

10.31653/smf343.2021.234-247

Нікольський В.В., Оженко Є.М., Нікольський М.В., Коваль М.А.,  
Євсєєв М.Д.

Національний Університет «Одеська морська академія»

## ОЦІНКА МОЖЛИВОСТЕЙ ВИКОРИСТАННЯ «ЦИФРОВОЇ РІДИНИ» В СУДНОВИХ ДИЗЕЛЯХ

Відомий виробник MAN-B&W наряду з іншими виробниками сучасних малооборотових двигунів (МОД) з електронним управлінням постійно проводить роботи по підвищенню їх працездатності виходячи з практики експлуатації та обслуговування. І якщо механічна система вже багато часу, як відпрацьована, то електро-гідравлічна система подачі палива постійно вдосконалюється. MAN-B&W є провідним виробником у Світі розвитку паливних систем безпосередньої дії з гідроприводом паливного насосу, до складу якої входить пропорційний клапан подачі гідравлічної рідини Fiva-valve (рис. 1) [1, 2, 3, 4].

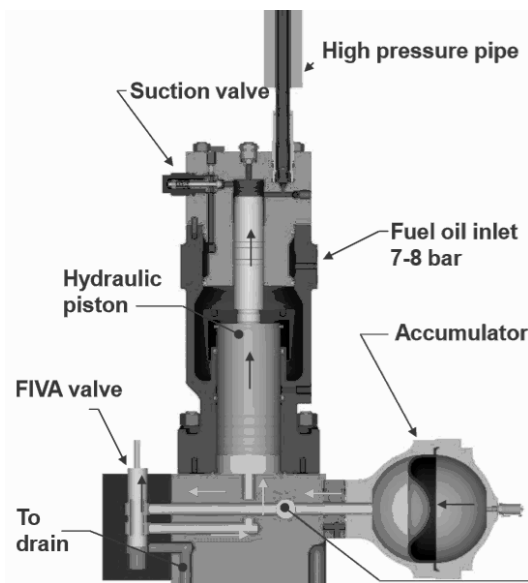


Рисунок 1 – Система управління пропорційним швидкодіючим клапаном

В роботі клапану спостерігаються процеси, які призводять до його неповного відкриття або зачинення [5].

Нами висунута гіпотеза – підвищення працездатності системи електронного управління подачею палива суднового МОД можливе за рахунок впровадження нового способу управління подачею гідравлічної рідини до паливного насосу високого тиску (ПНВТ) за рахунок заміни FIVA - Valve.

Тому роботи, які пов'язані з підвищенням працездатності електро-гідравлічної системи подачі палива, зокрема Fiva-valve, є актуальними як з наукової, так і з практичної точки зору.

Мета дослідження полягає в оцінці заміни Fiva-valve в МОД MAN-B&W серії E та можливості застосування в середньообертових (СОД) двигунах.

В роботах [6, 7, 8] був проведений аналіз переваг і недоліків сучасних систем подачі палива судових МОД, зокрема акумуляторної системи та системи безпосередньої дії. Фірма MAN-B&W постійно працює над підвищенням працездатності електро-гідравлічної системи управління ПНВТ з метою усунення недоліків [1, 2], які супроводжують їх експлуатацію.

В роботах [4, 5] були детально розглянуті результати моніторингу циліндрів, в роботі яких спостерігалися перебої, які приводили до зменшення потужності головного двигуна.

Нами були сформульовані основні вимоги до приводу FIVA – valve, які в подальших дослідженнях будуть задіяні при розбудові моделі роботи:

- можливість заклинювання при вимкненому стані;
- час відкриття менший ніж 5-10 мс;
- хід FIVA - valve – 10 мм;
- зусилля більше 120 МПа.

Слід зазначити, що в останні декілька років в дослідженнях, які направлені на заміну електромагнітних та електромеханічних приводів Fiva-valve, набирають поширення не тільки «цифрова рідина», але і п'єзоелектричний привод.

Так, в роботі [5] була запропонована модернізація FIVA-valve, яка полягала в заміні одного пропорційного клапана FIVA-valve з електромеханічним приводом на декілька клапанів з гідравлічним приводом. На рис. 2 наведена схема модернізованої системи подачі палива з двома цифровими клапанами (DFCU - Digital Flow Control Unit).

