторними не потребує перетворювачів обертального руху в зворотно-поступальний рух, наприклад, таких як черв'ячних редукторів, кривошипно-шатунного механізму, кулачкових шайб тощо.

Було отримано патент на корисну модель [44] для конструкції клапану подачі газу в судновий дизель-генератор з реверсивним лінійним п'єзоелектричним двигуном (рис. 4.6). В якості осцилятора використовується конструкція п'єзоелементу, як наведено на рис. 2.8, з п'єзокераміки SP-4, яка належить до особливого типу силової п'єзокераміки з основними хімічними компонентами цирконат-титанат-барію-свинцю. Даний матеріал призначений для виготовлення елементів, що працюють в режимі випромінювання і (або) прийому в умовах впливу сильних електричних полів і механічних напружень в рекомендованому діапазоні температур $-65...+85^\circ\text{C}$.

Клапан подачі газу може бути реалізовано за допомогою стандартних елементів, а саме: лінійний п'єзоелектричний двигун LPM-5 компанії Small Scientific Production Enterprise "LILEYA" Ltd, м. Київ [27]; корпус клапану з пластиною для подачі газу [98] та система керування [59].

Клапан подачі газу (рис. 4.6) містить корпус (1), в середині якого розташований клапан (2), який розділяє впускний (15) та випускний (16) отвори. До клапану (2) за допомогою гвинта (3) приєднано тарілку розпилу газу (4), яка під дією восьми пружин (5) прижимає клапан до сідла. Клапан знаходиться в закритому стані. На верхній частині корпусу (1) клапану змонтовано два ЛПД (7), які стягнуто металевою скобою (10). Рухомі частини ЛПД (8) приєднані до направляючої (6), яка упирається в клапан (2). П'єзоелектричні осцилятори (9) переміщують направляючу (6) та клапан (2) при подачі на них по кабелю (11) напруги від блоку керування (12). Для забезпечення герметичності клапану поверх ЛПД змонтовано захисний корпус (13), в якому зроблено отвір для кабелю, який, в свою чергу, ущільнений резиною (14).

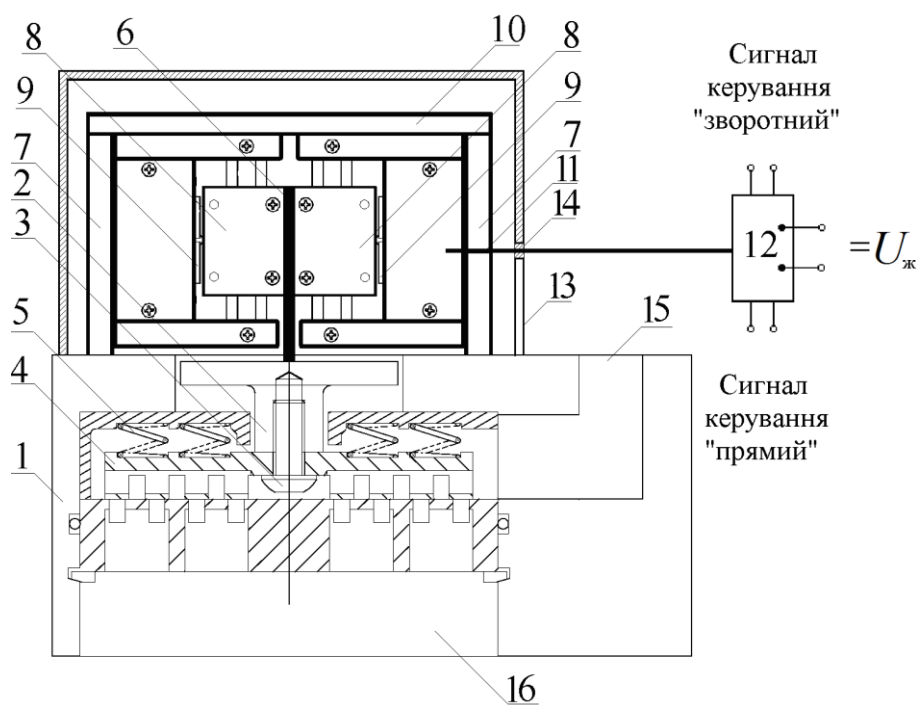


Рисунок 4.6 – Конструкція клапану подачі газу з п'єзоперетворювачем із ЛПД

У вихідному стані при вимкненому живленні клапан (2) з тарілкою

розпилу газу (4) під дією пружин (5) знаходиться у закритому стані, тобто перекриває подачу газу з впускного отвору (15) до випускного отвору (16). При вмиканні живлення перетворювач напруги (12) перетворює постійну напругу у високочастотні імпульси різної тривалості, які подаються за допомогою кабелю (11) на осцилятори (9) ЛПД (7), рухомі частини (8) яких починають рухатися та за допомогою направляючої б штовхають клапан (2) з тарілкою розпилу газу (4). Газ починає поступати з впускного отвору (15) до випускного отвору (16). Через деякий час (2 мс) на осцилятори від блоку керування (12) подається напруга протилежної полярності і направляюча (6) під впливом осциляторів та пружин, які вижимають тарілку (4), відпускає клапан (2), який переходить у закритий стан.

Перевагами такого рішення є:

- високий пусковий момент;
- регулювання лінійної швидкості переміщення клапану в діапазоні 0...0,2 м/с за рахунок широтно-імпульсної модуляції сигналів управління, які надходять на осцилятори ЛПД, для забезпечення лінійної швидкості переміщення клапану та зміни закону управління;
- відсутність коливання клапану з тарілкою розпилу газу;
- високу надійність і ресурс (більш 5000 год.);
- гарантовану безпеку: іскровибухонебезпечність; відсутність випромінюваних магнітних полів.

Але є недолік пристрою, який обумовлений використанням реверсивного лінійного п'єзоелектричного двигуна, – у разі аварійного відключення живлення електрикою схеми керування неможливо автоматично повернути клапан у закритий стан задля відсічі подачі газу в камеру згорання, що може призвести до викиду його в довкілля з можливістю вибуху.

Тому для повернення клапану в зачинений стан було залишено блок пружин, який призвів до збільшення навантаження на ЛПД. Тому для збільшення потужності приводу необхідно збільшувати потужність двигуна, або використовувати блоки з декількох ЛПД.

Ця конструкція може виконувати роль елементарної комірки («цифровий» клапан). Об'єднання набору з 6 елементарних комірок забезпечує необхідний прохідний перетин для газу.

Оцінимо можливість реалізації такого осередку існуючими на сьогоднішній день ЛПД, які випускаються промислово.

При необхідному переміщенні $\Delta = 0.4$ мм і розмірах осцилятора $b=11,3 \cdot 10^{-3}$ м, $l=11,3 \cdot 10^{-3}$ м, $h=4 \cdot 10^{-3}$ м для LPM-5 [Додаток Е], час переміщення рухомої частини ЛПД складе 2 мс, що повністю задовольняє експлуатаційним вимогам до електричної частини клапана (див. табл. 2.2).

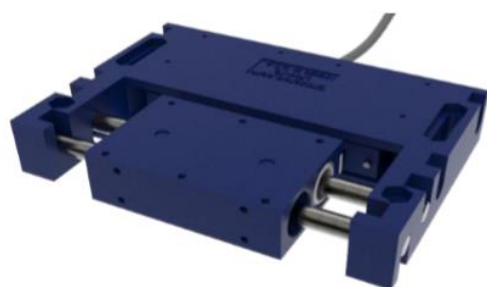
Тоді, в варіанті однорівневого виконання при установці 6 ЛПД LPM-5 зусилля, що розвивається складе 12 Н. Тобто для досягнення зусилля 100 Н блоком ЛПД потрібно багаторівневе розташування ЛПД, а саме 9 рівнів. При лінійних розмірах LPM-5 висота конструкції складе 0,5 м, що є неприйнятним. Проведений пошук ЛПД показав, що у провідних виробників є двигун LPM-10 (аналог LCS010), який розвиває зусилля 10 Н [89], паспортні дані якого наведені в табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Параметри лінійного п'єзодвигуна LCS010

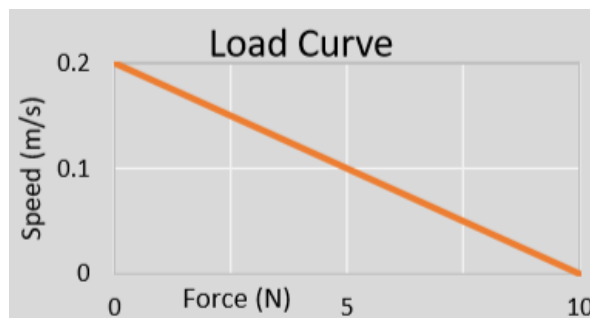
Motor Specifications	Standard	Encoder
Mode of Operation	Stepping & Continuous	
Push/Pull Force	>10N	
Self Braking Force	>12N	
Response Time	30 μ s to 50 μ s	
Velocity Range	0 to 0.2 m/s	0.014 to 140mm/s
Travel Range	30 mm	
Minimum Linear Step (resolution)	<0.05 μ m	
Minimum controlled Linear Step	N/A	2.6 μ m
Dynamic Range	4 kHz	
Supply Voltage for Driver	12 VDC	
Operating Temperature	-20° to 80°C	
Max Current over velocity range	1600mA	
Motor Weight	190g	220g
Motor Dimensions (mm)	106x77x18	106x77x25
Driver PCB Dimensions (mm)	48x63x25	

На рис. 4.7 представлений зовнішній вигляд і навантажувальна

характеристика LCS010.



а)



б)

Рисунок 4.7 – П'єзодвигун LCS010: а – зовнішній вигляд; б – навантажувальна характеристика

Очевидно, що використання такого двигуна при однорівневому розташуванні двигуна дозволяє досягти зусилля 60 Н. А для подолання зусилля блоку пружин в 100 Н досить дворівневого блоку з 12 ЛПД LCS010.

На рис. 4.8 представлений креслення конструкції двигуна з габаритними розмірами.

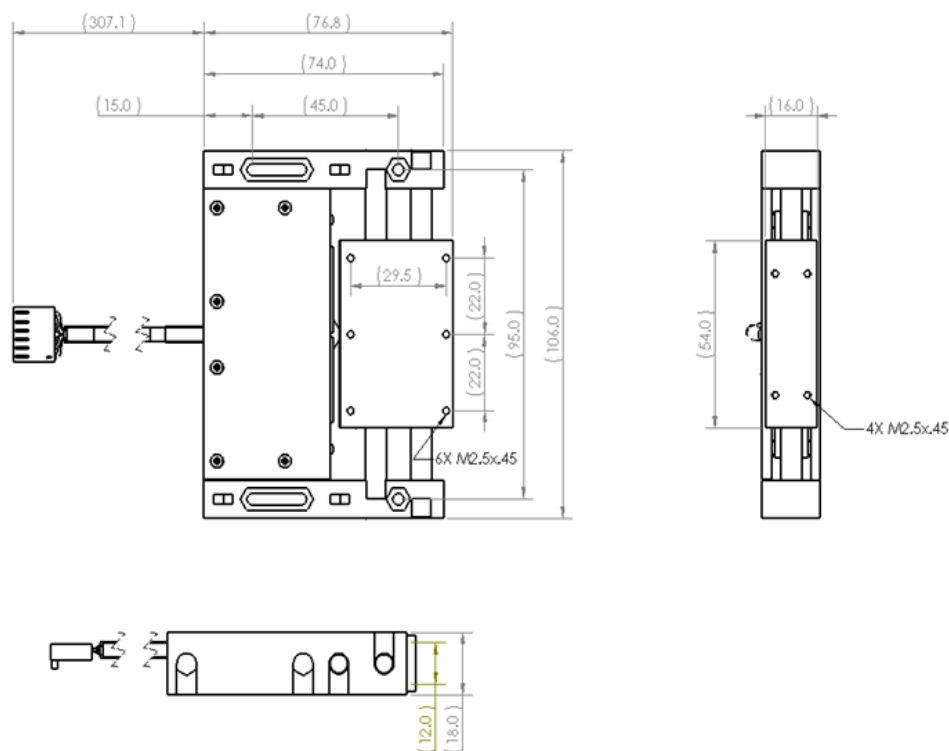
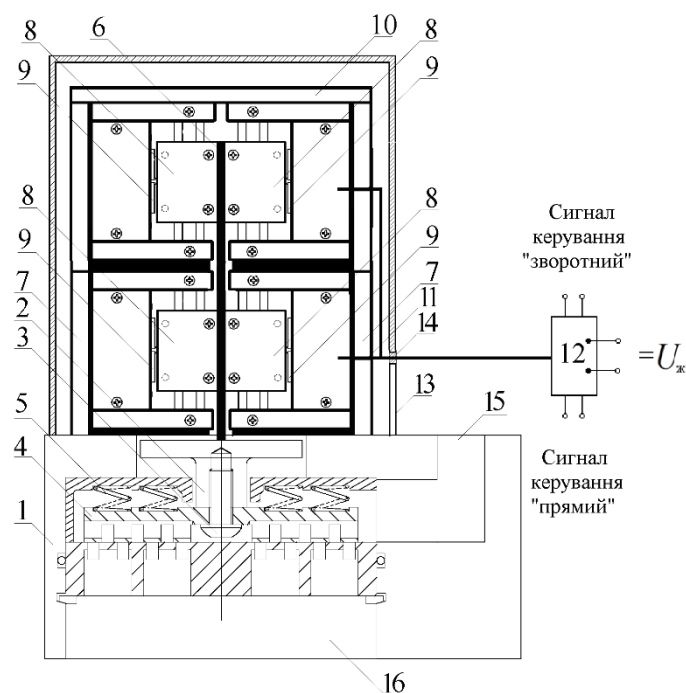


