

УДК 681.587.72:004,3'144:621.4(045)

[0000-0002-8123-4233] **В. В. Никольский**, *д.т.н., профессор,*
профессор кафедры технической эксплуатации флота

e-mail: prof.nikolskyi@ukr.net

[0000-0002-3387-7402] **М. В. Никольский**, *к.т.н.,*

ст. преподаватель кафедры автоматизации дизельных и газотурбинных установок

e-mail: markdezert@ukr.net

Национальный университет «Одесская морская академия»

ул. Дидрихсона, 8, Одесса, 65029, Украина

[0000-0001-7643-9931] **В. Е. Лысенко**, *м.н.с. научно-исследовательской части*

e-mail: Victor.Lisenko.1990@gmail.com

ЧНУ им. Петра Могилы,

улица 68 Десантников, 10, Николаев, Николаевская область, 54003, Украина

МОДЕЛЬ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ КЛАПАНА ПОДАЧИ ГАЗА В СУДОВОЙ ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОР

Повышение требований безопасности и обеспечение работоспособности судовых двухтопливных дизелей, используемых на газозавозах и утилизирующих испаряющийся газ из грузовых танков, требует применения устройств на новых физических принципах. В настоящее время для управления клапаном подачи газа используется электромагнитный преобразователь – соленоид, в процессе эксплуатации которого наблюдается неполное открытие / закрытие, приводящее к частым отказам и метановому скольжению. Целью исследования является создание модели пьезоэлектрического преобразователя на основе наборного столба пьезоэлектрических шайб для клапана подачи газа в судовой дизель-генератор. Разработан типовой блок модели пьезоэлектрической шайбы с продольной поляризацией в среде электронного моделирования SimInTech, создана библиотека типовых блоков. Проведены исследования динамики поведения, позволившие проверить процессы в пьезоэлектрическом преобразователе на соответствие требованиям ко времени срабатывания и перемещения клапана. Установлено, что размеры пьезоэлектрического столба для осуществления требуемого перемещения в несколько раз превосходят размеры электромагнитного соленоида, а время срабатывания удовлетворяет предъявляемым требованиям.

Ключевые слова: клапан подачи газа, GAV, пьезоэлектрический преобразователь, судовые двухтопливные дизель-генераторы, SimInTech.

Введение. При работе судовых двухтопливных дизелей (тип DF) [1] наблюдаются перебои в работе клапанов подачи газа SOGAV-250, обусловленные процессами, протекающими в электромагнитном соленоиде [2]. В [3] предложена конструкция клапана с пьезоэлектрическим преобразователем из наборного столба.

Цель статьи – создание модели пьезоэлектрического преобразователя перемещения клапана подачи газа в судовой двухтопливный дизель в среде электронного моделирования для определения возможности совершения перемещения клапана на расстояние

0.4 мм за время не более 2 мс при развиваемом усилии блока прижимных пружин 100 Н.

Основная часть. В [4, 5] предложены конструкции наборных столбов на основе пьезошайб с продольной поляризацией, поперечным сечением S_0 и первоначальной толщиной l_0 . (рисунок 1), получившие развитие при создании систем управления подачей топлива в WARTSILA 12RT-Flex96C в [6].

Так, длина наборного столба изменяется под действием электрического поля E в направлении действия поля на значение Δ , перемещая исполнительный орган – клапан подачи газа массой m_0 , сочлененный с его сво-

бодным концом. Кроме исполнительного органа, перемещаются также элементы объема активной части пьезоэлемента, масса которого m_k , как правило, меньше массы исполнительного органа. Поэтому инерционностями перемещающихся элементарных объемов пьезоэлемента пренебрегают. Наборной столб закреплен одним концом на корпусе клапана и эта его часть не принимает участия в движении. Суммарная приведенная подвижная масса m_Σ равна, кг,

$$m_\Sigma = m_0 + 0.382m_k.$$

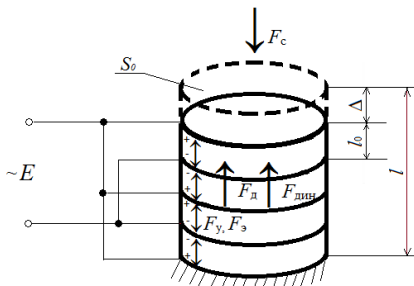


Рисунок 1 – Конструкция наборного столба пьезоэлектрических шайб с продольной поляризацией