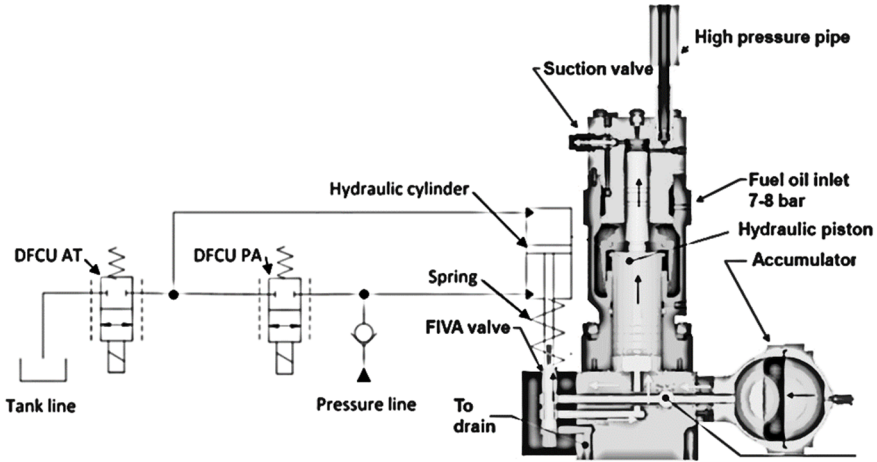
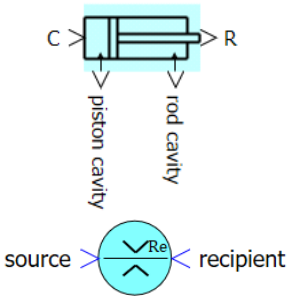


Рисунок 2 – Схема гідроприводу FIVA-valve з двома DFCU [5]

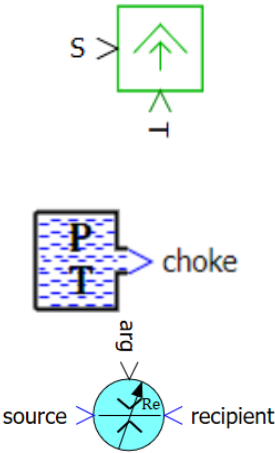
В середовищі імітаційного моделювання SimInTech від ТОВ «ЗС-Сервіс» було створено модель гідроприводу FIVA-valve з двома DFCU (рис. 3).

Для створення моделі були застосовані наступні блоки [12]:



- гідроциліндр двосторонньої дії з одностороннім висуванням;

- гідродросель постійного перетину; блок моделює рух рідини через дросель з постійною площею прохідного перерізу, який з'єднує дві порожнини (це можуть бути як абстрактні порожнини, так і порожнини гідромашин і гідроприсроїв). Порожнина, з якої відбувається витікання, вважається порожниною-джерелом. Порожнина, в яку надходить робоче середовище з дроселя, вважається порожниною-приймачем. Режим течії рідини (залежність витрати від числа Рейнольдса) враховується автоматично;

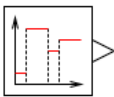


- ідеальне джерело сили поступального руху. У блоці реалізована модель ідеального джерела сили. Джерело ідеальне в тому сенсі, що передбачається, що його потужності завжди достатньо, щоб створити необхідну силу;

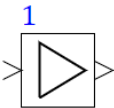
- тиск і температура рідини, Блок моделює джерело або приймач рідини з постійними в часі тиском і температурою;

- гідродросель з регулюванням за довільним параметром, блок моделює рух рідини через дросель з регульованою площею прохідного перерізу. Площа регулюється за довільним параметром, яким може виступати переміщення, час, тиск, температура і т.д. Дросель з'єднує дві порожнини. Порожнина, з якої відбувається закінчення, вважається порожниною-джерелом. Порожнина, у яку надходить робоче середовище з дроселя, вважається порожниною-приймачем.

