

В. В. Нікольський, *д.т.н., професор,*
професор кафедри теорії автоматичного управління та обчислювальної техніки

К. Ю. Бережний, *аспірант*
Національний університет «Одеська морська академія»
вул. Дідріхсона, 8, м. Одеса, 65029, Україна

МОДЕЛЬ ВИМІРЮВАЛЬНОГО ЗОНДУ КОМП'ЮТЕРНОЇ СИСТЕМИ ВИЗНАЧЕННЯ РЕОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СУДНОВИХ ТЕХНІЧНИХ РІДИН

Підвищення вимог до викидів у довкілля шкідливих речовин судновими малообертовими двигунами потребує постійного підвищення ефективності роботи паливної системи. Метою дослідження є розробка моделі вимірювального зонду комп'ютерної системи визначення реологічних характеристик суднових технічних рідин на основі методу співвісних циліндрів. Розроблена модель враховує процеси в трьох основних блоках зонда: осциляторі лінійного п'єзодвигуна, фрикційному контакті, триботехнічному вузлі. Визначення реологічних характеристик здійснюється за часом проходження рухомого циліндра між його крайніми станами. Застосовано широтно-імпульсну модуляцію для керування лінійним п'єзодвигуном.

Ключові слова: *комп'ютерна система, лінійний п'єзодвигун, фрикційний контакт, SimInTech.*

Вступ. Підвищення жорсткості до викидів у довкілля шкідливих речовин при роботі суднових малообертових двигунів потребує постійного підвищення ефективності роботи паливної системи, складовою якої є регулятор в'язкості. В свою чергу, до складу регулятора входить вимірювальний зонд (ВЗ). В [9, 14] проведено аналіз сучасних методів, які використовують при визначенні в'язкості важкого палива за допомогою реометрів та комп'ютерних систем визначення реологічних характеристик, та доведено, що найбільш наближеним до реальних процесів у паливній апаратурі є метод співвісних циліндрів.

Метою статті є створення моделі ВЗ комп'ютерної системи визначення реологічних характеристик суднових технічних рідин і встановлення зв'язків його складових та їх впливу на вимірювальні характеристики.

Основна частина. В [9] наведено кінематичну схему можливої конструкції ВЗ на співвісних циліндрах, що складається з триботехнічного вузла та приводу, яка дозволяє здійснювати визначення реологічних характеристик у потоці рідини. Особливістю структурної схеми та конструкції є горизонтальне розташування рухомого та нерухомого циліндрів. Це породило такі недоліки:

- протікання рідини;
- неможливість здійснювати лабораторне дослідження проби рідини;

- неможливість локальної зміни температури вимірювального зонда з рідиною.

Слід зазначити, що основним недоліком було саме протікання рідини.

Для усунення цього недоліку виявилось достатнім розвернути ВЗ порівняно з [9] на 90°. Тобто, рухомий та нерухомий циліндри набули вертикального розташування. В такому випадку ВЗ можливо погрузити в ємність з досліджуваною рідиною, а також забезпечити її підігрів.

На рис. 1 наведено кінематичну схему ВЗ на співвісних циліндрах. Можливість приєднання до конструкції ВЗ стакана 8 запобігає протіканню рідини.

Однак порівняно з конструкцією ВЗ з [9], де рухомий циліндр утримувався в нерухомому за рахунок клину рідини, в запропонованій структурній схемі на рухомий циліндр буде діяти сила тяжіння, яка обумовлена приєднаними масами рухомого циліндра (5) зі штоком. Це приводить до переміщення означеного циліндра в крайнє нижнє положення.

Вочевидь, що зусилля, яке буде потрібно для переміщення циліндра (5) з крайнього нижнього у верхнє положення, є більшим, ніж у зворотному напрямку. Але потрібно з'ясувати: чи зможе сила тертя, яка буде виникати за рахунок рідини між рухомим і нерухомим циліндрами, утримувати нерухомий

циліндр у фіксованому положенні; якими повинні бути розміри та матеріал, з якого виготовлено циліндр; чи можливо утримати або зафіксувати положення рухомого циліндра, чи той буде постійно сповзати в крайнє нижнє положення; і чи можливо це реалізувати за допомогою осцилятора, якщо він у неробочому стані буде заклинений до циліндра.

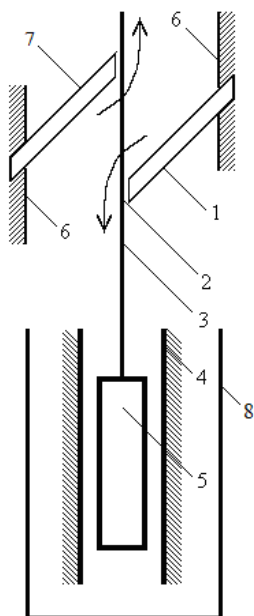


Рис. 1. Кінематична схема ВЗ на співвісних циліндрах: 1, 7 – осцилятори; 2 – точка торкання; 3 – шток; 4 – нерухомий циліндр; 5 – рухомий циліндр; 6 – основа, до якої кріпляться осцилятори; 8 – стакан з рідиною

В першу чергу, потрібно розглянути процеси, які відбуваються в осциляторі.

В основі всіх осциляторів, які застосовують в ЛПД, лежать п'єзоелементи (ПЕ) з поперечною поляризацією (рис. 2).

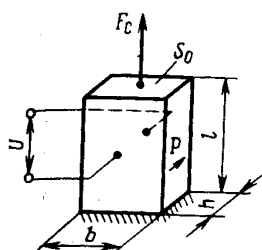


Рис. 2. П'єзоелемент пластинчастого типу з поперечною поляризацією

Для попереднього (оцінного) розрахунку основних конструкцій осцилятора з метою визначення деформації і зусилля, що розвивається, залежно від геометричних розмірів і властивостей використовуваної кераміки були ви-

користані співвідношення [8], які дозволяють побудувати моделі осциляторів.