Модель составлена с учетом третьего закона Ньютона для сил, действующих на столб:

$$F_y = F_3 - F_d - F_{дин} - F_c,$$

где $F_y = K_y \Delta$ – усилие упругой деформации, Н; $F_3 = d_n Y S_0 E$ – усилие в пьезоэлементе, вызванное приложенным электрическим полем, Н; F_c – статическое усилие, приложенное к столбу со стороны исполнительного органа, Н; $F_d = -K_d (d\Delta / dt)$ – демпфирующее усилие в пьезоэлементе, Н; $F_{дин} = -m_\Sigma (d^2\Delta / dt^2)$ – динамическое усилие в пьезоэлементе, Н; $K_y = Y S_0 / l_0$ – коэффициент упругости пьезоэлемента, Н/м; K_d – коэффициент внутреннего демпфирования пьезоэлемента, кг/с; m_Σ – эквивалентная приведенная суммарная масса подвижных частей, кг; Δ – деформация пьезоэлемента, мм; l_0 – первоначальная толщина шайбы, мм; σ – механическое напряжение, Н/м²; Y – модуль Юнга, Н/м²; d_n – пьезомодуль, Кл/Н; E – напряженность поля, В/м.

В качестве исходной модели наборного столба была принята структурная схема типового блока составного столба [4], реализация которых была осуществлена на аналоговых вычислительных машинах.

Нами была составлена субмодель типового блока в среде электронного моделирования SimInTech [7], которая представлена на рисунке 2.

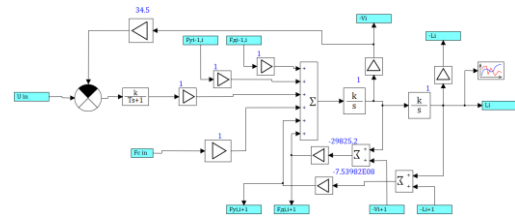


Рисунок 2 – Субмодель типового блока пьезоэлектрической шайбы

Для обработки различных вариантов соединения типовых блоков была составлена библиотека компонентов Актуаторы, представленная на рисунке 3.

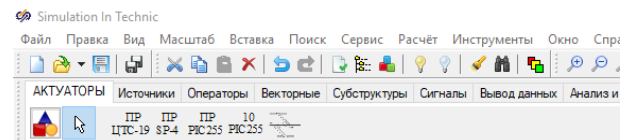


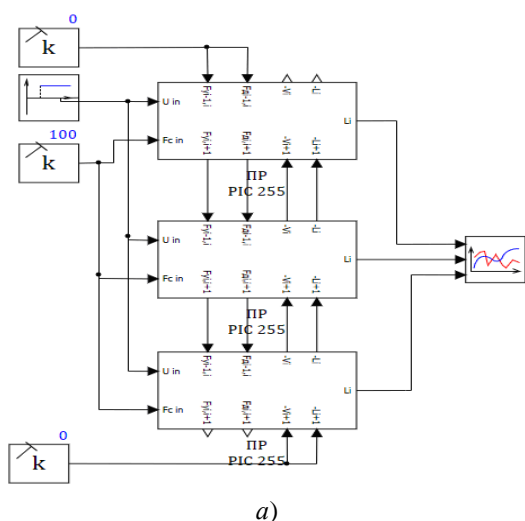
Рисунок 3 – Внешний вид библиотеки компонентов

В [7] проведены исследования влияния свойств пьезокерамики на перемещение пьезоэлемента и установлено, что лучшими характеристиками обладает керамика PIC255.

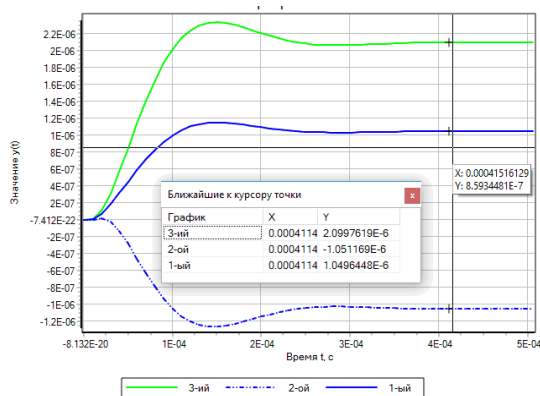
Для увеличения перемещения наборного столба в исследовании был использован блок из трех пьезоэлектрических шайб на основе керамики PIC255, на вход которого подавалось входное напряжение управления 100 В и осуществлено предварительное нагружение в 100 Н. Модель и результат моделирования в SimInTech представлены на рисунке 4. Анализ результатов показал, что при подаче ступеньки амплитудой 100 В наборной столб развивает перемещение 2 мкм и выходит на установившийся режим через 0.4 мс, что удовлетворяет требованиям к быстродействию не более 2 мс. Однако перемещение достаточно мало. Для того чтобы достичь перемещения 0.4 мм, необходимо 200 шайб, но тогда размер столба при толщине шайбы 0.005 м составит 1 м без учета электродов и клеевого шва.