Режим течії рідини (залежність витрати від Рейнольдса) враховується автоматично;



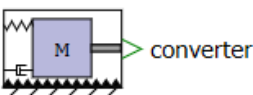
- кусково-постійна. Блок формує на виході довільний багатоступінчастий вихідний сигнал, який є суперпозицією східчастих впливів;



- підсилювач. Блок здійснює посилення вхідної величини на заданий коефіцієнт посилення;



- закладення поступального руху;



- механічний елемент поступального руху. 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 ненульове значення. Сила в'язкого тертя лінійно залежить від швидкості елемента. Сила сухого тертя розділена на силу тертя при страгуванні та силу тертя при русі, кожна з яких є постійною величиною.

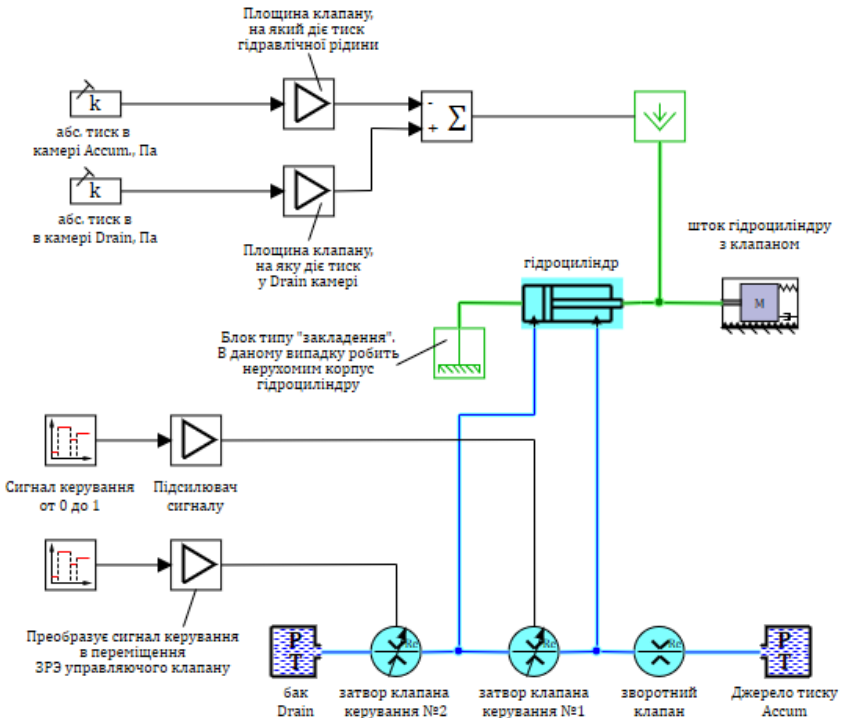


Рисунок 3 – Імітаційна модель гідроприводу FIVA-valve з двома DFCU [5]

На рис. 4 наведені результати проведеного імітаційного моделювання для інтервалів часу [0.005, 0.005, 0.005] мс, які свідчать, що хід переміщення клапану не відповідає вимогам – не вкладається в необ-

хідні 10 мм, що дозволило зробити висновок, що застосування таких систем управління подачею палива на середньо-обертових двигунах ускладнено.

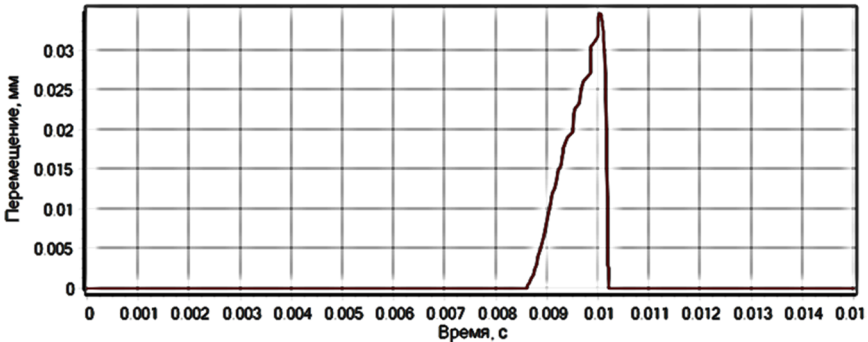


Рисунок 4 – Переміщення клапана FIVA-valve при часі надходження імпульсів керування, які кратні 5 мс [5]