Рисунок 4.8 – Конструкція LCS010

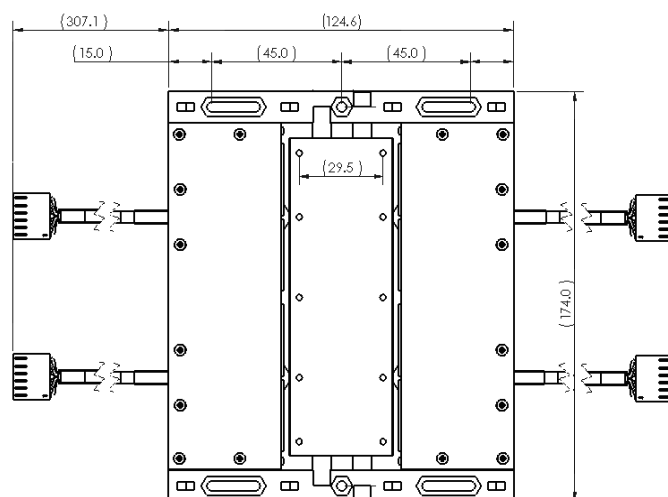
Очевидно, що розмір двох рівнів складе 21,2 см, що в 2 рази перевищує

розмір існуючого електромагнітного перетворювача. Якщо ж врахувати, що необхідне переміщення менше 1 мм, а у даній конструкції хід рухомої частини 30 мм, то можна довести розмір по вертикалі 106,0 мм до 87,0 мм і досягти сумарного розміру дворівневого блоку LCS010 до 174,0 мм.

Так, на рис. 4.9, а представлена конструкція клапана подачі газу з дворівневим розташуванням блоків ЛПД CLS010.



а)



б)

Рисунок 4.9 – Конструкція клапана подачі газу з багаторівневим розташуванням ЛПД (а) та запропонована конструкція парного ЛПД (б)

У разі ж масового виробництва таких клапанів, можливе застосування пропонованої нами зменшеною на 20 мм конструкції ЛПД, як показано на рис. 4.9, б.

4.3 Розробка натурального макету та експериментальні дослідження п'єзоелектричного перетворювача на базі ЛПД

Крім того, слід зазначити, що на базі п'єзоелектричних перетворювачів для потреб судна можуть бути реалізовані й інші компоненти двигунів.

Так, зокрема, автором була розглянута та запатентована [39] конструкція суднового дизеля з п'єзогенератором, де з п'єзокераміки була виготовлена циліндрична кришка, що дозволило виробляти додаткову електроенергію для суднових потреб [40]. Проте через непряме відношення результатів розробок в цих патентах до створення переміщень п'єзоприводів надалі в роботі їх не розглядається.

Також деякі рішення, що розглянуті в [47] і відносяться до комп'ютерної системи визначення реологічних характеристик суднових технічних рідин і які застосовані при управлінні ЛПД при проведенні досліджень по визначенню часу спрацьовування клапана, а саме модернізований фрагмент функціональної схеми блоку Main [47], в якому реалізовані такі операції: запуск ЛПД; визначення положення рухомої частини; управління проходами клапану при різних швидкостях, коли здійснюється регулювання частоти обертання дизель-генератора.

На рис. 4.10 змінні I_0_1_1_1_1 і I_0_1_1_2_1 позначають положення імітатора клапана подачі газу в відкритому та зачиненому стані відповідно. На початку роботи здійснюється перехід значення змінної Start в стан «1». Клапан буде знаходитися в зачиненому стані. Надалі відбувається формування сигналу керування на один з лічильників STU_1 або ж STU_2, які послідовно подають сигнали дозволу на управління ЛПД по одному з режимів швидкості від першого значення до значення, заданого змінною SET_01, яка в даному дослідженні дорівнює «1».

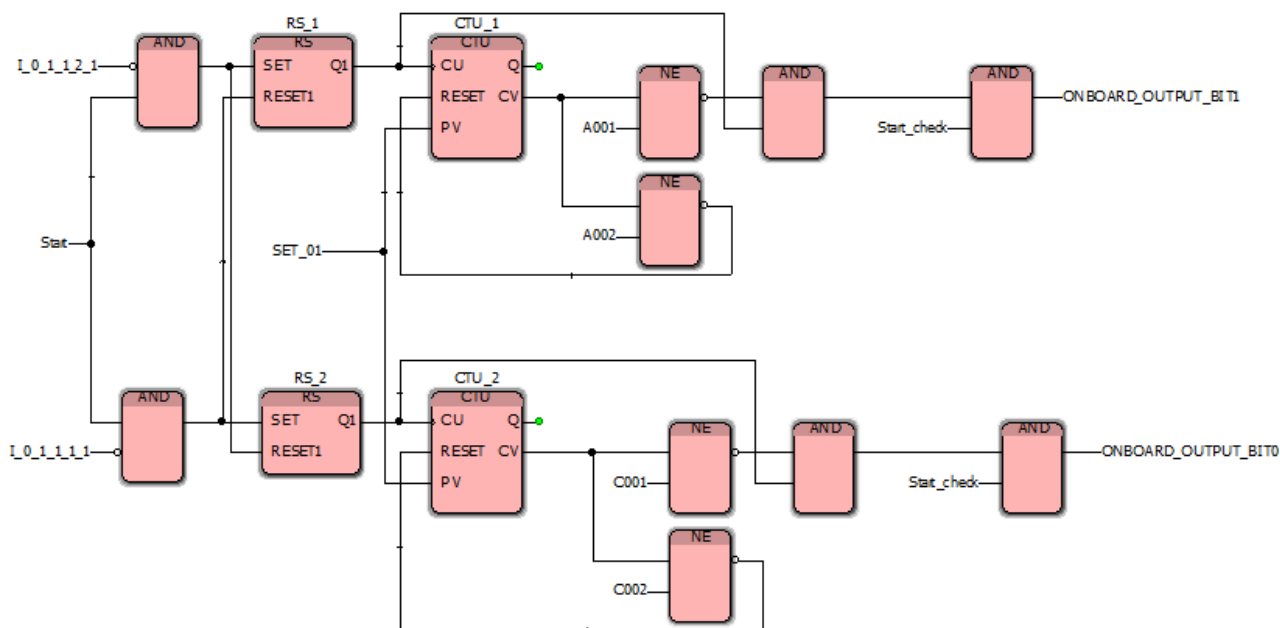


Рисунок 4.10 – Модернізований фрагмент схеми блоку Main

Результати експериментальних досліджень складальних стовпів збігаються з результатами Оженка Є. М. при дослідженні блока управління подачею палива з приводом зі складального стовпа п'єзоелектричних шайб [56] на базі виготовленої експериментальної установки, в якій використовувалися п'єзоелементи різних модифікацій. Тому, в цьому дослідженні вони не наводяться.

Нами було створено діючий макет на кафедрі технічної експлуатації флоту національного університету «Одеська морська академія», а саме: системи подачі газу Брауна в аварійний дизель-генератор PowerTech™ 4045 DFM70 на базі John Deere 4045d (рис. 4.10).

На рис. 4.11 зображено установку для отримання газу Брауна на основі електрогідролізера НУРО-3.0 [84].

На рис. 4.12 наведено загальну структурну схему діючого макету комп'ютерно-інтегрованої системи подачі газу від електрогідролізера в дизель-генератор, до складу якої входить блок живлення 12 В / 24 В, який під'єднаний до електролізера НУРО-3.0. Газ, який утворюється, надходить до впускного колектору дизель-генератору.



а)



б)

Рисунок 4.10 – Зовнішній вигляд установки



а)

б)

Рисунок 4.11 – Зовнішній вигляд установки для отримання газу Брауна

Для синхронізації роботи системи подачі палива встановлено датчик обертів на базі геркону, який розташований на колінчастому валі. Інформація з датчика надходить до системи, яку створено на базі контролеру. Керуючі

сигнали з контролера надходять через драйвер на лінійний п'єзоелектричний двигун LPM-5, конструкція макету якого зображено на рис. 4.13.

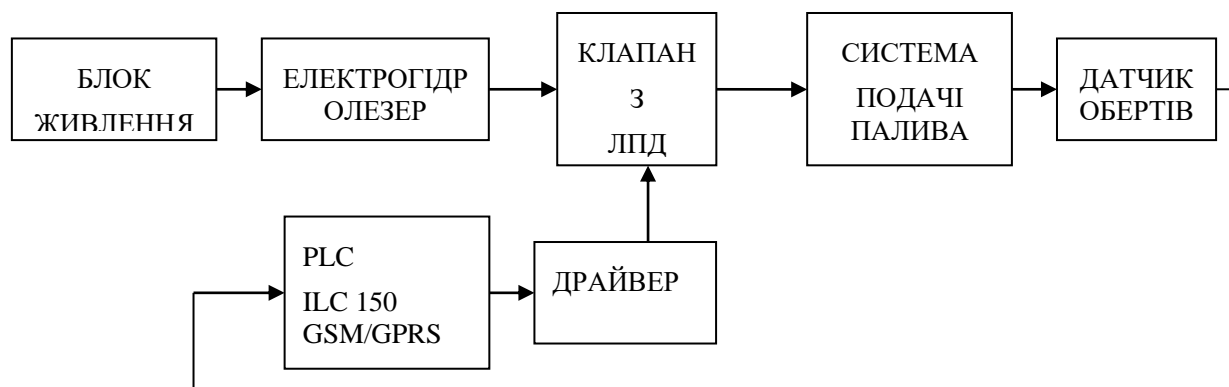


Рисунок 4.12 – Структурна схема комп'ютерно-інтегрованої системи подачі газу від електрогідролізера в дизель-генератор

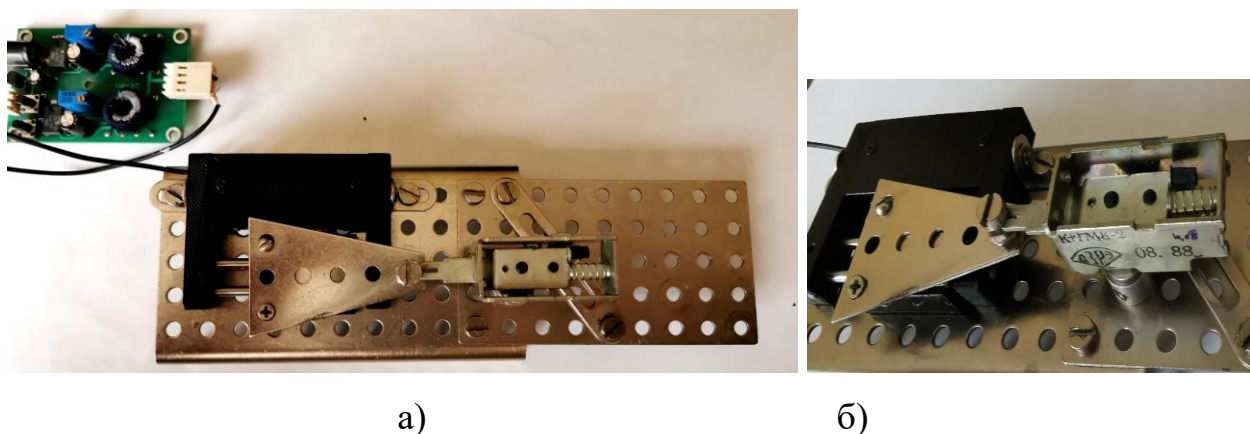


Рисунок 4.13 – Зовнішній вигляд макету дослідження роботи клапану подачі газу з ЛПД.

