

ISSN 2313-4763

Міністерство освіти і науки України

Херсонська державна морська академія

НАУКОВИЙ ВІСНИК
ХЕРСОНСЬКОЇ ДЕРЖАВНОЇ МОРСЬКОЇ АКАДЕМІЇ

Науковий журнал

Виходить двічі на рік

№ 1 (20)

Херсон
2019

Науковий вісник Херсонської державної морської академії : науковий журнал. Херсон : Херсонська державна морська академія, 2019. № 1 (20). 176 с.

Засновник і видавець – Херсонська державна морська академія

Рекомендовано до друку на засіданні Вченої ради Херсонської державної морської академії (протокол № 12 від 25.06.2019 р.)

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ:

Букетов А. В., д.т.н., Херсонська державна морська академія, Україна, головний редактор.

Тематична спрямованість – Транспортні технології:

Гнатів А. В., д.т.н., Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Україна, відповідальний редактор рубрики;

Аргун Щ. В., к.т.н., Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Україна, член редколегії;

Ляшук О. Л., д.т.н., Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна, член редколегії;

Patlins Antons, Doctor of Engineering Science, Riga Technical University, Латвія, член редколегії;

Шарко В. О., д.т.н., Херсонська державна морська академія, Україна, член редколегії.

Тематична спрямованість – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології:

Рожков С. О., д.т.н., Херсонська державна морська академія, Україна, відповідальний редактор рубрики;

Жук Д. О., к.т.н., Національний університет кораблебудування ім. адмірала Макарова, Україна, член редколегії;

Zhiravetska Anastasia, Dr. Sc. Ing., Professor, Riga Technical University, Латвія, член редколегії;

Полівода О. В., к.т.н., Херсонський національний технічний університет, Україна, член редколегії;

Степенко С. М., к.т.н., Чернігівський національний технічний університет, Україна, член редколегії;

Хлопенко М. Я., д.т.н., Херсонська державна морська академія, Україна, член редколегії.

Тематична спрямованість – Матеріалознавство:

Сапронов О. О., к.т.н., Херсонська державна морська академія, Україна, відповідальний редактор рубрики;

Акімов О. В., к.т.н., Херсонська державна морська академія, Україна, член редколегії;

Брайло М. В., к.т.н., Херсонська державна морська академія, Україна, член редколегії;

Dulebová Eudmila, PhD., assoc. Prof., Technical University of Kosice, Словаччина, член редколегії;

Сизоненко О. М., д.т.н., Інститут імпульсних процесів і технологій НАН України, Україна, член редколегії;

Стухляк П. Д., д.т.н., Тернопільський національний технічний університет ім. Івана Пулюя, Україна, член редколегії;

Фесенко І. П., д.т.н., Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М.Бакуля НАН України, Україна, член редколегії.

Адреса редакційної колегії: 73000, м. Херсон, просп. Ушакова, 20, тел. (0552) 22-35-69

Свідоцтво про державну реєстрацію друкованого засобу масової інформації КВ № 18987-7776ПР від 11.05.2012 р.

Журнал внесено до Переліку наукових фахових видань України (постанова президії ВАК України № 1-05/3 від 30.03.2011 р., Наказ МОН України № 374 від 13.03.2017 р.)

Журнал індексується українською загальнодержавною реферативною базою даних «Україніка наукова», міжнародною наукометричною базою «Наукова електронна бібліотека E-Library.Ru» (Російського індексу наукового цитування – РИНЦ), міжнародною реферативною базою даних **Google Scholar**, міжнародною наукометричною базою **Researchbib**, представлений у **Науковій електронній бібліотеці Національної бібліотеки України імені В.І. Вернадського**, міжнародній реферативній базі даних **Crossref**.

ISSN 2313-4763

© Науковий вісник Херсонської державної морської академії, 2019

МОРСЬКИЙ ТА РІЧКОВИЙ ТРАНСПОРТ

ИЗМЕНЕНИЕ РАБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМЫ ИНЕРТИЗАЦИИ ТАНКЕРА ЗА СЧЕТ ПРИНУДИТЕЛЬНОЙ ПОДАЧИ ГАЗОВ

Бражник И. Д., аспирант Национального университета «Одесская морская академия», e-mail: ig.brazhnik@gmail.com, ORCID: 0000-0001-9961-9759

В статье рассмотрена проблема повышения качества процесса заполнения инертными газами грузовых помещений танкеров во время смены типа груза. Целью исследований является повышение качества работы системы инертных газов на танкерах за счет использования новой технологии принудительной подачи инертных газов в грузовое пространство трюма. На основании анализа недостатков работы современных технологических схем установлено, что рабочий процесс не может гарантировать высокое качество процесса вентиляции грузовых помещений танкера. Результаты моделирования показали, что наибольшее сокращение времени процесса можно получить за счет принудительной подачи инертных газов. Проведен анализ влияния на такой процесс характеристик рабочих струй и проведено исследование работы трех технологических схем расположения сопловых насадок на поверхности грузового помещения. Установлено, что существенное сокращение времени рабочего процесса возможно получить за счет комбинированного использования четырех периферийных и одного центрального сопла для ввода инертных газов.