Для того, щоб вирішити питання, яке пов'язане з часом спрацювання, для використання не тільки МОД, а й СОД нами було запропоновано використання «цифрової» рідини, що набула поширення, починаючи з 2010 року, та яка полягає в використанні елементарних клапанів з двома станами (вимкнено / ввімкнено). Завдяки принципу «мінімізації» [6, 7, 8] відбувається заміна одного клапану з великим прохідним отвором на декілька клапанів з малим отвором. Це приводить до зменшення загальних розмірів, обсягів і маси компонентів, що, в свою чергу, приводить до зменшення необхідної енергії управління. Причому компоненти стають швидшими за рахунок значного скорочення часу затримки та моменту інерції в порівнянні з одним великим клапаном. Площа ж потоку клапану може бути однаковою з використанням одного великого клапану або декількох менших клапанів.

**В роботі [5] приведено припущення, що «цифрова» рідина поряд з принципом «мінімізації» дозволить замінити Fiva-valve.**

Сучасна технологія «цифрових» клапанів складається з:

- технології вмикання / вимикання, яка стосується тільки одного клапану, основним недоліком якої є погана керованість через відсутність тонкого регулювання та наявність гідроударів [10, 7, 11].

- технології комутації одного клапану, управління якого відбувається з високою частотою за допомогою широтно-імпульсної модуляції (PWM) або імпульсно-частотної модуляції (PFM);

- технології паралельного з'єднання «цифрових» клапанів, яка заснована на використанні ряду клапанів різного або однакового розміру. Вихід паралельного з'єднання - це число дискретних значень.

В роботі [6] доведено, що для досягнення всіх можливих центральних положень пропорційного клапана необхідні чотири двонаправлених DFCU, а також доведено високі показники при заміні пропорційного клапану на два та чотири DFCUs цифрові пневматичні системи клапанів для трьох варіантів управління цими клапанами. Крім того, розглянуто методи управління «цифровими» клапанами.

В даний час є декілька компаній, які займаються розробкою та виробництвом «цифрових» клапанів для застосування в «цифровій» гідравліці. Основною проблемою «комерційних» клапанів залишається час відгуку. Наприклад серія Bucher Hydraulics WS22GD/OD [10], час відгуку клапану знаходиться в межах 5...15 мс; клапан Sturman Industries SI -1000 від виробника [6], час відгуку якого становить всього 0,45 мс.

Слід відмітити окремих клас – пневматичні клапани. Так клапани серії Bibus 850, які складаються з трьох різних варіантів клапанів: одно-, трьох- і дев'ятивипускних версій, названих відповідно до кількості виходів: 851, 853 і 859, час відгуку клапана становить кілька мілісекунд [6, 9].

**Окремо слід відмітити цифрові клапани з п'єзоелектричними приводом. Хоча ще у 80-90 роках минулого століття були розроблені конструкції клапанів з п'єзоелектричними перетворювачами [dh, ero], але в результаті інформаційного пошуку вдалося встановити, що на ринку присутні клапани від Thomas Publishing Company – електропневматичний I/P, E/P перетворювач Model T7800 [11].**

Слід зазначити, що традиційно заводом-виробником FIVA-valve випускається з електромеханічним приводом. Після аналізу досягнень в даному напрямку нами запропонована його заміна на декілька клапанів з гідравлічним приводом.

На рис. 5 зображено структурну схему електрогідравлічного приводу з використанням «цифрових» клапанів [13].