Слід зазначити, що прямий п'єзоэффект утрудняє формування поля керування, особливо при реалізації динамічних процесів, які швидко проходять. При аналізі динаміки осцилятора малої ємності не зважають на електростатичну сталу часу $T_E = R_{BT}C_0$ попри її незначності. При керуванні ж осцилятором великої ємності для компенсації явищ, пов'язаних із прямим п'єзоэффектом, застосовуються спеціальні технічні заходи, такі як організація спеціальних швидкодіючих контурів регулювання керуючого поля, включення в схему підсилювача додаткових діодів, що утворюють ланцюги замикання наведених токів. Зазвичай це стосується п'єзоактуаторів.

У [5] доведено, що, при певних обмеженнях, ЛПД можуть бути зведені до одновимірної механічної моделі.

Аналіз методів, використовуваних при побудові моделей ВЗ на однорідних плоских ПР, показав, що при побудові моделей з одним однорідним ПР доцільніше використовувати метод кінцевих елементів. Хвильова теорія використовується при побудові моделей зі складальними пакетами.

Аналіз сучасних конструкцій ЛПД провідних фірм-розробників Physik Instrumente (PI) GmbH & Co. KG [11] і ТОВ «Лілея» довів, що як осцилятор реверсивних ЛПД використовують осцилятор, зовнішній вигляд якого зображено на рис. 3, а. Це дозволяє зменшити кількість елементів підтримки ПЕ.

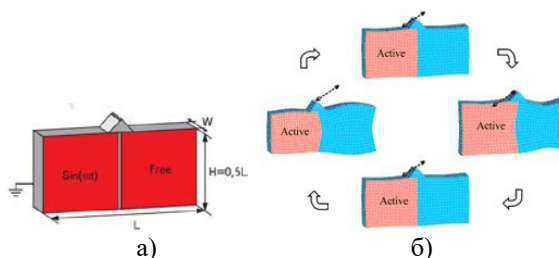


Рис. 3. Конструкція осцилятора та схема його деформації при додаванні синусоїдальної напруги (один цикл коливання п'єзопластини)

Основною частиною лінійного ультразвукового двигуна є п'єзокерамічна пластина, поляризована вздовж напрямку W . На одну сторону пластини нанесені два позитивні електроди, друга сторона заземлена. При русі вліво або вправо на відповідний електрод подається керуючий синусоїдальний сигнал високої частоти (в

діапазоні від 100 до 200 кГц). Під дією прикладеної напруги п'єзокерамічна пластина деформується (рис. 3, б), змушуючи переміщатися прикріплений до неї штовхач. Площі областей Sin(out) та Free рівні між собою. Для полегшення розрахунків кожна область (позначено червоним кольором) є квадратом. І якщо зробити прив'язку до рис. 2, то розміри $b=l$.

В [12] запропоновано каскадну модель п'єзоелектричного приводу, яка враховує гістерезисну нелінійність, де враховані такі параметри: переміщення; параметр корекції; частота системи; коефіцієнт затухання; напруга, яка подається; нормалізована зовнішня сила, яка подається на привод. Однак ця модель не дозволяє оцінити процеси в осциляторі. В [8, 9] було запропоновано універсальну модель осцилятора, яку може бути застосовано для п'єзоелементів з подовжною та поперечною поляризацією.

Для розробки субмоделі ПР ЛПД було застосовано програмне забезпечення від компанії SimInTech. (Модуль: SimInTech control systems simulator. Серійний номер: D63B30FDA70).

В субмоделі було застосовано ПР SP-4 [13], який виготовлено з сегнетожорсткої кераміки, з наступними параметрами: $\varepsilon_0=8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м, $\varepsilon_{33}=1250$, $h=8,9 \cdot 10^{-3}$ 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. При розмірах ПР $b=11,3 \cdot 10^{-3}$ м, $l=11,3 \cdot 10^{-3}$ м, $h=4 \cdot 10^{-3}$ м, $m_2=0,0039$ кг, $R_{em}=50$ Ом, $K_{\Pi}=K_3=0,6$.

На рис. 4 позначені блоки: 1 – інерційно-диференціальна ланка; 2, 3 – інтегратори; 4, 5 – підсилювачі; 6 – похідна; 7, 8 – порівняльні пристрої – суматори.

Параметри для цих блоків становлять: $k=0,6$, $T=1.75203E-11$; 2 – $k=257.6$; 3 – $k=1$; 4 – $k=30$; 5 – $k=2.6495675E9$; 6 – $k=0.0089$.

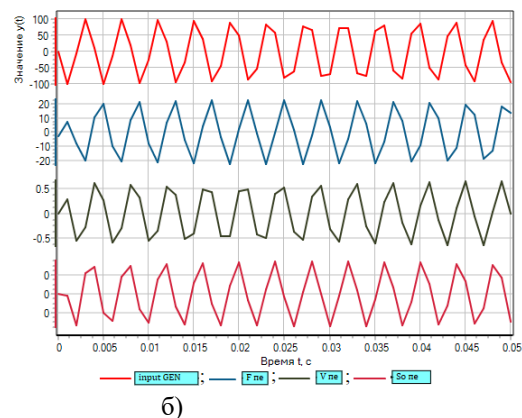
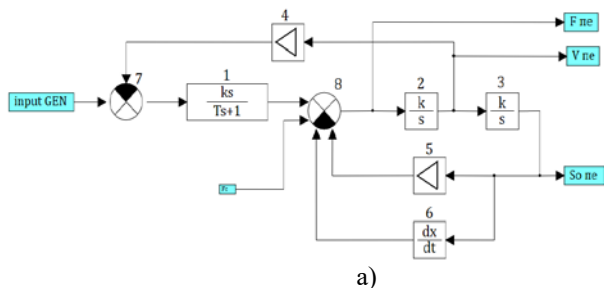


Рис. 4. Субмодель ПР (а) і графіки вхідного та вихідних сигналів (б)

Аналіз результатів моделювання довів, що при частоті вхідного сигналу (input GEN) 1305357.13 рад/с и амплітуді 100 В ПР розвиває миттєві силу $F_{пе} = 20$ Н, швидкість $V_{пе} = 0,5$ м/с та переміщення вільного кінця ПР $So_{пе} = 33$ мкм.