Были проведены исследования для предварительной оценки работоспособности наборного столба из 100 пьезошайб PIC255. На рисунке 5, а представлена реакция на «ступеньку», а на рисунке 5, б – «мендр»

длительностью 0.076 с, что соответствует фазам открытия клапана подачи газа при частоте вращения судового дизель-генератора 800 об/мин. Время отклика при подаче «ступеньки» составило менее 2 мс, однако присутствует колебательность системы, достигающая 20 % от максимального перемещения и продолжающаяся до наступления момента закрытия клапана. Время до установившегося процесса составляет 30 мс. Это означает, что весь цикл подачи газа будут происходить колебания клапана.



а)

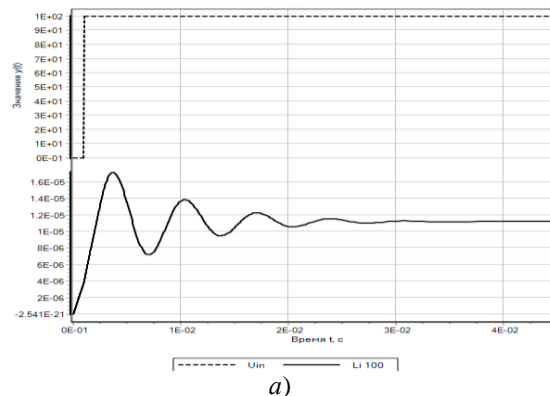


б)

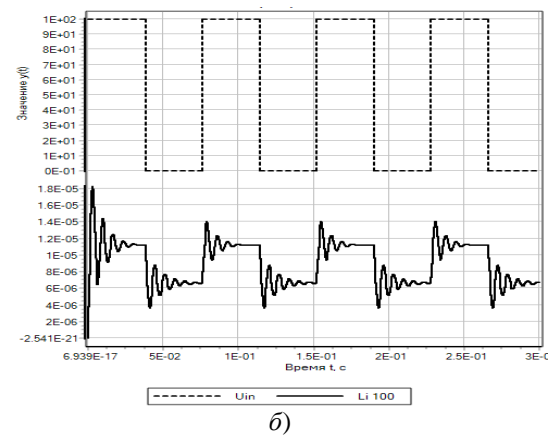
а) модель; б) график зависимости $\Delta = f(t)$

Рисунок 4 – Исследование поведения наборного столба на PIC255:

В [4, с. 139-140] упоминалось, что внутри типового блока присутствует целый ряд коэффициентов масштабирования K_y и K_d , которые настраиваются, исходя из ожидаемых результатов. Поэтому были проведены исследования для двух значений этих коэффициентов: 1 и 0.5 (рисунок 6).



а)



б)

а) реакция на «ступеньку»;
б) реакция на «меандр»

Рисунок 5 – Исследование поведения наборного столба из 100 ПЭ на основе PIC255

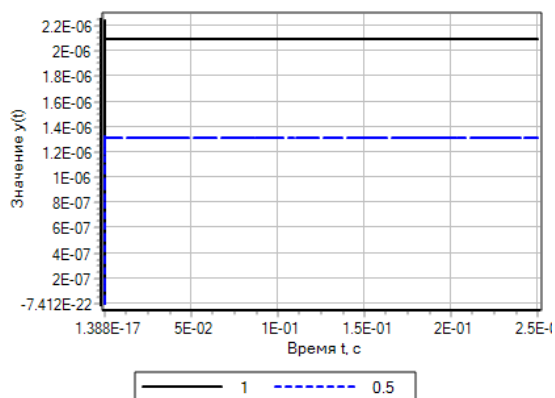


Рисунок 6 – Исследование при изменении масштабирующих коэффициентов K_y и K_d

В результате было установлено, что перемещение свободного конца наборного столба уменьшается практически в 2 раза.

На рисунке 7 представлены исследования столбов из 3 и 60 пьезоэлектрических шайб при изменении входного напряжения от 0 до +100 В (рисунок 7, а) и столба из 60 шайб при подаче двухполярного сигнала управления от -100 В до +100 В (рисунок 7, б).