В якості датчика граничних положень було задіяно гальванічну пару контактів від реле. Однак для виміру швидкості можливо використання оптичного енкодера іС-RX3212 з роздільною здатністю 2.6 мкм для лінійного двигуна [86], структурну схему якого наведено на рис. 4.14.

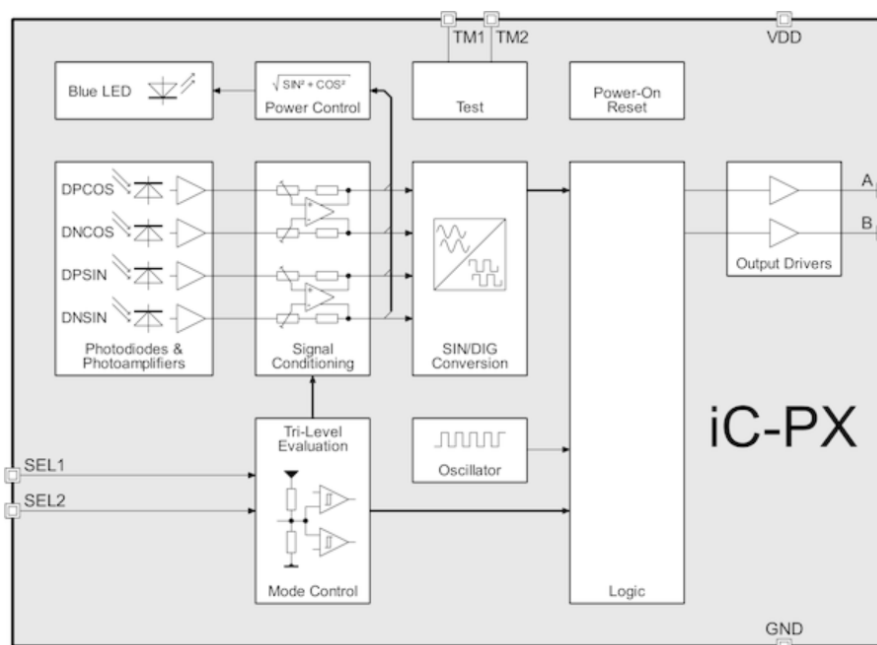


Рисунок 4.14 – Структурна схема енкодеру iC-PX3212

Для дослідження часу перемикання макету клапану з лінійним п'єзоелектричним двигуном було задіяно створену комп'ютерну систему на основі PLC ILC 150 GSM / GPRS (рис. 4.15, а) з додатковим клемним модулем Inline для датчика положення IB IL INC-IN-PAC-2861755 (рис. 4.15, б).



Рисунок 4.15 – Основні модулі, що використовуються в комп'ютерно-інтегрованій системі: а – ILC 151 GSM/GPRS контролер; б – клемний модуль Inline IB IL INC-IN-PAC-2861755

Контролер GSM/GPRS ILC 150 (рис. 4.15, а) є невеликим, масштабованим, модульним контролером з вбудованими портами для підключення мереж Ethernet, Interbus та інтегрований модем з чотирма діапазонами. Контролер може бути налаштований та запрограмований у ПК

Worx за допомогою Ethernet з'єднання на всіх п'яти мовах програмування відповідно до IEC 61131-3. Для доступу до контролера використовуються протоколи передачі даних TCP/IP та UDP/IP. Рівні вводу-виводу підключені до контролера через шину Interbus.

Клемний модуль Inline для датчика положення IB IL INC-IN-PAC-2861755 (рис. 4.15, б) має один вхід для інкрементного пристрою кодування з сигналом прямокутної форми (симетричним і асиметричним), 3 цифрових входи 24 В DC, 3-проводну схему підключення. До клеми можна підключати як симетричні датчики (RS-422), так і асиметричні датчики (5 В DC–24 В DC) з сигналами прямокутної форми. Можливо зчитування датчиків кута повороту або систем вимірювання довжини з імпульсом Z і без нього. Для підвищення безпеки експлуатації всі входи датчиків контролюються на наявність обриву проводу. У спеціальному режимі експлуатації клема підтримує датчики інкрементних значень з кодуванням відстані, за допомогою яких еталонне пересування скорочується до дуже маленьких відстаней. Крім того, вхід E3 можна використовувати в якості виходу з відкритим колектором.

Основні характеристики підсистеми вводу:

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

Характеристики підсистеми виводу:

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

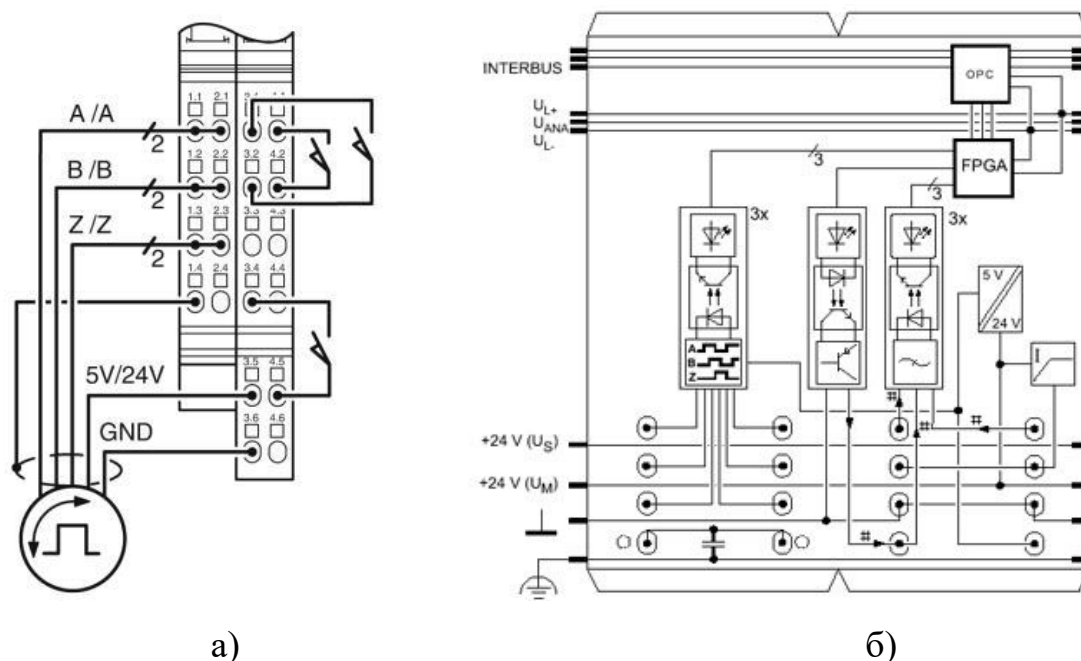


Рисунок 4.16 – Схема IB IL INC-IN-PAC-2861755: а – схема підключення; б – блок схема

Результати проведених експериментальних досліджень підтвердили отримані теоретичні положення, що були викладені у попередніх розділах.

Крім того, додатково можливе використання стенду TSL – TATU SmartLab, який отриманий в рамках проєкту TEMPUS 544010-TEMPUS-1-2013-1-DE-TEMPUS-JPHES TATU – "Trainings in Automation Technologies for Ukraine" (тренінги в області технологій автоматизації для України), до якого були залучені Донецький національний технічний університет, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Національний університет «Одеська морська академія», Одеський національний політехнічний університет і Харківський національний університет радіоелектроніки, а також п'ять західноєвропейських університетів: Hochschule Düsseldorf University of Applied Sciences; Carinthia University of Applied Sciences; Polytechnic University of Valencia; University of Antwerpen; University of Limerick [11].

TSL складається з трьох наборів апаратних модулів, кожен з яких розміщений в окремій валізі. Кожен модуль може бути використаний як

незалежно від інших, так і спільно з ними. Зовнішній вигляд модулів TSL показаний на рис. 4.17 [11].

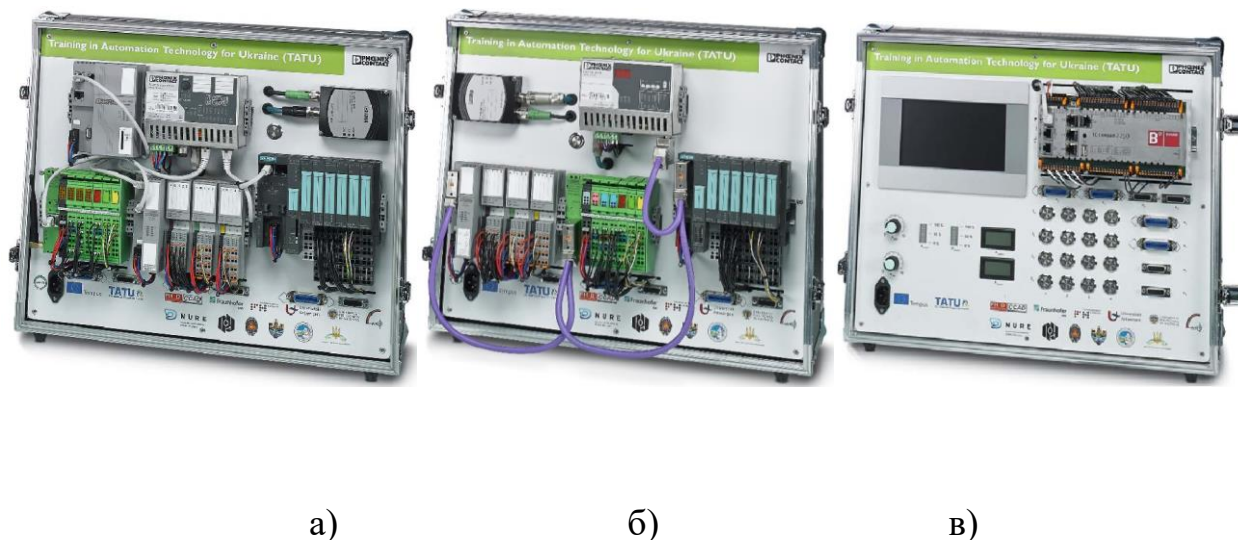


Рисунок 4.17 – Зовнішній вигляд модулів TSL: а) ПЛК та Profinet, б) Profibus, в) Process Simulation [11, 12, 56]

Взаємодія модулів та схема їх з'єднання кабелем показані на рис. 4.18 [11].

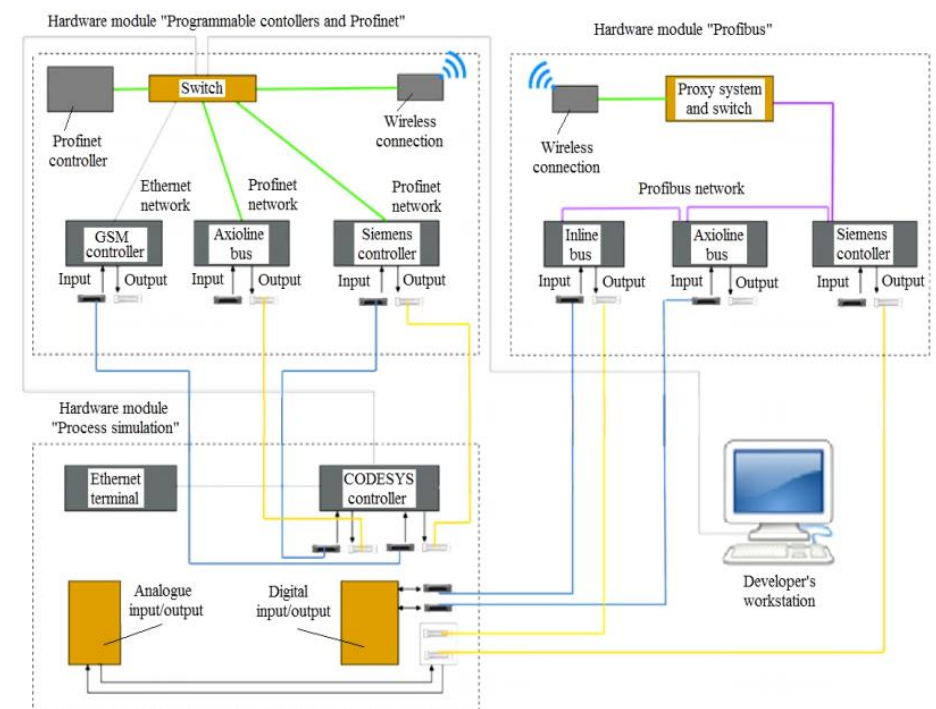


Рисунок 4.18 – Структура апаратних модулів TSL та їх підключення до комп'ютера [11, 12, 56]

В нашому випадку для застосування в системі управління подачею палива можливе використання першого модуля «Програмовані контролери та PROFINET» (рис. 4.17, *a*), до складу якого залучено два програмовані контролери: AXC 3050 та ILC 151 GSM/GPRS, пристрої вводу-виводу PROFINET від Phoenix Contact і Siemens, керований мережевий комутатор та бездротовий зв'язок. Вигляд основних модулів, а саме контролерів, показаний на рис. 4.19.