При розрахунках було застосовано метод діагонально неявний (DIRK2), який задається таблицею Бутчера та має 2-й порядок. Цей метод реалізований також і в системі MATLAB/Simulink під назвою Ode23tb. Як зазначає сам розробник програмного забезпечення, реалізація цього методу в SimInTech і в MATLAB різняться, внаслідок чого можуть трохи відрізнятись і результати його застосування в цих системах.

Слід зазначити, що переважне значення мають механічні впливи з боку ЛПД на триботехнічний вузол внаслідок дії зворотного п'єзо ефекту і з боку триботехнічного вузла на привід внаслідок прямого п'єзо ефекту. Адже саме величина прямого п'єзо ефекту дозволяє оцінити навантаження ЛПД з боку триботехнічного вузла, яке проявляється в уповільненні лінійної швидкості рухомої частини ЛПД. А це, в свою чергу, дозволяє здійснити перехід від конструкції двох рухомих співвісних циліндрів до конструкції з рухомих і нерухомих циліндрами. Розрахунок осцилятора ЛПД дає змогу забезпечити підвищену чутливість до зміни навантаження в широкому діапазоні.

В [1] доведено, що при малих впливах ЛПД є квазілінійною ланкою, а при великих – нелінійною ланкою зі змінними розподіленями параметрами.

Нами запропоновано використання цього ЛПД в структурній схемі ВЗ (рис. 5).

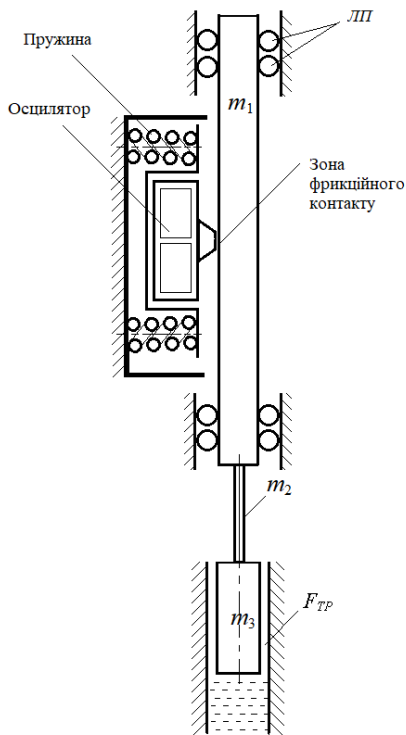


Рис. 5. Структурна схема ВЗ з одним осцилятором

Слід зазначити, що математичний опис поведінки цих ПЕ відсутній. В усіх роботах зазначається, що моделювання здійснюється для одновимірних моделей.

В [6] наведено конструкцію двигуна, де область Active (див. рис. 3, б) можна замінити на два ПР. Тому нами в подальшому було запропоновано замінити при побудові моделі ВЗ один загальний осцилятор на три. Лавриченко В. В. [7] була розроблена теорія фрикційного контакту, відповідно до якої було висунуто припущення, що коефіцієнт тертя k є величиною сталою і не залежною від напрямку прямивання, а також розглянуто чотири можливі стани фрикційного контакту: I – зона розгону тіла $T2$; II – зона гальмування; III – зона порушення фрикційного контакту; IV – зона гальмування. Усі чотири зони в сумі дорівнюють періоду коливань тіла $T1$.

Нами було прийняте припущення, що всі чотири зони мають рівний час. Тоді простий підрахунок доводить, що зона розгону

тіла $T2$ становить 90 від усього періоду коливань. На рис. 6 зображено, як здійснюється розподіл по зонах.

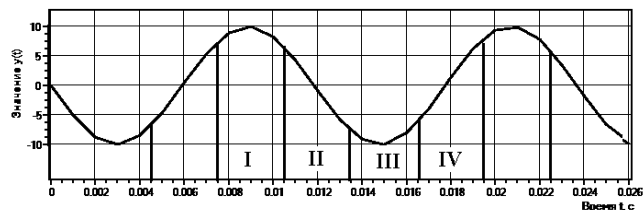


Рис. 6. Зони фрикційного контакту

Нами було розроблено блок та субмодуль фрикційного контакту (рис. 7).

При створенні субмодуля фрикційного контакту були задіяні базові блоки з бібліотеки SimInTech: керований синусоїдальний генератор; виділення максимуму з формуванням ознаки; імпульсна функція; RS-тригер. На рис. 8 наведено часові графіки роботи субмоделі фрикційного контакту (ФК).

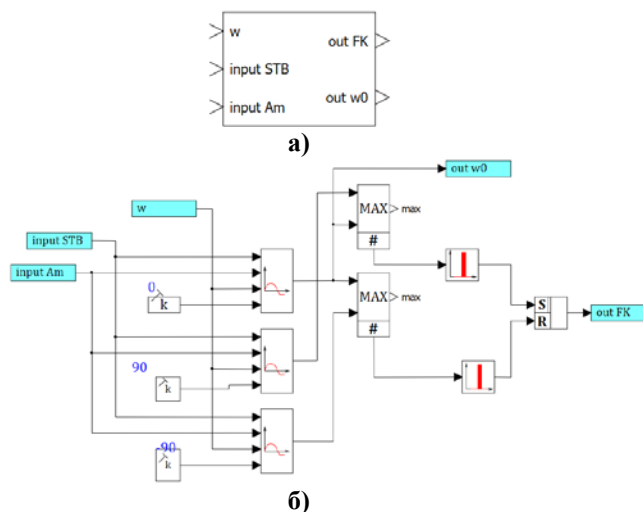


Рис. 7. Блок (а) та субмодель фрикційного контакту (б)