В результате моделирования установлено, что на рисунке 7, а столб не возвращается в начальное состояние, а при подаче двуполярного сигнала управления (рисунок 7, б) возвращается в исходное состояние. Однако в этом случае может произойти разрушение конструкции, о чём говорится в инструкции по монтажу наборных столбов НПФ «Элпа», в частности «... при установке не путать полярность во избежание выхода из строя» [10].

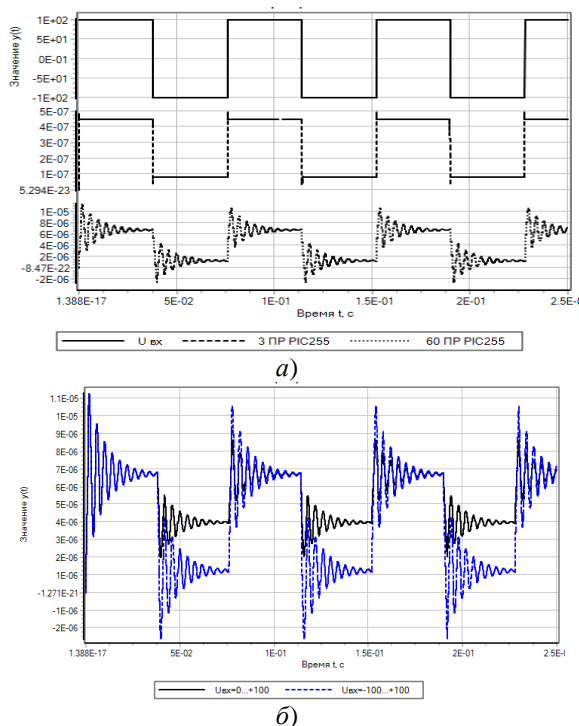


Рисунок 7 – Исследование перемещения наборных столбов при однополярном (а) и двуполярном (б) напряжении сигнала управления

Выводы. Составлена модель типового блока пьезоэлектрической шайбы в среде электронного моделирования SimInTech на основе сегнетожесткой керамики, которая позволяет получить максимальное перемещение.

Среда электронного моделирования в сжатое время позволила построить модель большого количества элементов, однотипных по структуре и, иногда, с однотипными параметрами.

Составлены модели наборных столбов из трех и десяти пьезошайб на основе пьезокерамики PIC255, SP-4 и ЦТС-19, которые внесены в библиотеку Палитры компонентов среды электронного моделирования SimInTech, в частности, группу элементов Актуатор.

В результате моделирования пьезоэлектрического преобразователя в виде наборного столба установлено, что блоки из трех и шестидесяти шайб удовлетворяют требованиям, предъявляемым к быстрдействию клапана подачи газа судового двухтопливного среднеоборотного дизель-генератора. Однако для увеличения перемещения необходимо использовать более 200 элементов, что приводит к увеличению габаритных размеров, в несколько раз превосходящих размеры соленоида.

Увеличение перемещения при минимальных размерах столбов возможно при использовании дифференциальных конструкций [11], мультипликаторов в виде коромысел и рычагов [6, 9].

Для уменьшения колебаний возможно использование методов коррекции динамических свойств – последовательная коррекция и с помощью гибких и жестких обратных связей, использование управляемых источников тока [4], цифровых ПИД регуляторов и Fuzzy logic [6].

Поэтому дальнейшие исследования будут направлены на разработку конструкций клапана с пьезоэлектрическим преобразователем с приемлемыми масса-габаритными показателями.

Список литературы

- [1] Wartsila Service Letters #444 SL87-223/UM MC/MCE Engines. Super-VIT Fuel Pumps: Adjustment & Maintenance. [Online]. Available: <http://marengine.com/ufiles/SL87-223.pdf>. Accessed on: 12.06.2017.
- [2] JUSSI PEURALA, "Model-based design, modelling and simulation of digital hydraulic GAS admission valve", M.S. thesis, 132 p., 12 Appendix pages, May 2014. [Online]. Available: <https://dspace.cc.tut.fi/dpub/bitstream/handle/123456789/22251/peurala.pdf;sequence=1>. Accessid on: 25.07.2019.
- [3] В. В. Нікольський, В. Є. Лисенко, та М. В. Нікольський, "Використання п'єзоприводу для клапана подачі газу двохпального двигуна внутрішнього згорання", *Автоматизація судових технічних средств*: науч.-техн. сб., вып. 23, с. 65-69, 2017.
- [4] А. А. Никольский, *Точные двухканальные следящие электроприводы с пьезокомпенсаторами*. Москва: Энергоатомиздат, 1988.