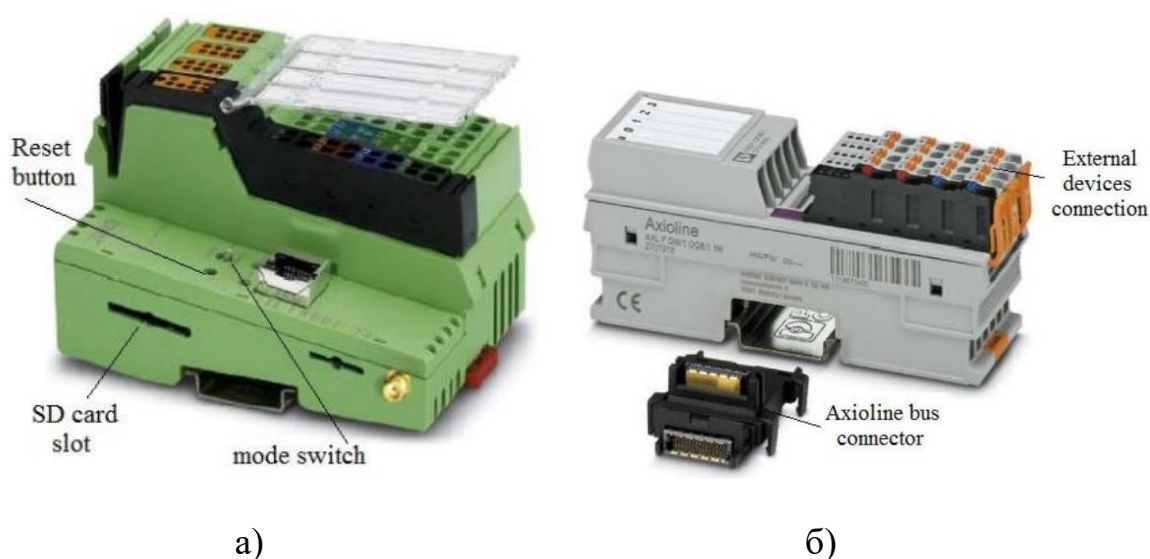


Рисунок 4.19 – Основні модулі, що використовуються в апаратному модулі «Програмовані контролери та PROFINET»:

а – ILC 151 GSM/GPRS контролер; б – AXL F DI8/1 DO8/1 1H [11, 12, 56]

Контролер ILC 151GSM/GPRS (рис. 4.19, *a*) – це невеликий, масштабований, модульний контролер, в який вбудовано порти для підключення мереж Ethernet, Interbus та інтегрований чотирьохдіапазонний модем. Контролер налаштовується та програмується за допомогою PC Work за допомогою COM або Ethernet з'єднання на всіх п'яти мовах програмування відповідно до IEC 61131-3. Доступ до контролера відбувається за допомогою протоколів передачі даних TCP/IP та UDP/IP. Рівні вводу-виводу підключені до контролера через шину Interbus. На шину Interbus контролеру GSM/GPRS ILC 151 підключено лише один модуль з двома аналоговим виходами. Але для

розширення можливостей контролера можливе використання додаткових апаратних модулів, які встановлюються додатково на шину Interbus.

Модуль AXL F DI8/1 DO8/1 1H (рис. 4.19, б) для роботи як частина станції Axioline F і використовується для цифрового вводу та виводу, має 8 входів (24 В постійного струму) та 8 виходів (24 В постійного струму), максимальний струм 500 мА, побудований по технології одножильного зв'язку. Входи оснащено часовими фільтрами, які підвищують захист від шуму. Час оновлення інформації на входах модуля становить 100 мс. Для наявної діагностики модуль оснащений індикаторами стану.

Основні характеристики підсистеми вводу:

- 8 вхідних сигналів;
- живлення 24 В, 2,4 мА постійного струму;
- датчики підключаються з використанням одножильних технологій;
- часові фільтри можуть бути налаштовані на три можливі додаткові значення: менше 100 мс, 1000 мс і 3000 мс;
- максимальна частота сигналів, які надходять на входи, становить 5 кГц.

Характеристики підсистеми виводу:

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

Завдяки таким властивостям апаратний модуль «Програмовані контролери та PROFINET» дозволяє вирішувати широкі кола завдань: як для базового програмування контролерів в PC Worx з передачею даних, так і при розробленні на основі технології Ethernet та технології бездротовою передачі даних. Крім того, ці програмовані контролери можуть використовувати протоколи передачі даних TCP/IP або Modbus TCP.

Слід зазначити, що переваги розроблених п'єзоперетворювачів впливають з його конструктивних рішень:

- відсутність мідних обмоток і простота технології виготовлення;

- високі пусковий момент і питома потужність;
- великий ККД (до 54%);
- у випадку короткого замикання на механічній стороні здійснюється останов, відсутній температурний перегрів, а при усуненні його, переходить до робочого стану, тому не потребує муфти;
- не потребує редуктора для зміни швидкості.

Чутливість ступеня навантаження двигуна забезпечується одночасним протіканням прямого і зворотного п'єзоефектів.

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

- відсутність гідравлічних рідин і насосів, компресорів, які забезпечують їх роботу;
- гарантовано забезпечують безпеку судноплавства.

Аналіз зазначених вище переваги, дозволяє стверджувати, що поставлена в роботі мета досягнута.

Висновки до розділу 4

1. Виготовлений макет експериментальної установки для дослідження роботи клапану подачі газу з п'єзоелектричним перетворювачем на основі ЛПД. Проведені експериментальні дослідження підтвердили отримані теоретичні положення.

2. Наведено розроблені і запатентовані конструкції компонентів комп'ютерно-інтегрованої системи подачі газу в судновий дизель-генератор на базі п'єзоелектричних перетворювачів: складальних стовпів та реверсивних обертальних та лінійних п'єзодвигунів, які довели можливість їх застосування для отримання гарантованого переміщення клапану подачі газу при необхідному зусиллі і часі перехідного процесу.

3. Удосконалено класифікаційну схему паливних систем високого тиску за рахунок включення системи подачі газу.

4. Проведено порівняння розроблених клапанів з відомими, яке показало перевагу і перспективність використання запропонованих рішень. Це дозволяє стверджувати, що поставлена в роботі мета досягнута.

Основні результати розділу 4 опубліковані в [43, 44, 50, 47, 49, 39, 40, 29, 48, 54, 55] або Додатку 9 [2-6, 8, 9, 11, 15, 16].

ВИСНОВКИ

В дисертації на основі виконаних автором досліджень вирішено важливу науково-технічну задачу – підвищення роботоздатності комп'ютерно-інтегрованої системи подачі газу в судновий дизель-генератор, який обладнаний клапанами подачі газу з електромагнітним соленоїдом, шляхом застосування п'єзоелектричних перетворювачів.

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 подчі 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 проектувати 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.

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 серії 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.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Автоцентр, Как работает газовый дизель
<https://www.autocentre.ua/opyt/poleznye-sovety/kak-rabotaet-gazodizel-288018.html/>.
2. Антонов А. В. Системный анализ: учебник для вузов / А. В. Антонов. – М.: Высшая школа, 2004. – 454 с.
3. Балковська Ю. Ю. Методи лінеарізації амплітудно-частотних характеристик пьезоелектричних перетворювачів механічних величин: Автореф. Дис. ...канд. Техн. наук: 05.13.05 / ОНПУ. – Одеса, 2003. – 19 с.
4. Бусленко Н. П. Лекции по теории сложных систем / Н. П. Бусленко, В. В. Калашников, Н. Н. Коваленко. – М.: Сов. радио, 1973. – 440 с.
5. Базіло К. В. П'єзоелектричні перетворювачі для роботехніки / К. В. Базіло, Ж. В. Сотула, В. В. Туз // Вісник Хмельницького національного університету, Хмельницький. – 2015. – № 1. – С. 190–192.
6. Бережний К.Ю. Моделі та засоби побудови комп'ютерної системи визначення реологічних характеристик суднових технічних рідин. Дис. ... канд. техн. наук: 05.13.05. – Миколаїв, 2018. – 176 с.
7. Бондаренко А. В. Підвищення ефективності горіння вуглеводневих газів у парогенеруючих установках за рахунок зміни відношення паливо / повітря: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.14 / ОНПУ. – Одеса: 2014. – 21 с.
8. Бобцов А. А., Бойков В. И., Быстров С. В., Григорьев В. В. Исполнительные устройства и системы для микроперемещений. – СПб ГУ ИТМО, 2011. – 131 с. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://books.ifmo.ru/file/pdf/822.pdf> (Дата звернення 25.07.2019).
9. Вишнеvский В. С., През А. А. К вопросу о природе шумов пьезоэлектрического двигателя. В кн.: Надежность микроэлектронных схем и элементов. – Киев: Наукова думка, 1978, с. 179–182.
10. Голіков В. А. Методологія наукових досліджень / В. А. Голіков,

М. А. Козьмініх, О. А. Онищенко. – Одеса: ОНМА, 2014. – 160 с.

11. Gorb S. I., Nikolskyi V. V., Shapo V. F., Khniunin S. H. Programming controllers in the integrated development environment: training manual. Practice. – Odessa: National University "Odessa Maritime Academy", 2017. – 164 p.

12. Горб С. И. Техническое обеспечение подготовки судовых инженеров по системам автоматизации с программируемыми контроллерами / С. И. Горб, В. В. Никольский, С. Г. Хнюнин, В. Ф. Шапо // Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сб. – 2016. – Вып. 22. Одесса: НУ "ОМА". – С. 39–46.

13. Давлеталиев Д. А. Исследование пьезодвигателей и разработка устройств адаптивного управления на их основе: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.05 / ЛПИ. – Л.: 1985. – 217 с.

14. Джагулов Р. Г. Пьезоэлектрические элементы в приборостроении и автоматике / Р. Г. Джагулов, А. А. Ерофеев. – Л.: Машиностроение, 1986. – 256 с.

15. Джагулов Р. Г., Ерофеев А. А. Пьезоэлектронные устройства вычислительной техники, систем контроля и управления: Справочник / – Спб.: Политехника, 1994. – 608 с.

16. Джагулов Р. Г. Измерительные преобразователи / Р. Г. Джагулов, Е. Б. Плавинский, В. В. Никольский, А. М. Веретенник. – Одесса: Астропринт, 2002. – 216 с.

17. Ерофеев А. А. Пьезоэлектронные устройства автоматики. – Л.: Машиностроение, 1982. – 212 с.

18. Ерофеев А. А. Динамические свойства пьезоэлектрических трансформаторов и систем на их основе. – Автоматика и телемеханика, №2, 1979. – С. 163-172.

19. Ерофеев А. А., Мижжиддорж Н. Многомерное управление в пьезополупроводниковых преобразователях напряжения. – Ученые записки МГУ, №2(60), 1977, С. 87–107.

20. Инструкция по применению микроактуаторов МПМА.

[Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.elpapiezo.ru/Primenenie_MPMA.pdf (25.07.2019).

21. Катц Г. В. Магнитные и диэлектрические приборы. – М.: Энергия, 1965. – 416 с.

22. Климов В.В., Дидковская О.С., Савенкова Г.Е. и др. Разработка и исследование новых пьезокерамических материалов. – В кн.: Титанат бария. – М.: Наука, 1973, – С. 209–214.

23. Кринецкий, И. И. Основы научных исследований. Учебное пособие / И. И. Кринецкий. – Киев-Одесса: ВШ, 1981. – 287 с.