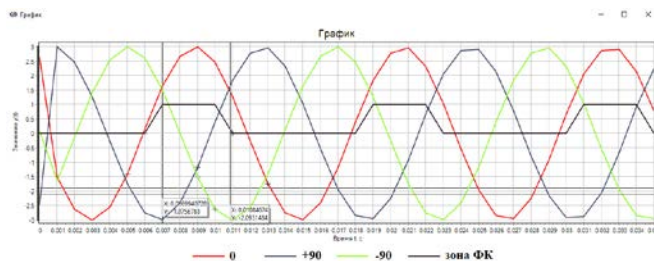


Рис. 8. Часові графіки роботи субмодуля фрикційного контакту

Однак фрикційний контакт можна реалізувати інішим шляхом. В такому випадку застосовано два типи блоків (рис. 9, а): більш або рівно; інтегратор.

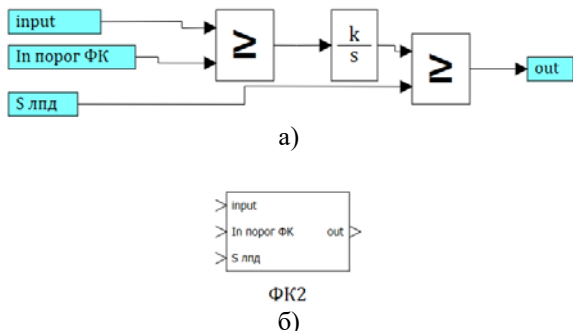


Рис. 9. Другий варіант субмодуля фрикційного контакту (а) та його зображення (б)

Робота блока полягає в наступному. На вхід першого блока порівняння подано два сигнали: S_0 пе на вхід Input субмодуля; константа на In поріг ФК, яка задає поріг порівняння і визначається експериментально. З виходу цього блока сигнал надходить на інтегратор, призначення якого – підрахунок імпульсів. Слід зазначити, що кожний імпульс у цьому випадку – це мінімальний крок ЛПД. Підрахунок інтегратором цих кроків дає відстань, на яку буде переміщено рухомий циліндр. У разі застосування ЛПД LPM-5 відстань, на яку можливо здійснити пересування рухомого циліндра, становить 0,02 м. Тому наступний за інтегратором блок порівняння видає сигнал, коли відстань пересування рухомого циліндра буде порівнянною з константою на вході S лпд, в цьому випадку 0,02 м.

Ідея застосування цього блока полягає в тому, що у випадку збільшення амплітуди сигналу S_0 пе буде збільшуватися час першої зони ФК. Внаслідок цього буде зменшуватися час для проходження рухомого циліндра на відстані 0,02 м.

Слід зазначити, що при частоті ударів, вищій 25 Гц, настає явище неперервного руху. Зазвичай для досягнення максимального ККД частота осцилятора наближається до резонансної [1]. Оскільки ЛПД працюють в безпосередній близькості від людини, то коливання повинні бути вищими 22 кГц. На практиці коливання осцилятора здійснюється на частотах від 50 кГц. Тому можна вважати, що ударні (крокові) коливання перетворюються на квазілінійні.

Тому для отримання середнього значення було застосовано третю модель ФК (рис. 10).

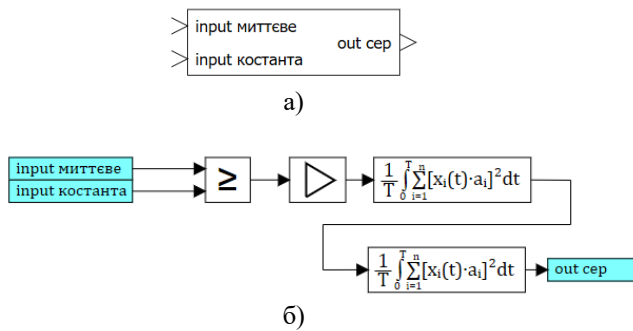


Рис. 10. Третій варіант ФК

Нами було проведено моделювання процесів у цьому субмодулі (рис. 11).

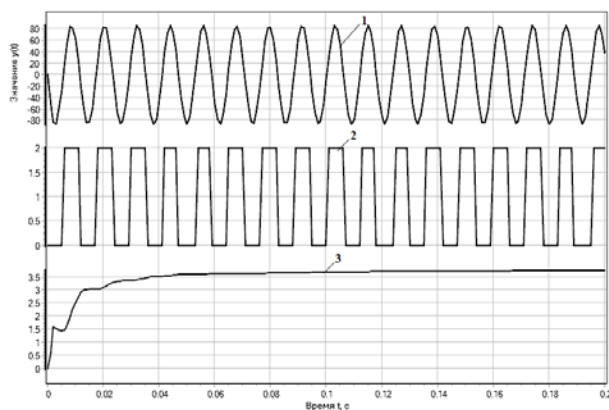


Рис. 11. Результати моделювання третього варіанта субмодуля ФК: 1 – вхідний сигнал; 2 – сигнал після підсилювача; 3 – вихідний сигнал

Аналіз результатів моделювання довів, що при миттєвому значенні амплітуди зусилля 80 Н (1) ЛПД розвиває середнє зусилля (4) 3,55 Н через 10 імпульсів. Тобто, на усталений режим двигун виходить через 12 мкс. На графіку зображений час t (с) – це машинний час виконання розрахунків.