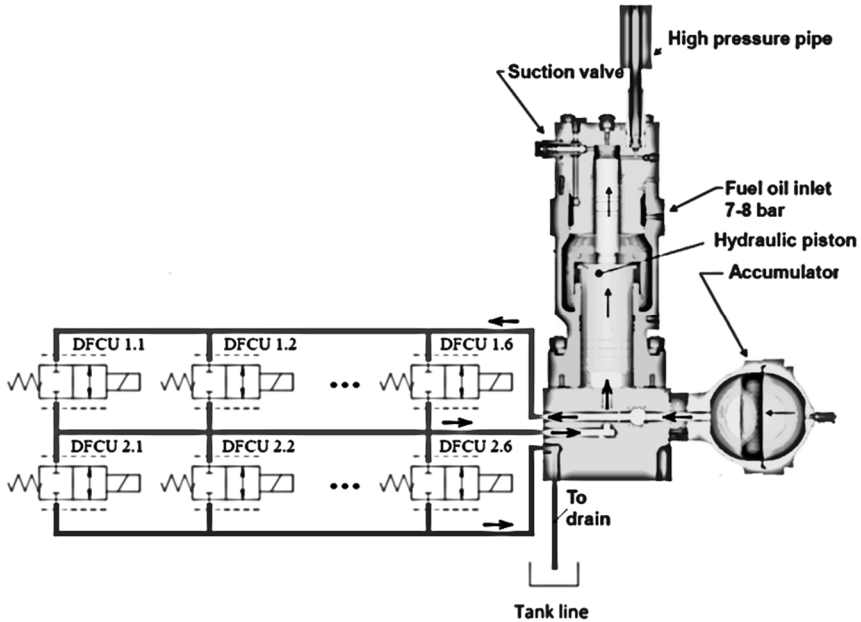


Рисунок 5 – Схема гідропроводу з «цифровими» клапанами

На рис. 5 зображено 6 DFCU (1.1-1.6), які відповідають за подачу гідролічної рідини від акумулятора, в якому вона знаходиться під великим тиском, до гідролічного поршня (Hydraulic piston). В наслідок такої дії гідролічний поршень починає рух. DFCU 1.1-1.6 повинні мати прохідний отвір  $1/6$  від загального діаметру магістралі, по якій відбувається подача гідролічної рідини. DFCU 2.1-2.6 необхідні для скидання тиску в гідролічному поршні. Після їх відкриття відбувається скидання гідролічної рідини у танк.

Для оцінки часу спрацювання було створено імітаційну модель ПНВТ з використанням «цифрових» клапанів в електронному програмному середовищі імітаційного моделювання SimInTech від ТОВ «ЗС-Сервіс», оскільки на нього діє офіційна безлімітна ліцензія (Організація: НУ «ОМА». Серійний номер: BFAAF64B757\_0804CAB2).

На рис. 6 наведено імітаційну модель гідропроводу ПНВТ безпосередньої дії з 12-тю DFCU, 6 з яких відповідають за подачу рідини від акумулятора до гідролічного поршня та 6 – для скидання тиску.



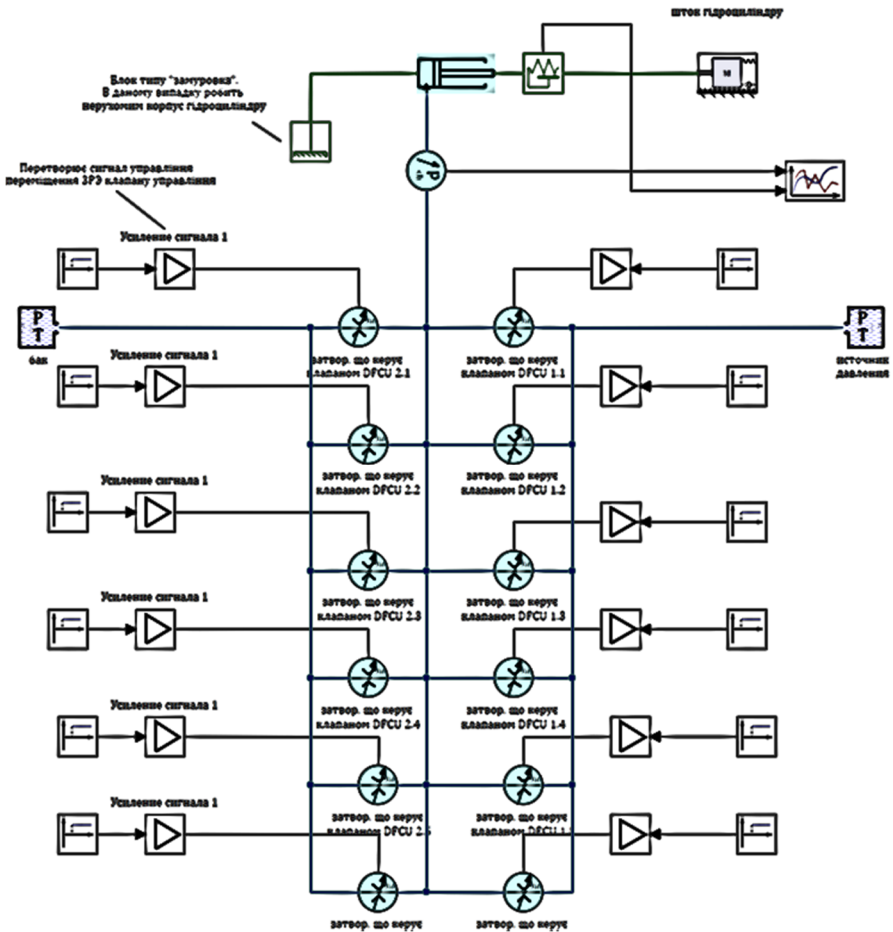
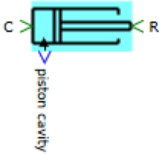
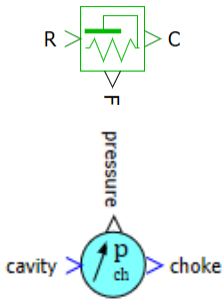