24. Коваленко В. А. Пьезоэлектрический двигатель вращения – как элемент автоматических систем. Автореферат дис. ... канд. техн. наук: 05.13.05. – Москва, 1998. – 15 с. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://tekhnosfera.com/piezoelektricheskiy-dvigatel-vrascheniya-kak-element-avtomaticheskikh-sistem#ixzz5хаYR0hEB> / (Дата звернення 01.08.2018).

25. Кулиев Ю.Н ., Усов А. А., Шермергор Т.Д. К теории связанных колебаний толстых пьезокерамических пластин. – В кн.: Физика микроэлектронных приборов. М.: МИЭТ, 1981. – С. 20-40.

26. Лавриненко В. В. Теория фрикционного контакта пьезоэлектрического двигателя // Диэлектрики и полупроводники: науч.-техн. сб. – Киев: КПИ, 1985. – Вып. 28. – С.26-33.

27. Лавриненко В. В., Коваль В. С., Петренко С. Ф., Лукін В. В., Франченко Р. В. Патент на винахід № 76759 України, МПК(2006) H02N 2/00 Пьезоэлектричний двигун. – № 20040110441; Заявл. 18.12.2003; Опубл. 15.09.2006, Бюл. № 9.

28. Лавриненко В. В. Пьезоэлектрические двигатели / В. В. Лавриненко, И. А. Карташев, В. С. Вишнеvский. – М.: Энергия, 1980. – 112 с.

29. 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.

30. Малов В. В. Пьезорезонансные датчики. – М.: Энергия 1978. – 248 с.

31. Марченко А. П., Мешков Д. В., Рыкова И. В. Тенденции развития форсунок аккумуляторных топливных систем типа Common Rail // Двигатели внутреннего сгорания. – 2005. – № 1. – С. 68–74. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://web.kpi.kharkov.ua/dvs/wp-content/uploads/sites/127/2014/02/2005_1-.pdf/ (Дата звернення 01.08.2018).

32. Моряк. Двухтопливные двигатели (DF) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://seaspirit.ru/sudomexaniki/shipengine/dvuxtoplivnyye-dvigateli-dual-fuel.html/> (Дата звернення 01.08.2018).

33. Мусяненко М. П. Полиморфные пьезокерамические преобразователи давления с пространственной электромеханической отрицательной обратной связью: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.05. – Одесса, 2001. – 172 с.

34. Мусяненко М. П. Теоретические основы, методы и средства структурно-энергосилового преобразования на основе полиэлектродных пьезокерамических элементов для систем управления: диссертация д-ра техн. наук: 05.13.05. – Одесса, 2006. – 495 с.

35. Мэзон У. Физическая акустика. – М.: Мир, 1966. – Т. 1, Ч. А. – 592 с.

36. Мэзон У. Пьезоэлектрические кристаллы и их применение в ультразвуке. / Пер. с англ. под ред. А. В. Шубникова и С. Н. Ржевского. – М.: ИЛ., 1952. – 448 с.

37. Никольский А. А. Точные двухканальные следящие электроприводы с пьезокомпенсаторами. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 160 с.

38. Никольский А. А. Двухканальные электроприводы с пьезокомпенсаторами. Автореферат дис. ... докт. техн. наук: 05.09.03. – Москва, 1991. – 40 с. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://tekhnosfera.com/dvuhkanalnye-elektroprivody-s-piezokompensatorami#ixzz5xaWLzFgE> / (Дата звернення 01.08.2018).

39. Нікольський В. В., Оженко Є. М., Лисенко В. Є.,

Никольський М. В. Патент на корисну модель, МПК (2013.01) В63В 17/00 Судновий дизель з пьезогенератором. – № 78425; Опубл. 25.03.2013, Бюл. № 6.

40. Никольский В. В., Оженко Е. М., Лысенко В. Е., Никольский М. В. Оценка возможности применения пьезогенератора в составе судового дизеля // Судовые энергетические установки: научн.-техн. сб. – 2013. № 30. – Одесса: ОНМА. – С. 92–97.

41. 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.

42. Нікольський В. В., Лисенко В. Є., Нікольський М. В. Використання п'єзоприводу для клапана подачі газу двохпаливного двигуна внутрішнього згоряння // Автоматизация судовых технических средств: научн.-техн. сб. – 2017. – Вып. 23. Одесса: НУ "ОМА". – С. 65 – 69.

43. 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.

44. Нікольський В. В., Лисенко В. Є., Нікольський М. В. Патент на корисну модель, Клапан подачі газу з п'єзоприводом. – № 124102; Заява U201708811, від 04.09.2017. Опубл. 26.03.2018, Бюл. № 6.

45. Никольский В. В. Основы створення пристроїв п'єзоактивної механіки для систем керування двигунами внутрішнього згоряння: Дис. ... док.. техн. наук: 05.13.05. – Одесса, 2005. – 230 с.

46. Нікольський В. В., Бережний К. Ю., Модель вимірювального зонду комп'ютерної системи визначення реологічних характеристик судових технічних рідин // Вісник Черкаського державного технологічного університету – Серія: технічні науки – Черкаси, Видавець ФОП Гордієнко Є. І., 2018. – №3. – С. 56–66.

47. 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.

48. Nikolskyi V. Fuzzy logic positioning system of ship's diesel generators actuating mechanisms // Vitalii Nikolskyi, Yevgen Ozhenko, Kyriilo Berezhnyi, Viktor Lisenko // Інформаційні технології та компютерне моделювання; матеріали статей Міжнародної науково-практичної конференції, м. Івано-Франківськ, 14–18 травня 2018 року. – Івано-Франківськ: 2018 – С. 211 – 215.

49. 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.

50. 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.

51. Нікольський В. В., Нікольський М. В., Лисенко В. Є. Моделювання п'єзоелектричного приводу клапану подачі газу суднового дизеля в Сімінтек // Інформаційні технології та компютерне моделювання; матеріали статей Міжнародної науково-практичної конференції, м. Івано-Франківськ, 20–25 травня 2019 року. – Івано-Франківськ: 2019 – С. 225–228.

52. 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.

53. Никольский В. В., Никольский М. В., Лысенко В. Е. Модель пьезоэлектрического преобразователя клапана подачи газа в судовой дизель-генератор // Вісник Черкаського державного технологічного університету:

технічні науки. – Черкаси: ЧДТУ, 2019. – №3. – С. 25–30.

54. 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.

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

56. Оженко Є. М. Моделі, методи та засоби покращення системи подачі палива суднового дизеля на базі п'єзоелектричних перетворювачів. Дис. ... канд. техн. наук: 05.13.05. – Миколаїв, 2018. – 166 с.

57. Растрин А. А. Системы экстремального управления. – М.: Наук, 1974. – 630 с.

58. Рубашкин И. Б. Адаптивные системы взаимосвязанного управления электроприводами. – М.: Энергия, 1975. – 160 с.

59. Петренко С. Ф. Пьезоэлектрический двигатель в приборостроении. – К.: «Корнійчук», 2002. – 96 с.

60. Петренко С. Ф., Омелян А. В., Антонюк В. С., Новаковський О. Г. Система керування п'єзоелектричним двигуном / Вісник НТУУ «КПІ». Серія Приладобудування. – Київ, 2018. – Вип. 55(1) – С. 5–8.

61. Плужников В. М., Семенов В. С. Пьезокерамические твердые схемы. – М.: Энергия, 1971. – 168 с.

62. Презентация. Технология SimInTech — моделирование, разработка и создание САУ [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://simintech.ru/?page_id=2443/ (Дата звернення 01.08.2018).

63. Service Training. Пособие по программе самообразования 352. Насос-форсунка с пьезоэлектрическим клапаном. Конструкция и принцип действия [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.autodela.ru/assets/files/books/VW/352_Siemens_VDO_Automotive.pdf/ (Дата звернення 25.04.2019).

64. Свешников В. К. Инновационная гидравлика [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://mirprom.ru/public/innovacionnaya-gidravlika.html/> (Дата звернення 1.04.2015).

65. Справочная система SimInTech. ГПС – Механический элемент поступательного движения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <file:///C:/SimInTech64/webhelp/index.html?contextId=id4293>.

66. Тихонов А. А. Проектирование систем управления старт-стопным приводом. – Известия ВУЗов. Сер.: Приборостроение, т.24, №4, 1981, С. 26–29.

67. Тихонов А. О. Улучшение динамических характеристик мехатронных модулей с пьезоэлектрическими двигателями ударного типа на основе адаптивных методов управления. Автореферат дис. ... канд. техн. наук: 05.02.05. – Москва, 2004. – 18 с. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://tekhnosfera.com/uluchshenie-dinamicheskikh-harakteristik-mehatronnyh-moduley-s-piezoelektricheskimi-dvigatelyami-udarnogo-tipa-na-osnove-a#ixzz5xaZZdVvA> / (Дата звернення 01.08.2018).

68. Устюжанина Е. В. Научная школа как структурная единица научной деятельности / Е. В. Устюжанина, С. Г. Евсюков, А. Г. Петров и др. – М.: ЦЭМИ РАН, 2011. – 73 с.

69. Хавин В. Л., Лавриненко И. С. Моделирование пьезоэлектрического привода для компенсации погрешностей прецизионной механической обработки биополимеров / Високі технології в машинобудуванні. – Харьков, 2013. вип. 1 (23). – С. 220–224.

70. Шарапов В. М., Мусиенко М. П. и др. Пьезоэлектрические преобразователи с пьезоэлементом в цепи обратной связи усилителя напряжения // Вісник Черкаського державного технологічного університету. – 2004. – №2. – С. 132–136.

71. Шарапов В. М. Пьезокерамические преобразователи с дополнительным каналом обратной связи / В. М. Шарапов, М. П. Мусиенко и др. // Вісник Черкаського державного технологічного університету. – 2004. – №3. – С. 101–107.

72. Шарапов В. М. Пьезоэлектрические преобразователи с комбинированной обратной связью / В. М. Шарапов, М. П. Мусиенко, А. В. Бублей // Вісник Черкаського державного технологічного університету. – 2005. – №4. – С. 131–136.

73. Шарапов В. М. Пьезоэлектрические датчики: монография / В. М. Шарапов, М. П. Мусиенко, Е. В. Шарапова // Под ред. В.М.Шарапова. – Москва: Техносфера, 2006. – 632 с.

74. Щербин А. М. Исполнительные элементы прецизионных пьезоэлектрических приводов с увеличенным диапазоном перемещения: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.13.05 / МГТУ им. Н. Э. Баумана. – Москва, 1997. – 19 с.

75. ЭЛПА: Сегнетомягкие пьезоэлектрические материалы [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.elpiezo.ru/Datasheets/SOFT.pdf> (Дата звернення 25.07.2019).

76. APC: Physical and Piezoelectric Properties of APC Materials [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.americanpiezo.com/images/APC_materials_properties-compressed.pdf / (Дата звернення 25.07.2019).

77. Beater, P., Pneumatic Drives, System Design, Modelling and Control, SpringerVerlag Berlin Heidelberg 2007, ISBN: 978–3–540–69470–0.

78. Bibus Solenoid valves 850 series. Matrix Technical Information. Available: <https://www.bibus.uk/products-solutions/pneumatics/valves/high-speed-valves/matrix-series-850>. Cited 11.10.2019.

79. Direct Acting and Two-stage Directional Seat Valves (Cartridge Design). Bucher Hydraulics Series WS22GD/OD, 2/2 Cartridge Seat Valve, Size 5. Available: <https://www.bucherhydraulics.com/docs/index.aspx?id=47659&domid=1017&sp=E&m1=30969&m2=44712&m3=30973&m4=46915&m5=47077&m6=47635&m7=47659>. Cited 23.9.2019.

80. Cheung, N. C. et al. Modelling a Linear and Limited Travel Solenoid.

University of New South Wales, Australia. Published in: Industrial Electronics, Control, and Instrumentation, 1993. ISBN: 0-7803-0891-3. Pp. 1567-1572, vol. 3.

81. G. Karim and H. Li, Knock in Gas Fueled S.I. Engines. Mechanical and Manufacturing Engineering, University of Calgary, Calgary, Canada T2N 1N4.