Надалі для створення моделі ВЗ нами запропоновано замінити один ПР (рис. 3) на три ПР (рис. 12, а) з поперечною поляризацією, де PP_1 виконує функцію заклинювання, PP_2 пересуває рухомий циліндр зверху-вниз, а PP_3 – знизу-вверх. Рухома частина масою m_1 рухається в лінійних підшипниках, до неї приєднані штанга масою m_2 та рухомий циліндр m_3 . $\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3$ – переміщення вільних кінцівок PP_1, PP_2, PP_3 відповідно. Цю модель можна поділити на дві частини залежно від напрямку руху. На рис. 12, б зображено модель при русі вниз, а на рис. 12, в – при русі вгору.

Моделі на рис. 12, б і в можна звести до одновимірних механічних моделей.

Для обліку реальних властивостей ВЗ створено модель осцилятора із зосереджени-

ми параметрами, яка еквівалентна об'єкту з розподіленими параметрами за частотою власних коливань. Такі моделі складаються для триботехнічного вузла з наступним їхнім об'єднанням у спільну модель усєї системи.

Оскільки ЛПД в механічних моделях використовує один осцилятор (рис. 5), то умови рівноваги сил [8], прикладених до рухомої границі активної частини ПР, при русі вверх становлять:

$$F_y = F_E - F_d - F_{\text{дин}} - F_C - F_{\text{тяжіння}} - F_{\text{тертя}}. \quad (1)$$

При русі вниз:

$$F_y = F_E - F_d - F_{\text{дин}} - F_C + F_{\text{тяжіння}} - F_{\text{тертя}}, \quad (2)$$

де $F_y = K_{\text{П}} \Delta$ – зусилля пружної деформації ПР, Н; $F_E = d_{\text{П}} Y_{11} S_0 E$ – зусилля в ПР, викликане прикладеним електричним полем, Н; F_C – статичне зусилля, яке діє з боку ВО, Н; $F_d = K_d d \Delta / dt$ – зусилля, що демпфує, у ПР, Н; $F_{\text{дин}} = m_{\Sigma} d^2 \Delta / dt^2$ – динамічне зусилля в ПР, яке пропорційне швидкості зсуву поршня і викликаним при цьому процесам дисипації енергії в осциляторі, Н; $F_{\text{тяжіння}} = (m_1 + m_2 + m_3)g$ – сила тяжіння, Н; $K_{\text{П}} = Y_{11} S_0 / l_0$ – коефіцієнт пружності ПР, Н/м; K_d – коефіцієнт внутрішнього демпфування ПР, кг/с; $m_{\Sigma} = m_1 + m_2 + m_3$ – еквівалентна приведена сумарна маса рухомих частин, кг; Δ – деформація ПР, мм; l_0 – початкова довжина ПР, мм; σ – механічна напруга, Н/м²; Y – модуль Юнга, Н/м²; $d_{\text{П}}$ – п'єзомодуль, Кл/Н; E – напруга електричного поля, В/м; $C_0 = \varepsilon_0 \varepsilon_{33} (1 - ((d_{31})^2 Y_{11} / (\varepsilon_0 \varepsilon_{33}))^2) S_0 / l_0$ – ємність ПР, Ф; $K_{\text{П}} = K_y d_{\text{П}}$ – коефіцієнт прямого п'єзоэффекту, К/м; $U = E l_0$ – напруга, прикладена до електродів ПР, В; $V = d \Delta / dt$ – швидкість виконавчого органа, м/с; $K_{EM}^2 = d_{\text{П}}^2 Y / (\varepsilon_0 \chi)$ – коефіцієнт електромеханічного зв'язку; $K_3 = Y S_0 d_{\text{П}} / l_0 = K_y d_{\text{П}}$ – коефіцієнт зворотного п'єзоэффекту, Н/В. Відзначимо, що коефіцієнти зворотного і прямого п'єзоэффектів рівні між собою. $F_{\text{тертя}} = \eta \cdot S \cdot \Delta V / \Delta h$ – сила тертя, яка виникає в триботехнічному вузлі, Н; η – динамічна в'язкість, Па·с; S – площа рухомого циліндра, м²; $\Delta V / \Delta h$ – градієнт швидкості, с⁻¹.

На підставі рівнянь [8] було складено загальну структурну схему ВЗ (рис. 13, а), та субмодель у середовищі SimInTech (рис. 13, б) при $\eta = 10$ Па·с.

Для ПР із поперечною поляризацією, який застосовано в ЛПД LPM-5, основні параметри кераміки SP-4 [13] становлять: $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м, $\varepsilon_{33} = 1250$, $h = 8,9 \cdot 10^{-3}$ 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. При розмірах ПР $b = 10 \cdot 10^{-3}$ м, $l = 10 \cdot 10^{-3}$ м, $h = 5 \cdot 10^{-3}$ м, $m_3 = 0,027$ кг, $R_{\text{ем}} = 50$ Ом, $K_{\text{П}} = K_3 = 0,6$. Основні співвідношення коефіцієнтів, які входять до структурної схеми (рис. 13, б), мають такі значення: $R_{\text{ем}} \cdot K_{\text{П}} = 30$, $C_0 = 2,195 \text{E-}13$, Ф; $R_{\text{ем}} C_0 = 1,098 \text{E-}11$, с; $m_{\Sigma} = 0,0038$, кг; $f_p = 100$ кГц; $m_k = 0,015$ кг.

В [1, 2, 3, 5, 6, 10, 11] наведено дані, згідно з якими управління п'єзоелектричними двигунами здійснюється наступними методами: амплітудний, частотний, фазовий та широтно-імпульсна модуляція (ШІМ). Слід зазначити, що три перші методи почали застосовуватися з 80-х років минулого століття. Пристрої управління є дуже складними та громіздкими. Найбільш вживаним з них залишився амплітудний метод. Однак з початку 2000 років широкого застосування набула широтно-імпульсна модуляція завдяки поширенню контролерів, які працюють у жорсткому реальному часі, та спеціальним додатковим модулям. Це дозволило застосовувати як апаратну, так і програмну реалізацію ШІМ.