Рисунок 6 – Імітаційна модель ПНВТ із застосуванням «цифрових» клапанів

Для створення моделі на відміну від моделі, яку зображено на рис.3, були додатково застосовані ще три наступні блоки [12]:



- гідроциліндр односторонньої дії (базовий);



- ідеальний датчик сили. У блоці реалізована модель ідеального датчика сили (без урахування демпфування, запізнення, енерговитрат тощо);
- датчик абсолютного тиску рідини (лінія зв'язку з гідродинамічним елементом). Блок моделює датчик абсолютного тиску робочого середовища (рідини) у порожнині. Блок призначений для виведення сигналу абсолютного тиску робочого середовища (рідини) з лінії зв'язку порожнини та гідродинамічного елемента (дрозеля, каналу). Одиниця вимірювання тиску, що видається – Паскаль;

В таблицях 1 і 2 наведені властивості та параметри маси елемента поступового руху, що приєднується до штоку гідроциліндру.

Таблиця 1 – Властивості маси елемента поступового руху, що приєднується до штоку гідроциліндру

Назва	Значення
Еквівалентна жорсткість пружних елементів, Н/м	1000
Зусилля від позиційного навантаження (від дії пружних елементів) при нульовому переміщенні механічного елемента, Н	-50
Сила сухого тертя страгування, Н	15
Сила сухого тертя руху, Н	10
Початкове переміщення механічного елемента, м	0
Початкова швидкість механічного елемента, м/с	0
Мінімально можливе переміщення механічного елемента,	0
Маса механічного елемента, кг	0,2
Максимально можливе переміщення механічного елемента, м	0,01
Коефіцієнт в'язкого тертя, Н/(м/с)	500

Таблиця 2 – Параметри маси елемента поступового руху, що приєднується до штоку гідроциліндру

Назва	Значення
Переміщення механічного елемента, м	0,01
Швидкість переміщення механічного елемента, м/с	0
Прискорення механічного елемента, м/с <sup>2</sup>	0

В таблицях 3 і 4 наведені властивості та параметри маси елемента поступового руху, що приєднується до штоку гідроциліндру.

Таблиця 3 – Властивості гідроциліндру односторонньої дії

Назва	Значення
Температура робочого середовища в порожнинах, градуси Цельсія	20
Робоче середовище	вода за ДССРД Р-776-98
Площа поршня, на яку діє тиск у порожнині, м <sup>2</sup>	0,0019635
Початковий хід штока, м	0
Початковий абсолютний тиск робочого середовища в порожнині, Па	100000
Початкова швидкість штока, м/с	0
Модуль об'ємної пружності робочого середовища	адіабатний
Максимальний хід штока, м	0,3
Коефіцієнт демпфування упорів, Н/(м/с)	10000000
Контактна жорсткість упорів штока, Н/м	1E8
"Мертвий" об'єм порожнини, м <sup>3</sup>	2E-5

Таблиця 4 – Параметри гідроциліндру односторонньої дії

Назва	Значення
Переміщення штока щодо корпусу, м	0,010045415
Швидкість переміщення штока щодо корпусу, м/с	0
Абсолютний тиск робочого середовища в порожнині, МПа	0,1013232
Об'єм порожнини, м <sup>3</sup>	3,9724171E-5

Для DFCU 1.1-1.6 було обрано інтервали часу спрацьовування, які зображені на рис. 7. Час спрацьовування та час ввімкненого стану було обрано різними.