82. Haraldson, L., general manager, alternative NOx solutions, LNG as a fuel for environmentally friendly shipping, retrofit perspective, 33rd motorship propulsion & emissions conference, Copenhagen, 11-12 May 2011, Wärtsilä Corporation. Available:

<http://www.wartsila.com/file/Wartsila/1278519213998a1267106724867Wartsila-SP-ppt-2011-LNGretrofit.pdf>. Cited 16.12.2013.

83. Heywood, J., Internal Combustion Engine Fundamentals, 1988, ISBN: 0-07028637-X.

84. Hydro-oxygen systems (HHO systems) for the fuel economy [Internet]. Available from: <http://hydroxypower.com/?cat=3>.

85. IHA-2570, Digital hydraulics, course material, 2007. [Internet]. Available from: <https://docplayer.fi/11175920-Iha-2570-digitaalihydrauliikka-syksy-2007-matti-linjama-tut-iha-kurssin-jarjestelyt.html>

86. iC-PX Series Reflective Opto Encoders [Internet]. Available from: <https://www.ichaus.de/iC-PX%20Series>.

87. Matti Linjama, Arto Laamanen, Matti Vilenius IS IT TIME FOR DIGITAL HYDRAULICS? / The Eighth Scandinavian International Conference on Fluid Power, SICFP'03, May 7-9, 2003, Tampere, Finland [Internet]. Available from: <https://pdfs.semanticscholar.org/db83/cd7a4a3b07b6138f22d069dc38eb896bccdd.pdf>

88. JUSSI PEURALA Model-based design, modelling and simulation of digital hydraulic GAS admission valve / Master of Science Thesis, 132 pages, 12 Appendix pages May 2014, [Internet]. Available from: <https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/123456789/22251/peurala.pdf?sequence=3&isAllowed=y> Cited 04.01.2020.

89. LCS010 SERIES LINEAR MOTORS [Internet]. Available from: <https://www.dtimotors.com/product/lcs010-series/>

90. LCS004 SERIES LINEAR MOTORS [Internet]. Available from: <https://www.dtimotors.com/product/lcs004-series/>
91. RBS SERIES HOLLOW SHAFT [Internet]. Available from: <https://www.dtimotors.com/product/rbs-hollow-shaft/>
92. Robert Pettersson / Safety analysis on digital hydraulics [Internet]. Available from: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1242074/FULLTEXT01.pdf>
93. William M. Warner, Brian Joseph Vivio, Brian Joseph Bachand Multi-point fuel injection module. Patent Application Publication US 20030070658A1. [Internet]. Available from: <https://patentimages.storage.googleapis.com/a7/52/c7/ef595e45e6b2b5/US20030070658A1.pdf>
94. Oulun yliopisto, Konetekniikan osasto, Polttomoottoritekniikka I, Internal Combustion Engines I, Mauri Haataja, 2010.
95. PI Piezoelectric Ceramic Products: fundamentals, characteristics and applications [Internet]. Available from: https://static.physikinstrumente.com/fileadmin/user_upload/pi_ceramic/files/catalog_CAT/PI_CAT125E_R3_Piezoelectric_Ceramic_Products.pdf / (Дата звернення 25.07.2019).
96. Piezoelectric Ceramics, Piezo Actuators, Piezo Motors, PZT Ceramics, Piezo Assemblies, Piezo Transducer [Internet]. Available from: www.piceramic.de.
97. Single injector, single point fuel injection system. United States Patent 4257376.
98. SOGAV 250. Solenoid Operated Gas Admission Valve. Product Specification. Available: <http://www.woodward.com/EngineAdmissionValves.aspx>. Cited 12.06.2017.
99. SOGAV 43/105. Solenoid Operated Gas Admission Valve. Product Specification. Available: <http://www.woodward.com/EngineAdmissionValves.aspx>. Cited 17.06.2017.
100. Sparkler PezoCeramics: Piezoelectric properties [Електронний

ресурс]. – Режим доступа: www.sparklceramics.com/piezoelectricproperties.html
(Дата звернення 25.07.2019).

101. Tajima, H. and Tsuru, D. 2013. Reduction of Methane Slip from Gas Engines by O₂ Concentration Control using Gas Permeation Membrane. SAE Technical Paper 2013–01–2618.

102. Wartsila Service Letters #444 SL87–223/UM MC/MCE Engines. Super–VIT Fuel Pumps: Adjustment & Maintenance: <http://marengine.com/ufiles/SL87–223.pdf>. 12.06.2017.

103. Z. Qiang et al, 2013, Experiment Study of the Single Point And Multi–Point Natural Gas Electronic Injection Systems, Applied Mechanics and Materials Vols. 313–314 (2013), pp. 479–483.

ДОДАТОК А

Акти про впровадження результатів дисертаційного дослідження

ЗАТВЕРДЖУЮ

Перший проректор
Національного університету
«Одеська морська академія»

д.ю.н., професор  О.М. Шемякін

« 12 » _____ 12 _____ 2019 р.

А К Т

про використання результатів дисертаційної роботи
Лисенко Віктора Євгеновича на тему
"Комп'ютерно–інтегрована система подачі газу в судновий дизель–генератор за
допомогою п'єзоперетворювачів "
в навчальному процесі університету

Ми, що нижче підписались, начальник навчального відділу університету Пархоменко М.М. та завідувач кафедри технічної експлуатації флоту д.т.н., професор Голіков В.А. склали цей акт у тому, що результати дисертаційної роботи Лисенко В.Є. впровадженні у навчальному процесі кафедри технічної експлуатації флоту при дипломному проектуванні курсантів магістрів судномеханічного факультету: Платонов А.В. «Дослідження процесів в системі подачі палива судового дизельгенератора»; Покуса Г.М. «Підвищення надійності роботи системи подачі газу двопаливних судових дизель-генераторів».

Начальник навчального відділу
Національного університету
«Одеська морська академія»


М.М. Пархоменко

Завідувач кафедри
технічної експлуатації флоту,
д.т.н., професор


В.А. Голіков

ЗАТВЕРДЖУЮ

Перший проректор
Національного університету
«Одеська морська академія»

д.ю.н., професор  О.М. Шемякін

« 12 » 12 2019 р.

А К Т

про використання результатів дисертаційної роботи
Лисенко Віктора Євгеновича на тему
"Комп'ютерно-інтегрована система подачі газу в судновий дизель-генератор за
допомогою п'єзоперетворювачів "
в навчальному процесі університету

Ми, що нижче підписались, начальник навчального відділу університету Пархоменко М.М. та завідувач кафедри автоматизації дизельних та газотурбінних установок к.т.н., доцент Оженко Є.М. склали цей акт у тому, що результати дисертаційної роботи Лисенко В.Є. впровадженні у навчальному процесі кафедри автоматизації дизельних та газотурбінних установок в курсі лекційних занять по дисципліні «Автоматизація технологічних процесів і виробництв» (4-й курс факультету автоматики).

Начальник навчального відділу
Національного університету
«Одеська морська академія»



М.М. Пархоменко

Завідувач кафедри
автоматизації дизельних та
газотурбінних установок,
к.т.н., доцент



Є.М. Оженко

ЗАТВЕРДЖУЮ



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

В.М. Захарченко

« 23 »

12

2019 р.

А К Т

про використанні результатів дисертаційної роботи
 Лисенко Віктора Євгеновича на тему
 "Комп'ютерно-інтегрована система подачі газу в судновий дизель-генератор за
 допомогою п'єзоперетворювачів"
 в наукових дослідженнях, які виконуються в університеті

Ми, що нижче підписались, начальник науково-дослідної частини університету Савчук В.Д., науковий керівник професор, д.т.н. Нікольський В.В. склали цей акт у тому, що результати дисертаційної роботи Лисенко В.Є. ввійшли в звіт по науково-дослідній роботі «П'єзоелектричний привід впускного клапана двохпаливного ДВЗ» НУ «ОМА», Одеса – 2017 р. (№ ДР 0117U002744, науковий керівник д.т.н., професор Нікольський В.В., відповідальний виконавець Лисенко В.Є.).

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

В.Д. Савчук

Науковий керівник
 професор кафедри
 технічної експлуатації флоту,
 д.т.н., професор

В.В. Нікольський

ДОДАТОК Б
Патенти на корисні моделі



УКРАЇНА



ПАТЕНТ

НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

№ 133724

КЛАПАН ПОДАЧІ ГАЗУ ЗІ СКЛАДАЛЬНИМ СТОВПОМ
П'ЄЗОЕЛЕМЕНТІВ

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

Зареєстровано в Державному реєстрі патентів України на корисні моделі **25.04.2019.**

Заступник Міністра економічного розвитку і торгівлі України

Ю.П. Бровченко



ДОДАТОК В

Physical and Piezoelectric Properties of APC Materials



Physical and Piezoelectric Properties of APC Materials

APC Material:	840	841	850	854	855	860	880
Navy Equivalent	Navy I	Hybrid	Navy II	Navy V	Navy VI	Porous	Navy III
Relative Dielectric Constant							
K^T	1275	1375	1900	2750	3300	1200	1050
Dielectric Dissipation Factor (Dielectric Loss(%))*							
$\tan \delta$	0.60	0.40	≤ 2.00	≤ 2.00	≤ 2.50	≤ 2.00	0.40
Curie Point (°C)**							
T_c	325	320	360	250	200	360	310
Electromechanical Coupling Factor							
k_p	0.59	0.60	0.63	0.66	0.68	0.50	0.50
k_{33}	0.72	0.68	0.72	0.68	0.76	0.45	0.62
k_{31}	0.35	0.33	0.36	-	0.40	-	0.30
k_{15}	0.70	0.67	0.68	-	0.66	-	0.55
d_{33}	290	300	400	600	630	380	215
$-d_{31}$	125	109	175	260	276	-	95
d_{15}	480	450	590	625	720	-	330
Piezoelectric Voltage Constant (10^{-3} Vm/N or 10^{-3} m²/C)							
g_{33}	26.5	25.5	24.8	25.5	21.0	38.0	25.0
$-g_{31}$	11.0	10.5	12.4	-	9.0	-	10.0
g_{15}	38.0	35.0	36.0	-	27.0	-	28.0
Young's Modulus (10^{10} N/m²)							
Y_{11}^E	8.0	7.6	6.3	6.0	5.9	-	9.0
Y_{33}^E	6.8	6.3	5.4	5.2	5.1	-	7.2
Frequency Constants (Hz*m or m/s)							
N_L (longitudinal)	1524	1700	1500	-	1390	-	1725
N_T (thickness)	2005	2005	2040	2000	2079	1390	2110
N_p (planar)	2130	2055	1980	1972	1920	1900	2120
Density (g/cm³)							
ρ	7.6	7.6	7.6	7.6	7.6	6.6	7.6
Mechanical Quality Factor							
Q_m	500	1400	80	70	65	50	1000
Acoustic Impedance (Mrayl)							
Z_a	-	-	31.5	-	-	16.5	-

The values listed above pertain to test specimens. They are for reference purposes only and cannot be applied unconditionally to other shapes and dimensions. In practice, piezoelectric materials show varying values depending on their thickness, actual shape, surface finish, shaping processes and post-processing.

Note: measurements made 24 hours after polarization.
Maximum voltage: 5-7 VAC/mil for 850, 851, 855, Type VI VDC ~2X.
9-11 VAC/mil for 840, 841, 842, 844, 880, 881 VDC ~2X.

*At 1 kHz, low field.