Крім того, слід зазначити, що схеми перетворювачів постійної напруги в змінну для живлення ЛПД на фіксованих частоті та амплітуді в 2-3 рази дешевші, ніж у випадку застосування амплітудного методу.

Тому нами було проведено доробок моделі на рис. 13, б шляхом вмикання схеми блока логічного ключа (#) в ланку між генератором коливань та входом субмоделі осцилятора (рис. 14).

На рис. 15 зображено результати моделювання для режимів роботи залежно від коефіцієнта заповнення імпульсу: 0,1 (а); 0,9 (б).

Це підтвердило, що чим менша кількість елементарних кроків ПР за одиницю часу, тим більше часу потрібно для пересування рухомого циліндра.

Аналіз отриманих результатів довів, що застосування ШІМ дуже ефективно змінює силу, швидкість та відстань, на яку пересувається рухома частина.

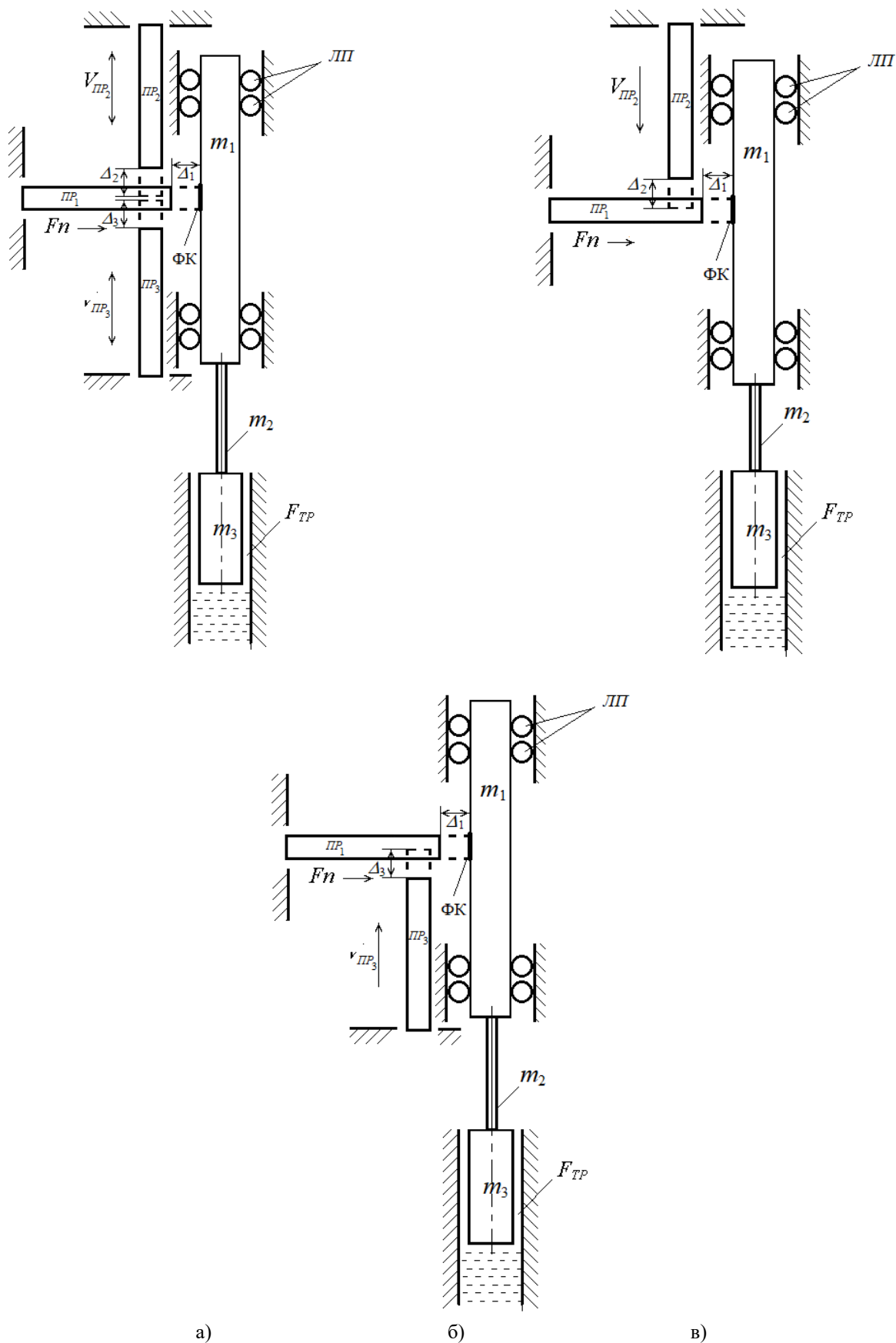


Рис. 12. Модель ВЗ: а – з трьома ПР; б – з двома ПР при русі вниз; в – з двома ПР при русі вверх

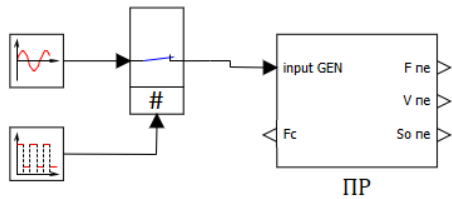
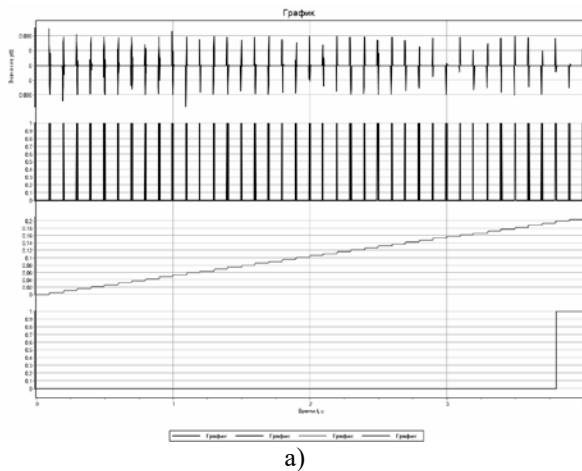
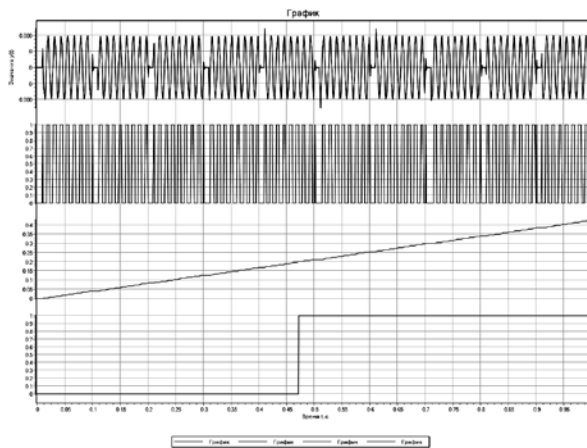