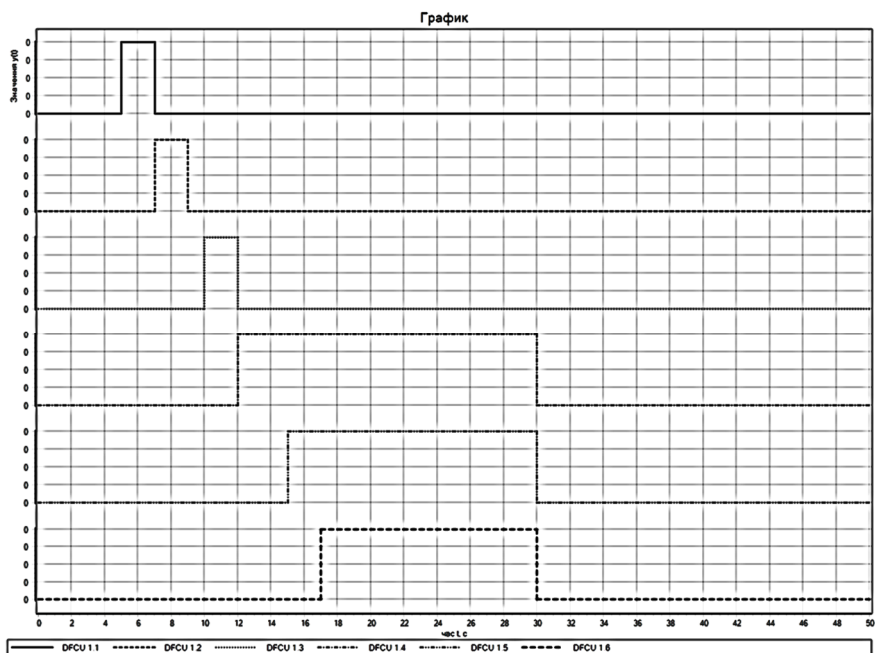


Рисунок 7 – Час вмикання «цифрових» клапанів

Результати моделювання наведено на рис. 8.

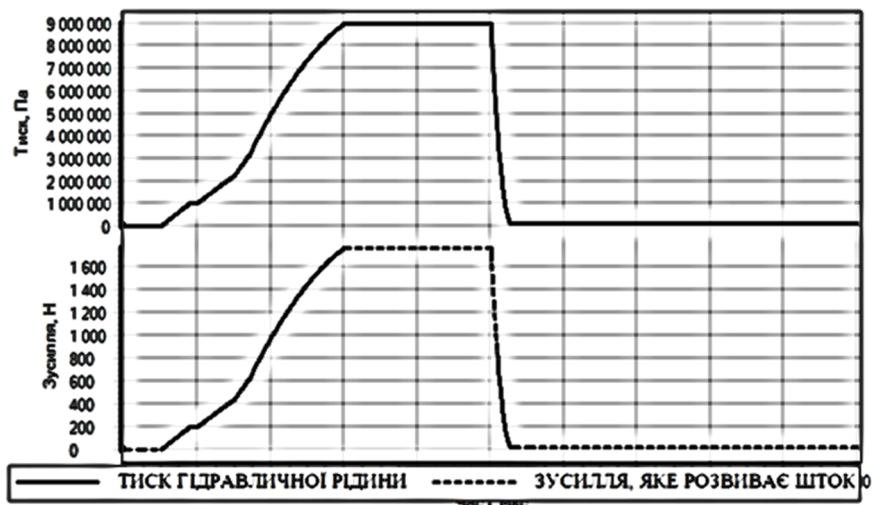


Рисунок 8 – Результати моделювання роботи гідроциліндру

Аналіз результатів довів, що час спрацьовування одного DFCU складає 1 мкс, як при вмиканні, так і вимиканні.