***Ключевые слова:** танкер, система инертных газов, концентрация кислорода, сопловая насадка, угол факела, скорость процесса.*

DOI: 10.33815/2313-4763.2019.1.20.004-011

Постановка проблемы. Эффективность эксплуатации танкеров, помимо транспортных операций, определяется технологиями, которые используются во время подготовки судна к приему нового груза. В используемой в настоящее время технологии управления и контроля процессом инертизации грузовых танков на танкерах существует ряд недостатков. Одними из главных недостатков являются: большая продолжительность процесса; отсутствие технических способов интенсификации процесса вытеснения воздуха; несоответствие замеров концентрации воздуха на выходе реальным значениям внутри трюма [1]. Совокупность этих недостатков не может гарантировать высокое качество процесса вентиляции грузовых помещений танкера. По этой причине в большинстве случаев установленные международными нормами требования к концентрации кислорода в трюме не соблюдаются и на судах существует высокая вероятность взрывов или пожаров. Сокращение времени процесса вентиляции является востребованным с экономической точки зрения, поскольку для танкеров с дедвейтом более 50000 тонн сокращение времени со стандартных 30 часов до 15 часов может дать годовую экономию топлива в объеме от 90 до 100 тысяч долларов США.

Модернизация системы инертных танкеров предполагает проведение исследовательских работ по двум направлениям – конструктивному изменению технологии обработки тяжелого топлива в системе генерирования ИГ и применению технологии принудительной вентиляции трюмов судна.

Анализ последних исследований и публикаций. Основные принципы работы системы инертных газов на танкерах базируются на сжигании дизельного топлива в генераторе инертных газов. Он является отдельным устройством, которое никак не связано с судовым контуром подготовки топлива. Получаемые при функционировании генератора инертны газы продукты сгорания после проведения ряда операций по их очистке и снижению температуры направляются в грузовые трюма танкера.

В соответствии с Требованиями MORPOL [2] технические параметры, которые должны обеспечивать систему подачи инертных газов в грузовые трюмы танкера определяются следующими значениями: концентрация кислорода в трюме – менее 8 %; температура газов – менее 65 °С при подаче в грузовые трюмы и менее 50 °С при подаче в сухогрузные трюмы; давление газов на входе в трюм не менее 0,11 МПа.

Восходящее вынужденное движение воздуха с его последующим вытеснением из трюма танкера всегда вызывается действием выталкивающей силы от подаваемых в нижнюю часть трюма инертных газов. Эта сила появляется из-за изменения плотности многофазной смеси внутри трюма, а также является следствием взаимосвязанных между собой процессов теплопереноса и передачи массы из-за различных концентраций инертных газов и воздуха. Температурная стратификация движущегося многофазного потока в смеси с воздухом по высоте трюма также является одним из факторов, влияющих на скорость вытеснения воздуха из трюма судна [3]. При изменении температуры от 20 до 80 °C плотность воздуха изменяется на 20 % от 1,2 до 0,99 кг/м³ [4]. Именно она реализует механизм передачи энергии от инертных газов к воздуху.

При определении плотности инертных газов принято учитывать их четыре основных компонента – CO₂, H₂O, NO₂, O₂ [20]. Согласно данным работ [4-6] влияние температуры на плотность инертных газов можно учитывать как произведение, их плотности при нормальных условиях на температурную поправку по выражению:

$$\rho_{\text{д.г.}} = \frac{G_{\text{д.г.}}}{V_{\text{д.г.}}} \times \frac{273}{273+T} = \frac{1+\alpha L_0}{22.4(m_{\text{CO}_2}+m_{\text{H}_2\text{O}}+m_{\text{NO}_2}+m_{\text{O}_2})} \times \frac{273}{273+T} = \frac{1+\alpha\left(\frac{Q_m}{0.21}\right)}{22.4(m_{\text{CO}_2}+m_{\text{H}_2\text{O}}+m_{\text{NO}_2}+m_{\text{O}_2})} \times \frac{273}{273+T} \quad (1)$$

где $\rho_{\text{д.г.}}$ – плотность дымовых газов, кг/м³; $G_{\text{д.г.}}$ – общее количество дымовых газов, образующихся при сжигании 1 кг топлива, кг/кг; $V_{\text{д.г.}}$ – объем дымовых газов, м³; T – температура, °C; α – коэффициент избытка воздуха; L_0 – теоретическое количество воздуха, необходимое для сгорания 1 кг топлива, кг/кг; Q_m – теоретическое количество кислорода, необходимое для сгорания 1 кг топлива, кг/кг; m_i – мольное содержание i -той компоненты инертных газов (рассчитывается по эмпирическим формулам [4]), м³.