Рис. 14. Схема організації ШІМ



а)



б)

Рис. 15. Часові діаграми роботи моделі ВЗ при застосуванні для управління ЛПД ШІМ

Отримана модель дозволяє синтезувати методику проектування ВЗ на співвісних циліндрах з ЛПД комп'ютерної системи визначення реологічних характеристик з урахуванням фізико-хімічних властивостей палива, залежно від розмірів розпилювача форсунки, відповідальних вузлів ПА (V , F , Δh , S); попереднього вибору лінійних розмірів п'єзоелементів; побудови амплітудно-частотної характеристики; аналізу чутливості й уточнюючого розрахунку осцилятора з метою коректування їх характеристик часу.

1. Визначаються розміри рухомого циліндра ВЗ. Задаються значення радіуса рухо-

мого циліндра $R_{Ц}$ і знаходиться його довжина $l_{Ц} = S / (2 \cdot \pi \cdot R_{Ц})$.

2. Визначається маса рухомого циліндра та елементів, які з'єднують рухомий циліндр з ЛПД.

3. За максимальною швидкістю визначаються розміри осцилятора, попередньо задавши три розміри l , b та h .

4. Знаходиться частота резонансу осцилятора.

5. Попередньо розраховуються швидкості і зусилля, що розвиваються ЛПД для заданого діапазону зміни керуючої напруги.

6. Будується графік часу роботи ВЗ.

7. У випадку малої чутливості запроваджується уточнюючий розрахунок шляхом зміни розмірів і властивостей матеріалу осцилятора та конструкції рухомого циліндра.

На основі моделі ВЗ розроблено методику визначення реологічних характеристик і коефіцієнтів динамічної в'язкості за часом проходження рухомого циліндра ВЗ:

1. Визначаємо час проходження рухомого циліндра на холостому ході на фіксованих швидкостях, які співвідносяться з коефіцієнтом заповнення імпульсу ШІМ.

2. Задаємо момент навантаження ЛПД шляхом приєднання триботехнічного вузла з досліджуваною рідиною та визначаємо часові характеристики для усього діапазону швидкостей, які обрано в попередньому пункті.

3. Будуємо графік залежності часу проходження рухомого циліндра від швидкостей.

4. Змінюємо температуру та проводимо виміри часу для усього діапазону швидкостей.

5. Будуємо графік залежності часу від температури.

Висновки. Синтезовано кінематичну схему вимірювального зонда комп'ютерної системи визначення реологічних характеристик на співвісних циліндрах, які розташовані вертикально, та приводом на лінійному п'єзоелектричному двигуні.

Набула подальшого розвитку модель фрикційного контакту з ЛПД, що дозволило розробити модель вимірювального зонда для лабораторних вимірювань та реалізувати електронне моделювання пристроїв для їх ефективного проектування.

Вдосконалено методику проектування вимірювального зонда на співвісних циліндрах, до складу яких входять лінійний п'єзопривід і триботехнічний вузол із зазором $10 \div 25$ мкм, що дозволяє створити пристрій з

заданими конструктивними розмірами і чутливістю, які враховують особливості технологічного процесу в паливній апаратурі.

Вдосконалено методику побудови реологічних характеристик, які залежать від часу проходження рухомого циліндра, та визначено на їх основі коефіцієнти динамічної в'язкості судових технічних рідин.

Вірогідність отриманих результатів підтверджена при електронному моделюванні в SimInTech.

Практична цінність отриманих результатів полягає в можливості проектування вимірювальних зондів віскозиметрів і реометрів на співвісних циліндрах, процеси в яких подібні процесам у реальних триботехнічних вузлах паливної апаратури ДВЗ.