**Maximum operating temperature = Curie point/2.

Standard Tolerances
(Tighter tolerances available on request)

- Capacitance: $\pm 20\%$

- d_{33} Value: $\pm 20\%$

- Frequency: $\pm 5\%$ (to $\pm 0.5\%$ on request)

Updated: Jan. 2019

Rev. 4

ДОДАТОК Г

Material Data PI Ceramic GmbH

Material Data

SPECIFIC PARAMETERS OF THE STANDARD MATERIALS

			Soft PZT materials			
		Unit	PIC151	PIC255/ PIC252 ¹⁾	PIC155	PIC153
Physical and dielectric properties						
Density	ρ	g/cm ³	7.80	7.80	7.80	7.60
Curie temperature	T_c	°C	250	350	345	185
Relative permittivity	in the polarization direction	ϵ_a^*/ϵ_s	2400	1750	1450	4200
	⊥ to polarity	ϵ_n^*/ϵ_s	1980	1650	1400	
Dielectric loss factor	$\tan \delta$	10 ⁻³	20	20	20	30
Electromechanical properties						
Coupling factor	k_s		0.62	0.62	0.62	0.62
	k_t		0.53	0.47	0.48	
	k_m		0.38	0.35	0.35	
	k_{m1}		0.69	0.69	0.69	
	k_{m2}			0.66		
Piezoelectric charge coefficient	d_{31}		-210	-180	-165	
	d_{32}	10 ⁻¹² C/N	500	400	360	600
	d_{33}			550		
Piezoelectric voltage coefficient	g_{31}	10 ⁻³ Vm/N	-11.5	-11.3	-12.9	
	g_{32}		22	25	27	16
Acousto-mechanical properties						
Frequency coefficients	N_x		1950	2000	1960	1960
	N_y		1500	1420	1500	
	N_z	Hz · m	1750		1780	
	N_t		1950	2000	1990	1960
Elastic compliance coefficient	S_{11}^F	10 ⁻¹² m ² /N	15.0	16.1	15.6	
	S_{22}^F		19.0	20.7	19.7	
Elastic stiffness coefficient	C_{33}^D	10 ¹⁰ N/m ²	10.0		11.1	
Mechanical quality factor	Q_m		100	80	80	50
Temperature stability						
Temperature coefficient of ϵ_a^* (in the range -20 °C to +125 °C)	$TK \epsilon_a^*$	10 ⁻³ /K	6	4	6	5
Time stability (relative change of the parameter per decade of time in %)						
Relative permittivity	C_ϵ			-1.0	-2.0	
Coupling factor	C_k			-1.0	-2.0	



	Hard PZT materials						Lead-free materials
PIC152	PIC181	PIC184 ²⁾	PIC144 ²⁾	PIC241	PIC300	PIC110	PIC700 ²⁾
7.70	7.80	7.75	7.95	7.80	7.80	5.50	5.6
340	330	295	320	270	370	150	200 ²⁾
1350	1200	1015	1250	1650	1050	950	700
	1500	1250	1500	1550	950		
15	3	5	4	5	3	15	30
0.48	0.56	0.55	0.60	0.50	0.48	0.30	0.15
	0.46	0.44	0.48	0.46	0.43	0.42	0.40
	0.32	0.30	0.30	0.32	0.25	0.18	
0.58	0.66	0.62	0.66	0.64	0.46		
	0.63	0.65		0.63	0.32		
300	-120	-100	-110	-130	-80	-50	120
	265	219	265	290	155	120	
	475	418		265	155		
25	-11.2	-11.1	-10.1	-9.8	-9.5		
	25	24.4	25	21	16	-11.9	
2250	2270	2195	2180	2190	2350	3150	
	1640	1590	1590	1590	1700	2300	
	2010	1930		1550	1700	2500	
1920	2110	2035	2020	2140	2100		
	11.8	12.7	12.4	12.6	11.1		
	14.2	14.0	15.5	14.3	11.8		
	16.6	14.8	15.2	13.8	16.4		
100	2000	400	1000	400	1400	250	
2	3	5			2		
		-4.0				-5.0	
		-2.0				-8.0	

Recommended operating temperature:
50 % of Curie temperature.

- 1) Material for the Multilayer tape technology.
- 2) Preliminary data, subject to change
- 3) Maximum operating temperature

The following values are valid approximations for all PZT materials from PI Ceramic:

Specific heat capacity:
WK = approx. 350 J kg⁻¹ K⁻¹

Specific thermal conductivity:
WL = approx. 1.1 W m⁻¹ K⁻¹

Poisson's ratio (lateral contraction):
 σ = approx. 0.34

Coefficient of thermal expansion:
 α_3 = approx. -4 to -6 × 10⁻⁶ K⁻¹
(in the polarization direction, shorted)
 α_1 = approx. 4 to 8 × 10⁻⁶ K⁻¹
(perpendicular to the polarization direction, shorted)

Static compressive strength:
> 600 MPa

The data was determined using test pieces with the geometric dimensions laid down in EN 50324-2 standard and are typical values.

All data provided was determined 24 h to 48 h after the time of polarization at an ambient temperature of 23 ± 2 °C.

A complete coefficient matrix of the individual materials is available on request. If you have any questions about the interpretation of the material characteristics please contact PI Ceramic (info@piceramic.com).

PICA Power Piezo Actuators for high-dynamics applications



Order number	Displacement [μm] (0–1000 V) -10/+20%	Diameter OD [mm]	Length L [mm] ± 0.5	Blocking force (0–1000 V) [N]	Stiffness [N/ μm]	Capacitance [nF] $\pm 20\%$	Resonant frequency [kHz]
P-010.00P	5	10	9	1200	240	17	129
P-010.10P	15	10	18	1800	120	46	64
P-010.20P	30	10	31	2100	68	90	37
P-010.40P	60	10	58	2200	37	180	20
P-010.80P	120	10	111	2300	19	370	10
P-016.10P	15	16	18	4500	300	130	64
P-016.20P	30	16	31	5400	180	250	37
P-016.40P	60	16	58	5600	94	510	20
P-016.80P	120	16	111	5900	49	1000	10
P-016.90P	180	16	163	6000	33	1600	7
P-025.10P	15	25	20	9900	660	320	58
P-025.20P	30	25	33	12000	400	630	35
P-025.40P	60	25	60	13000	220	1300	19
P-025.80P	120	25	113	14000	120	2600	10
P-025.90P	180	25	165	14000	80	4000	7
P-035.10P	15	35	21	18000	1200	530	55
P-035.20P	30	35	34	23000	760	1200	34
P-035.40P	60	35	61	26000	430	2500	19
P-035.80P	120	35	114	28000	230	5200	10
P-035.90P	180	35	166	29000	160	7800	7
P-045.20P	30	45	36	36000	1200	2100	32
P-045.40P	60	45	63	41000	680	4300	18
P-045.80P	120	45	116	44000	370	8800	10
P-045.90P	180	45	169	45000	250	13000	7
P-056.20P	30	56	36	54000	1800	3300	32
P-056.40P	60	56	63	66000	1100	6700	18
P-056.80P	120	56	116	68000	570	14000	10
P-056.90P	180	56	169	70000	390	21000	7

Piezo ceramic type: PIC255.
Standard electrical interfaces: FEP-insulated wire leads, 100 mm, AWG 24 (\varnothing 1.15 mm). PT1000 temperature sensor.
Recommended preload for dynamic operation: 15 MPa.

Maximum preload for constant force: 30 MPa.
Resonant frequency at $1 V_{pp}$, unloaded. The value is halved for unilateral clamping.
Capacitance at $1 V_{pp}$, 1 kHz, RT.

Operating voltage: 0 to 1000 V.
Operating temperature range: -20 to 150°C. Standard mechanical interfaces: Steel or titanium plates, 0.5 to 1.0 mm thick (depends on model).
Outer surfaces: FEP, transparent shrink

sleeving (outside); epoxy resin (inside).
Custom designs or different specifications on request.

ДОДАТОК Д
PIEZOELECTRIC PROPERTIES SP-*

DATA	Lead Zirconate Titanate					Lead Titanate
	SP-4	SP-8	SP-5A	SP-5J	SP-5H	SP-2
Piezoelectric Coupling Co-efficient:						
k_p	0.60	0.50	0.61	0.60	0.63	0.01
k_{33}	0.68	0.63	0.70	0.71	0.73	0.52
Piezoelectric Charge Constants						
d_{33} (x 10 ⁻¹² C/N)	300	215	400	460	550	68
d_{31} (x 10 ⁻¹² C/N)	11.5	- 9.5	- 170	- 210	- 265	-3
Piezoelectric Voltage Constants						
g_{33} (x 10 ⁻³ Vm/N)	26	25	25	22	19	39
g_{31} (x 10 ⁻³ Vm/N)	- 11	- 11	- 11	- 9	- 9	-1.7
Relative Dielectric Constant, K^T_3 (low signal)	1250	1000	1750	2450	3100	195
Dissipation factor, $\tan \delta$(low field)	0.004	0.004	0.020	0.020	0.020	0.010
Density, ρ (kg/m³)	7600	7600	7650	7500	7500	6900
Curie temperature, T_c (°C)	325	330	360	260	190	200
Mechanical Quality Factor, Q_m	500	1000	75	70	65	-
Figure of Merit $d_h \times g_h$ (x 10⁻¹⁵)	150	110	65	150	67	2400
Elastic Constants, short circuit						
s^{E11} (x 10 ⁻¹² m ² /N)	12	11	19	23	21	-
s^{E33} (x 10 ⁻¹² m ² /N)	16	14	16	16	15	-
Frequency Constants (Hz-m)						
N_p (planar mode disk)	2200	2270	1950	2000	1950	-
N_t (thickness mode disk)	1905	2032	1800	1950	2000	2200
Ageing Rate, % change per time decade						
K^T_3	- 2.5	- 4.6	- 0.1	- 0.4	- 0.4	- 0.3
k_p	- 1.6	- 2.0	- 0.7	-1.5	- 0.9	-
N_p	+ 1.0	+ 0.8	+ 0.1	+ 0.2	+ 0.15	+ 0.3

ДОДАТОК Е

НДІ «ЕЛПА» сегнетом'які та сегнетожосткі матеріали



Материалы
Пьезокерамические

**СЕГНЕТОМЯГКИЕ
ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКИЕ
МАТЕРИАЛЫ**

Основные параметры материалов

Обозначение	Единица измерения	ЦТС-19	ЦТС-26	ЦТС-36	НЦТС-1	НЦТС-1	NEW НЦТС-2	ЦТС-46	NEW ЦТС-50	NEW ЦТС-51
T_k	°C	290	350	350	175	140	130	260	260	250
$\epsilon_{33}^T/\epsilon_0$	-	1750	1700	670	4000	5700	5100	2100	2200	2180
$\epsilon_{11}^T/\epsilon_0$	-	1450	-	1130	-	-	-	-	-	-
$tg\delta$, не более	%	2,5	2	2,5	2	2,8	3	2	2,5	2
Q_m	-	80	80	80	50	40	60	70	80	75
$\sqrt{E_1}$	$\cdot 10^3$ м/с	3	2,9	3	2,87	3	2,95	2,9	2,9	2,85
σ_p	-	0,37	0,38	0,3	-	0,38	-	0,33	0,33	0,32
k_p	-	0,55	0,6	0,57	0,6	0,62	0,61	0,63	0,64	0,67
k_{15}	-	0,6	-	0,73	-	-	-	-	-	-
k_{33}	-	0,67	0,68	0,7	-	-	0,74	0,72	0,73	0,74
d_{31}	10^{-12} Кл/Н	-160	-160	-90	-260	-310	-310	-190	-200	-216
d_{33}	10^{-12} Кл/Н	350	340	220	550	650	800	450	470	560
d_{15}	10^{-12} Кл/Н	400	-	440	-	-	-	-	-	-
g_{31}	10^{-3} В·м/Н	-10,3	-10,6	-15,2	-7,3	-6,2	-6,9	-10,2	-10,3	-11,1
g_{33}	10^{-3} В·м/Н	22,6	22,6	37,1	15,5	12,9	17,7	23,1	24,1	29,0
$(ООЧ)_p$	%	0,8	-	3	-	-	-	-	-	-
$(ООЧ)_{сд}$	%	0,9	-	1,1	-	-	-	-	-	-
$(ООЧ)_{ск}$	%	1	-	2	-	-	-	-	-	-
$T_{раб}^*$	°C	200	250	200	100	85	80	180	180	175
ρ_v , не менее	При 100 °C, $\cdot 10^3$, Ом·м	1	1	1	1	1	1	1	1	1
ρ	10^3 кг/м ³	7,5	7,6	7,7	7,4	7,6	7,8	7,5	7,6	7,5