- [5] V. Nikolskyi, Ye. Ozhenko, K. Berezhnyi, and V. Lisenko, "Fuzzy logic positioning system of ship's diesel generators actuating mechanisms", на *Міжнар. наук.-практ. конф. Інформаційні технології та комп'ютерне моделювання*, м. Івано-Франківськ, 14–18 травня 2018 року, Івано-Франківськ, 2018, с. 211–215.
- [6] Е. М. Оженко, "Моделі, методи та засоби покращення системи подачі палива суднового дизеля на базі п'єзоелектричних перетворювачів", дис. ... канд. техн. наук: 05.13.05, Одеса, 2018.
- [7] В. В. Никольский, В. Е. Лысенко, и М. В. Никольский, "Исследование влияния свойств и параметров пьезокерамики на перемещение актуатора в SimInTech", на *VII Міжнар. наук.-техн. конф. Датчики, прилади та системи – 2019*, Черкаси, 2019, 6 с., в печати.
- [8] SimInTech [Online]. Available: http://simintech.ru/?page_id=9. Accessed on: 25.07.2019.
- [9] PI Piezoelectric Ceramic Products: fundamentals, characteristics and applications [Online]. Available: https://static.physikinstrumente.com/fileadmin/user_upload/pi_ceramic/files/catalog_CAT/PI_CAT125E_R3_Piezoelectric_Ceramic_Products.pdf. Accessed on: 25.07.2019.
- [10] Инструкция по применению микроактуаторов МПМА. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.elpapiero.ru/Primenenie_MPMA.pdf. Дата обращения: 25.07.2019.
- [11] А. А. Бобцов, В. И. Бойков, С. В. Быстров, и В. В. Григорьев, *Исполнительные устройства и системы для микроперемещений*. СПб ГУ ИТМО, 2011 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://books.ifmo.ru/file/pdf/822.pdf>. Дата обращения: 25.07.2019.
- [3] V. Nikolskyi, V. Lisenko, and M. Nikolskyi, "Use of a piezoelectric valve for the gas supply valve of a two-fuel internal combustion engine", *Avtomatizatsiya sudovyh tehnikeskikh sredstv*, no. 23. pp. 65–69, Odesa: NU OMA, 2017 [in Ukrainian].
- [4] A. A. Nikolskyi, *Precise two-channel servo drives with piezocompensators*. Moscow: Energoatomizdat, 1988 [in Russian].
- [5] V. Nikolskyi, Ye. Ozhenko, K. Berezhnyi, and V. Lisenko (2018) "Fuzzy logic positioning system of ship's diesel generators actuating mechanisms", in *Informatsiini tehnolohiyi ta kompjuterne modelyuvannya: Internat. sci. and pract. conf. ITCM-2018, Precarpath. Nation. Univ., Ivano-Frankivsk*, 2018, pp. 211-215.
- [6] Ye. M. Ozhenko, "Models, methods and means of improving the system of fuel diesel fuel supply on the basis of piezoelectric transducers", thesis for Ph.D. (Engineering) in specialty 05.13.05, Odesa, 2018 [in Ukrainian].
- [7] V. Nikolskyi, V. Lisenko, and M. Nikolskyi, "Investigation of the influence of the properties and parameters of piezoceramics on the movement of the actuator in SimInTech", in *Datchyky, prylady ta systemy – 2019*, 6 p., in press [in Russian].
- [8] SimInTech. [Online]. Available: http://simintech.ru/?page_id=9.
- [9] PI Piezoelectric Ceramic Products: fundamentals, characteristics and applications. [Online]. Available: https://static.physikinstrumente.com/fileadmin/user_upload/pi_ceramic/files/catalog_CAT/PI_CAT125E_R3_Piezoelectric_Ceramic_Products.pdf. Accessed on: 25.07.2019.
- [10] Instructions for the use of microactuator MPMA. [Online]. Available: https://www.elpapiero.ru/Primenenie_MPM A.pdf. Accessed on 25.07.2019 [in Russian].
- [11] A. A. Bobtsov, V. I. Boykov, S. V. Bystrov, and V. V. Grigoryev, *Actuators and systems for micromotion*. St. Petersburg, 2011 [Online]. Available: <https://books.ifmo.ru/file/pdf/822.pdf> [in Russian].