За результатами проведених досліджень можливо зробити наступні висновки.

- запропоновано використання нових засобів перемикання гідравлічної рідини до ПНВТ, яке може дати змогу позбавитися, як «брякиту» та й заклинювання FIVA – valve.

- з огляду на передові досягнення в галузі гідроавтоматики запропоновано використання «цифрових» клапанів.

- запропонована структурна схема управління гідравлічною рідиною, яка дозволила позбутися пропорційного клапану FIVA-valve з електромеханічним приводом.

- створено імітаційну модель системи подачі палива в малооборотний двигун безпосередньої дії в середовищі електронного моделювання SimInTech.

- проведене дослідження на моделі довело можливість використання запропонованої технології.

Тому можна зробити висновок, що застосування «цифрових» клапанів дозволяє відмовитися від пропорційного клапану FIVA-valve з електромагнітним приводом. Час спрацьовування укладається в необхідний час.

Таким чином, в дослідженні *вперше* запропоновано використання способу управління подачею гідравлічної рідини до ПНВТ за рахунок використання «цифрових» клапанів та *отримала подальший розвиток* імітаційна модель приводу «цифрового» клапану подачі гідравлічної рідини в ПНВТ суднового МОД типу MAN-B&W серії ME в середовищі електронного моделювання SimInTech, що дозволило дослідити, які процеси відбуваються з гідравлічною рідиною при управлінні паливним насосом високого тиску безпосередньої дії.

#### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. MAN ME Engine. Operating Manual. – Copenhagen, Denmark 2012. – 607 p.
2. MAN ME Training course. Training documentation. – Copenhagen, Denmark, 2014.
3. MAN B&W S60ME-C8.2-III Project Guide Electronically Controlled Twostroke Engines <https://marine.man-es.com/applications/projectguides/2stroke/content/printed/S60ME->

C8\_2.pdf.

4. Оженко Е. М. Моделі, методи та засоби покращення системи подачі палива суднового дизеля на базі п'єзоелектричних перетворювачів: дис. ... кан. техн. наук: 05.13.05. – Одеса, 2018. – 166 с.

5. Лук'янчук А.А. Підвищення надійності електронної системи подачі палива суднового малообертового дизеля: маг. робота. – Одеса, 2020. – 90 с.

6. 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://dspace.cc.tut.fi/dpub/bitstream/handle/123456789/22251/peurala.pdf;sequence=1>.

7. Heikkilä, M., Aalto University. Digital hydraulics review, Wärtsilä Corporation, 7.10.2010.

8. Johnson et al. 2001 Sturman Digital Latching valve, 7th Scandinavian International Conference on Fluid Power, Linköping, Sweden. [Internet]. Available from:

9. Bibus Solenoid valves 850 series. Matrix Technical Information. [Internet]. Available from: [http://www.bibus.co.uk/fileadmin/editors/countries/bibuk/product\\_data/matrix/documents/matrix\\_technical\\_information\\_en.pdf](http://www.bibus.co.uk/fileadmin/editors/countries/bibuk/product_data/matrix/documents/matrix_technical_information_en.pdf). Cited 7.10.2013.

10. Bucher Hydraulics Series WS22GD/OD, 2/2 Cartridge Seat Valve, Size 5. [Internet]. Available from: <http://www.bucherhydraulics.com/31577/Mobile-and-Industrialhydraulics/Products/Valves/Directional-seat-valves/Cartridge-valves/index.aspx>.

11. Електро- пневматичний I/P, E/P перетворювач Model T7800 [Internet]. Available from: [http://www.mvif.ru/assets/files/Converters/T7800/Model\\_T7800.pdf](http://www.mvif.ru/assets/files/Converters/T7800/Model_T7800.pdf).

12. Справочная система SimInTech. URL: [https://help.simintech.ru/#o\\_simintech/o\\_simintech.html](https://help.simintech.ru/#o_simintech/o_simintech.html).

13. Коваль М.О. Підвищення працездатності системи електронного управління подачею палива суднового малообертового дизеля: маг. робота. – Одеса, 2021. – 92 с.