СЕГНЕТОЖЕСТКИЕ ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

Основные параметры материалов

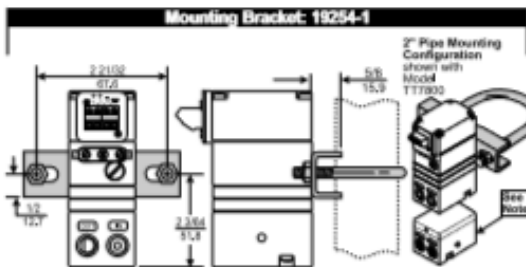
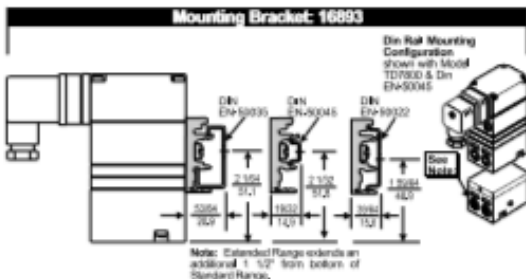
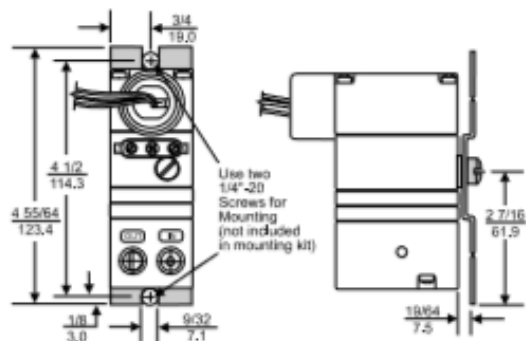
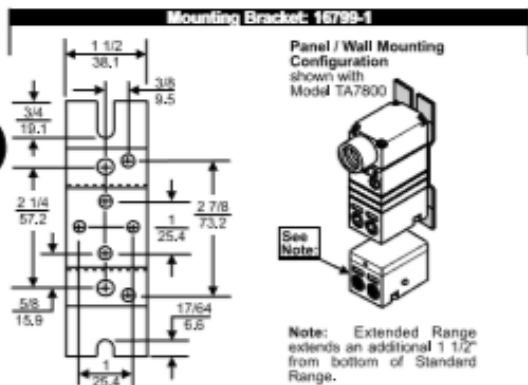
Обозначение	Единица измерения	ЦТС-7	ЦТБС-8	ЦТС-43	ЦТС-47	ЦТС-42	ЦТС-48
T_k	°C	280	290	280	270	270	210
$\epsilon_{33}^T/\epsilon_0$ **	-	1000	1400	1400	1450	1300	2200
$\epsilon_{11}^T/\epsilon_0$	-	1200	-	-	-	-	-
$tg\delta$, не более **	%	0,7	0,4	0,6	0,6	0,55	0,8
$tg\delta_c$		3	1	1,7	-	2	2
Q_m	-	300	1120	110	900	850	450
v_1^E	10^3 м/с	3,3	3,2	3,2	-	3,2	3,2
σ_p	-	0,33	-	0,33	-	-	0,37
k_p	-	0,5	0,56	0,52	-,56	0,54	0,58
k_{15}	-	0,6	-	-	-	0,68	-0,65
k_{33}	-	0,65	0,68	0,64	-	0,69	180
d_{31}	10^{-12} Кл/Н	-120	-140	-125	135	-130	420
d_{33}	10^{-12} Кл/Н	240	315	280	290	280	-
d_{15}	10^{-12} Кл/Н	365	-	-	-	-	9,3
g_{31}	10^{-3} В*м/Н	-13,6	-11,3	-10,1	-10,3	-11,3	21,6
g_{33}	10^{-3} В*м/Н	27,1	25,4	22,6	22	24,3	-
(ООЧ) _p	%	2,5	-	-	-	0,4	-
(ООЧ) _{сд}	%	2,7	-	-	-	-	-
(ООЧ) _{сж}	%	4,4	-	-	-	-	-
$T_{раб}^*$	°C	150	200	200	-	185	120
ρ_v	При 100 °C, $\cdot 10^9$, Ом*м	5	5	5	-	-	5
ρ	10^3 кг/м ³	7,6	7,6	7,5	7,7	7,5	7,5

ДОДАТОК Ж

Model T7800 Electro-Pneumatic I/P, E/P Transducer

Model T7800 Electro-Pneumatic I/P, E/P Transducer

Mounting Kits



Model T7800 Transducer Kits & Accessories

- Mounting Bracket Kits 16799-1 (included with unit)
 16893 (included with unit)
 19254-1 (sold separately)

Catalog Information

Catalog Number T 7800

Electrical Connections

- 1/2 NPT Conduit A
 Fitting with Pigtail D
 DIN43650 Connection R
 Rack Mount T
 Terminal Block T

Underwriting Group

- Canadian Standards C
 ATEX E
 Factory Mutual F
 None (leave blank) F

Approval Class

- Intrinsically Safe¹ I
 Non-Incendive (Division 2)² N
 None (leave blank) N

Input

- 4-20 mA 4
 1-5 VDC⁶ 5
 0-5 VDC⁶ 7
 1-9 VDC 9
 0-10 VDC 0

Output

- 3-15 psig³ 01
 3-27 psig³ 02
 6-30 psig³ 03
 0-30 psig⁴ 04
 0-60 psig⁴ 05
 0-120 psig⁴ 06
 [0.2-1.0 BAR]³ 11
 [0.2-1.8 BAR]³ 12
 [0.4-2.0 BAR]³ 13
 [0-2.0 BAR]⁴ 14
 [0-4.0 BAR]⁴ 15
 [0-8.0 BAR]⁴ 16
 (20-100 kPa)³ 21
 (20-180 kPa)³ 22
 (40-200 kPa)³ 23
 (0-200 kPa)⁴ 24
 (0-400 kPa)⁴ 25
 (0-800 kPa)⁴ 26

Options

- BSPT Thread⁵ U

¹ Intrinsically Safe Approval includes Non-Incendive (Division 2), available on 4-20 mA units only.
² Non-Incendive (Division 2) approval on FM voltage input units only
³ Standard Range
⁴ Extended Range
⁵ Available on all units EXCEPT Factory Mutual and Canadian Standards Underwriting Group units.
⁶ Limited Availability

Installation

For installation instructions, refer to the Fairchild T7800 Standard Range Electro-Pneumatic Transducer Installation, Operation and Maintenance Instructions, IS-50T7800S and the Fairchild T7800 Extended Range Electro-Pneumatic Transducer Installation, Operation and Maintenance Instructions, IS-50T7800E.

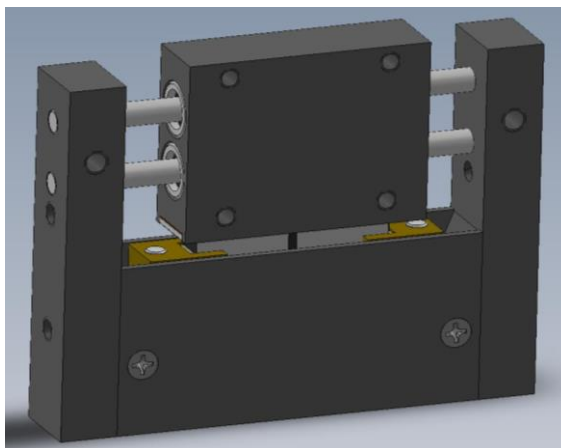
Optional manifolds are available to mount 3, 5, 10 or 15 transducers. An optional rack kit is available to mount 10 transducers in a standard 19" rack. For more information, see the Fairchild Manifold and Rack Kit, CS-4000MRKT.

ДОДАТОК И

Технічні паспорти п'єзодвигунів LPM-5 і PM-11*24R

НАНОТЕХНОЛОГИИ, ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, БИМЕДИЦИНСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ_

Линейный микродвигатель LPM-5



Выполнен в соответствии с патентом Украины №76759, патентом US 8,299,684 B2.

Области использования: микро- и наноманипуляторы, микроклапаны, робототехника, микроинъекционные системы, микрохирургические системы, интегральная полупроводниковая техника, волоконная и лазерная техника и т.д.

- Выполнен на основе направляющей с линейными подшипниками серии LM3UU и пьезоэлектрического линейного актюатора квазирезонансного типа. Для подключения используется плата серии DRIVER RM-LMD. По сравнению с традиционными двигателями имеет малый габарит, большой диапазон прецизионного перемещения, возможность формирования сверхмалых микроперемещений, практически мгновенный разгон и торможение, самоторможение при отключении генератора, практически полное отсутствие дрейфа.

ХАРАКТЕРИСТИКИ

- Диапазон перемещения..... 15 mm
- Максимальное усилие ≥ 3.0 N
- Максимальная скорость..... ≥ 0.2 m/s
- Усилие самоторможения..... более 4.0 N
- Минимальный шаг 0.05 μ m
- Длительность строба минимального шага 20-30 μ s
- Частота следования шагов (приемистость)..... до 10 kHz
- Время разгона до максимальной скорости (без инерционной нагрузки) 200 μ s
- Дрейф (при 20°C)..... не более 2 nm/h
- Несущая способность направляющей до 200 g
- Напряжение питания..... 12 V
- Максимальный ток (при максимальной скорости)..... 400 mA
- Диапазон средней потребляемая мощность..... 0,5...5,0 W
- Вес двигателя..... 35 g
- Вес драйвера..... 20 g
- Размер..... 59×47×10 mm

Contact Details: Small Scientific Production Enterprise "LILEYA" Ltd; Contact person: Sergii Petrenko

Address: Ukraine, Kiev-02002, Lunacharskogo Str., 3G; Tel/Fax: (380-44) 516-50-00 Mob.: 8(067) 918-32-68; E-mail: tyl1@naverex.kiev.ua; Web-site: www.piezomotor.com.ua; www.piezotech.com.ua

НАНОТЕХНОЛОГИИ, ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, БИОМЕДИЦИНСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

Микродвигатель РМ – 11*24R



Выполнен в соответствии с патентом Украины №76759, патентом US 8,299,684 B2.

Области использования: оптика, микро- и наноманипуляторы, робототехника, микрохирургические системы, интегральная полупроводниковая техника, волоконная и лазерная техника и т.д.

- Роторная часть и одновременно осевая выполнены на основе прецизионного подшипника качения $\varnothing 32 \times \varnothing 15 \times 9$, а статорная – на основе пьезоэлектрического плоского актюатора квазирезонансного типа. Сопряжение с нагрузкой осуществляется через несущую плоскую платформу, установленную на подшипнике, либо через сквозное отверстие ("hole shaft") на этой платформе. Для подключения используется плата серии DRIVER RM-LMD. По сравнению с традиционными двигателями имеет малый габарит и вес, плоское исполнение, большую несущую способность, широкий диапазон регулировки по скорости, возможность формирования сверхмалых угловых микроперемещений, практически мгновенный разгон и торможение, самоторможение при отключении возбуждения, практически полное отсутствие дрейфа. Величина потребляемого тока практически не зависит от нагрузки. Для демонстрации импульсного режима работы может доукомплектовываться платой VELOCITY-RM.

ХАРАКТЕРИСТИКИ

- Максимальная скорость ≥ 100 rpm
- Максимальный момент ≥ 30 mN*m
- Момент самоторможения > 30 mN*m
- Минимальный угловой шаг (разрешение) ≤ 5 arc.sec
- Длительность строба минимального шага 20-30 μ s
- Частота следования шагов (приемистость)..... до 10 kHz
- Время разгона до максимальной скорости (без инерционной нагрузки) 200 μ s
- Дрейф (при 20°C)..... не более 1-2 arc.sec /h
- «Мертвый» ход (люфт)..... менее 1-2 arc.sec
- Осевая несущая способность платформы до 500 g
- Напряжение питания..... 12 V
- Максимальный ток (при макс. скорости)..... не более 500 mA
- Диапазон потребляемой мощности с учетом импульсного режима работы..... 0,01-5,0 W
- Размер..... 57*40*16 mm
- Диаметр сквозного отверстия..... 7 mm
- Вес двигателя..... 50 g
- Вес драйвера..... 20 g

Contact Details: Small Scientific Production Enterprise "LILEYA"Ltd; Contact person: Sergii Petrenko

Address: Ukraine, Kiev-02002, Lunacharskogo str,3G; Tel/Fax: (380-44) 516-50-00 Mob.: 8(067) 918-32-68; E-mail: tyl1@naverex.kiev.ua ; Web-site: www.piezomotor.com.ua ; www.piezotech.com.ua

ДОДАТОК К

Список публікацій здобувача 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 двофазного 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, Google Scholar.

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:** приймав у часті у розробці фрагменту функціональної схеми блока Main для управління лінійним п'єзодвигуном;

база(u): 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(u):** 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. Никольский В. В., Никольский М. В., Лысенко В. Е. Модель пьезоэлектрического преобразователя клапана подачи газа в судовой 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. Никольский В. В., Оженко Е. М., Лысенко В. Е., Никольский 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 відсич подачі газу при знеструмленні судна.

12. Nikolskyi V. Fuzzy logic positioning system of ship's diesel generators actuating mechanisms // Vitalii Nikolskyi, Yevgen Ozhenko, Kyrylo 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 ПІД 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.