References

V. V. Nikolskyi, Dr. Sc. (Eng.), professor,

M. V. Nikolskyi, Ph. D. (Eng.),

National University "Odessa Maritime Academy", Didrikhson str., 8, Odessa, 65029, Ukraine

V. E. Lisenko,

Petro Mohyla Black Sea National University, 68 Desantnykiv str., 10, Mykolaiv, 54003, Ukraine

MODEL OF PIEZOELECTRIC ACTUATOR OF GAS ADMISSION VALVE IN MARINE DIESEL GENERATOR

The increase of safety requirements and ensuring of the operability of marine dual-fuel diesel engines which are used on gas carriers and utilize evaporating gas from cargo tanks requires the use of devices based on new physical principles. Currently, an electromagnetic transducer – a solenoid, during the operation of which an incomplete opening / closing is observed, leading to frequent failures and methane slip, is used to control the gas admission valve.

Typical block of a model of piezoelectric washer with longitudinal polarization in the SimInTech electronic modeling environment based on PIC255 ferro-rigid ceramics, which allows to obtain maximum displacement, has been developed. The environment of electronic modeling allows in a short time to build a model of a large number of elements of the same type in the structure and, sometimes, with the same type of parameters, which give a gain compared to MathLab Simulink. Compiled piezo-washer models based on PIC255, SP-4, and $Pb(Zr_xTi_{1-x})O_3$ -19 piezoceramics are listed in the SimInTech Electronic Modeling Component Palette library in the Actuator group of elements. As a result of modeling a piezoelectric transducer in the form of a stacked column, it has been found that blocks of three and sixty washers satisfy the requirements for the speed of the gas admission valve in marine dual-fuel medium-speed diesel generator. However, to increase the displacement, more than 200 elements are necessary, which leads to an increase in overall dimensions several times greater than the dimensions of the solenoid. An increase in the displacement with the minimum dimensions of the pillars is possible using differential structures, reinforcing elements in the form of rockers and levers.

Keywords: gas admission valve, GAV, piezoelectric actuator, marine dual-fuel diesel engines, SimInTech.

В. В. Нікольський, М. В. Нікольський, В. Є. Лисенко

МОДЕЛЬ П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА КЛАПАНА ПОДАЧІ ГАЗУ В СУДНОВИЙ ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОР

Підвищення вимог безпеки і забезпечення працездатності суднових двопаливних дизелів, які використовуються на газовозах і утилізують газ, що випаровується з вантажних танків, вимагає застосування пристроїв на нових фізичних принципах. Нині для управління клапаном подачі газу використовується електромагнітний перетворювач – соленоїд, в процесі експлуатації якого спостерігається неповне відкриття / закриття, що призводить до частих відмов і метанового ковзання. У статті розглянуто створення моделі п'єзоелектричного перетворювача переміщення клапана подачі газу в судновий двопаливний дизель-генератор у середовищі електронного моделювання для визначення можливості здійснення переміщення клапана на відстань 0,4 мм за час не більше 2 мс при зусиллі блока притискових пружин 100 Н. Складено модель типового блока п'єзоелектричної шайби з поздовжньою поляризацією в середовищі електронного моделювання SimInTech на основі сегнетожорсткої кераміки, яка дає змогу отримати максимальне переміщення, створено бібліотеку типових блоків. Складено моделі набірних стовпів з трьох і десяти п'єзошайб на основі п'єзокераміки PIC255, SP-4 і ЦТС-19, які внесені в бібліотеку Палітри компонентів середовища електронного моделювання SimInTech, зокрема, групу елементів Актуатор. Середовище електронного моделювання в стилі терміни дало змогу побудувати модель значної кількості елементів, однотипних за структурою, і, іноді, – з однотипними параметрами. Проведено дослідження динаміки поведінки, що дало змогу перевірити процеси в п'єзоелектричному перетворювачі на відповідність вимогам до часу спрацьовування і переміщення клапана. Встановлено, що розміри п'єзоелектричного стовпа для здійснення необхідного переміщення в кілька разів перевищують розміри електромагнітного соленоїда, а час спрацьовування задовольняє вимогам, що висуваються. Для зменшення коливань можливе використання методів корекції динамічних властивостей.

Ключові слова: клапан подачі газу, GAV, п'єзоелектричний перетворювач, суднові двопаливні дизель-генератори, SimInTech.

Стаття надійшла 18.08.2019

Прийнято 08.09.2019