Список літератури

1. Давлеталиев Д. А. Исследование пьезодвигателей и разработка устройств адаптивного управления на их основе: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.05 / ЛПИ. Ленинград, 1985. 217 с.
2. Джагупов Р. Г., Ерофеев А. А. Пьезоэлектронные устройства вычислительной техники, систем контроля и управления: справочник. Санкт-Петербург: Политехника, 1994. 608 с.
3. Ерофеев А. А. Пьезоэлектронные устройства автоматики. Ленинград: Машиностроение, 1982. 212 с.
4. Разработка и исследование систем электропитания и устройств автоматики на базе пьезоэлектронных трансформаторов и пьезокерамических матриц / А. А. Ерофеев, А. А. Ушаков, В. С. Акопян и др. Научно-технический отчет по теме «Финиш – «РВО» (№ 801705). ЛПИ им. М. И. Калинина. Ленинград: ЛПИ, 1982. 430 с.
5. Коваленко В. А. Пьезоэлектрический двигатель вращения – как элемент автоматических систем: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.05. Москва, 1998. 173 с.
6. Лавриненко В. В., Карташев И. А., Вишнеvский В. С. Пьезоэлектрические двигатели. Москва: Энергия, 1980. 112 с.
7. Лавриненко В. В. Теория фрикционного контакта пьезоэлектрического двигателя. *Диэлектрики и полупроводники*: науч.-техн. сб. Вып. 28. Киев: КПИ, 1985. С. 26–33.
8. Никольский А. А. Точные двухканальные следящие электроприводы с пьезокомпенсаторами. Москва: Энергоатомиздат, 1988. 160 с.
9. Никольский В. В. Основы створення пристроїв п'єзоактивної механіки для систем керування двигунами внутрішнього згоряння: дис. ... д-ра техн. наук: 05.13.05. Одеса, 2005. 230 с.
10. Петренко С. Ф. Пьезоэлектрический двигатель в приборостроении. Киев: Корнийчук, 2002. 96 с.
11. Пьезодвигатели. Physik Instrumente. URL: <http://www.eurotek-general.ru/support/technical-information-about-the-products/Пьезоэлектрические%20двигатели/>
12. Хавин В. Л., Лавриненко И. С. Моделирование пьезоэлектрического привода для компенсации погрешностей прецизионной механической обработки биополимеров. *Високі технології в машинобудуванні*. Вип. 1 (23). Харків, 2013. С. 220–224.
13. Piezoelectric properties. URL: www.sparklceramics.com/piezoelectricproperties.html (дата звернення: 06.08.2018).
14. Никольский М. В. Бережной К. Ю. Пьезоэлектрический вискозиметр. *Наукові праці ЧДУ ім. Петра Могили. Серія: «Комп'ютерні технології»*. Вип. 275. Т. 287. Миколаїв, 2016. С. 60–63.

References

1. Davletalyev, D. A. (1985) Study of piezoelectric motors and development of adaptive control devices based on them: thesis for Ph.D.: 05.13.05 / LPI. Leningrad. 217 p. [in Russian].
2. Dzhahupov, R. H., Erofeev, A. A. (1994) Piezoelectronic devices of computer facilities, control and management systems. St.-Petersburg: Politekhnik, 608 p. [in Russian].
3. Erofeev, A. A. (1982) Piezoelectronic devices of automatics. Leningrad: Mashynostroeniye, 212 p. [in Russian].
4. Erofeev, A. A., Ushakov, A. A., Akopian, V. S. et al. (1982) Development and research of power supply systems and automation devices based on piezoelectric transformers and piezoceramic matrices. Scientific and technical report on the topic

- "Finish – RVO" (№ 801705). Leningrad: LPI, 430 p. [in Russian].
5. Kovalenko, V. A. (1998) Piezoelectric motor of rotation – as an element of automatic systems: thesis for Ph.D.: 05.13.05. Moscow, 173 p. [in Russian].
 6. Lavrinenko, V.V., Kartashev, I. A., Vishnevskiy, V. S. (1980) Piezoelectric motors. Moscow: Energiya, 112 p. [in Russian].
 7. Lavrinenko, V. V. (1985) Theory of frictional contact of a piezoelectric engine. *Dielectrics and semiconductors*. Kiev: KPI, № 28, pp. 26–33 [in Russian].
 8. Nikolskiy, A. A. (1988) Precise two-channel servo drives with piezocompensators. Moscow: Energoatomizdat, 160 p. [in Russian].
 9. Nykolskiy, V. V. (2005) Foundations of the creation of the structure of piezoactive mechanics for the systems of internal combustion engines control: thesis for D.Sc.: 05.13.05. Odesa, 230 p. [in Ukrainian].
 10. Petrenko, S. F. (2002) A piezoelectric motor in the instrument. Kiev: Korniiichuk, 96 p. [in Russian].
 11. Piezomotor's, Physik Instrumente. URL: <http://www.eurotek-general.ru/support/technical-information-about-the-products/Пьезоэлектрические%20двигатели/>
 12. Khavin, V. L., Lavrinenko, I. S. (2013) Simulation of a piezoelectric drive to compensate for errors in the precision machining of biopolymers. *Vysoki tehnolohiyi v machynobuduvanni*. Kharkiv, № 1 (23), pp. 220–224 [in Russian].
 13. Piezoelectric properties. URL: www.sparklceramics.com/piezoelectricproperties.html
 14. Nikolskiy, M. V. Bereznoi, K. Yu. (2016) Piezoelectric viscometer. *Naukovi pratsi ChDU im. Petra Mohyly. Seriya: "Compyuterni tehnolohiyi"*. Vol. 275, t. 287. Mykolayiv, pp. 60–63 [in Russian].

V. V. Nikolskiy , *Dr.Tech.Sc., professor,*
K. Yu. Bereznyi, *postgraduate student*
 National University "Odesa Maritime Academy"
 Didrikhson str., 8, Odesa, 65029, Ukraine

MODEL OF MEASURING PROBE OF COMPUTER SYSTEM FOR DETERMINING RHEOLOGICAL CHARACTERISTICS OF SHIP'S TECHNICAL LIQUIDS

Increase of requirements to emission of harmful substances into the environment by ship's low-speed diesel engines requires continuous improvement of fuel system efficiency. This requires a more advanced definition of not only the coefficients of viscosity, but also rheological characteristics.

The purpose of the article is to create a model of measuring probe of computer system for determining rheological characteristics of ship's technical liquids, to establish the relations of its components and their effect on measuring characteristics.

A kinematic scheme of measuring probe with two oscillators with transverse polarization is created. The developed model of measuring probe with one oscillator takes into account the processes in three main units of the probe: linear oscillator, friction contact and gear technical unit. Three variants of refinement of frictional contact model are proposed. The transition to a linear model with one oscillator is implemented. In order to control the linear piezoelectric motor, pulse-width modulation is chosen.

The model of measuring probe of computer system, which allows to develop methods of calculation and determination of coefficients of dynamic viscosity, rheological characteristics, is created.

Keywords: *computer system, linear piezoelectric motor, friction contact, SimInTech.*