В работах [7, 8] показано, что в случае вынужденной конвекции поле течения в замкнутом объеме перестает зависеть от механизмов теплопередачи и текущего поля температур. Этот факт напрямую указывает на целесообразность использования принудительной подачи инертных газов в грузовые трюмы танкеров. Основная направленность исследований механизма использования подачи струй инертных газов в грузовой трюм судна должна быть предназначена для решения задачи о сокращении времени вентиляции грузового трюма танкера.

Формулировка цели, задачи, объекта, предмета и методов исследования. Целью исследований является повышение качества работы системы инертных газов на танкерах за счет использования новой технологии принудительной подачи инертных газов в грузовое пространство трюма.

Основной задачей исследований является установление степени влияния параметров газового потока на входе в трюм на характер изменения концентрации воздуха внутри всего рабочего объема. Конечным результатом решения такой научно-исследовательской задачи должно быть сокращение времени вентиляции.

Объектом исследования является процесс инертнизации грузового трюма танкера, а предметом исследования является судовая система генерирования инертных газов.

Методами исследований являются: теория статистики при обработке результатов экспериментальных измерений величины концентрации кислорода внутри рабочего пространства грузового трюма, конечно-разностный метод для численного моделирования процессов естественной и принудительной вентиляции трюма, численные методы аппроксимации при построении графических зависимостей концентрации кислорода от рабочих показателей процесса подачи инертных газов в грузовые помещения трюмов танкера.

Основные результаты. При вентиляции трюма принудительная подача инертных газов должна быть согласованной со структурой движущегося с невысокими скоростями потока воздуха внутри ограничивающих его жестких стенок грузового трюма. Основное

изменение динамические характеристики многофазного потока газов и воздуха будут претерпевать в угловых зонах [9]. По этой причине очень важной является подача струй инертных газов именно в ядро восходящего воздушного потока. В этом случае крупномасштабные турбулентные вихри в середине грузового трюма будут приводить к сокращению времени процесса его вентиляции.

Очень важным вопросом является количество источников струй на дне грузового трюма и угол раскрытия α их факела. Меньшие углы раскрытия будут приводить к удлинению струи инертных газов, а значит увеличивать зону турбулизации ядра потока воздуха по высоте трюма. Большие углы будут влиять на интенсификацию процесса тепло- и массопереноса в угловых зонах нижней части грузового танка [10].

На стадии экспериментального изучения процесса принудительной вентиляции грузового танка при помощи инертных газов были использованы три технологические схемы. Они показаны на рис. 1.

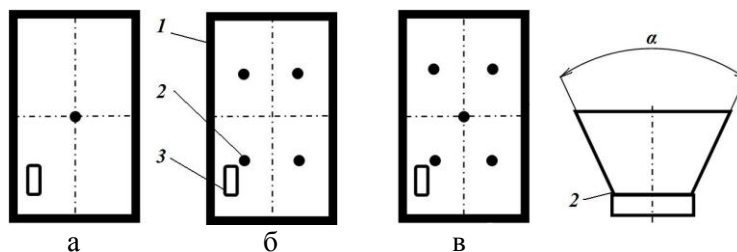


Рисунок 1 – Схемы подачи струй ИГ в грузовой трюм:

а – первая схема; б – вторая схема; в – третья схема; 1 – грузовой трюм; 2 – сопло подачи газов; 3 – выходное люковое отверстие

Первая схема содержала только один источник струи. Он находился в центральной точке грузового трюма. В ходе экспериментов использовались три сопла с углами раскрытия конуса факела вытекающей струи α соответственно равными 160° , 90° и 30° .

Вторая схема содержала четыре источника струй ИГ, которые на дне трюма располагались крестообразно. Сопла устанавливались по диагонали в центрах четырех одинаковых прямоугольных зон дна трюма. Их угол раскрытия для создания конусного факела струи составлял 30° . Этот угол использовался для исключения взаимного влияния струй инертных газов при их истечении в воздушное пространство.

Третья схема была комбинированная. Она показала самые лучшие результаты. Количество источников струй равнялось пяти. В начале процесса подачи инертных газов использовались четыре источника, расположенных по краям (см. рис. 1–в). В них, по аналогии со второй схемой, использовались сопла, создающие угол раскрытия конуса факела струи 30° . При снижении исходного значения концентрации кислорода в воздухе на тридцать процентов подача инертных газов происходила только из центрального источника струи. В нем также использовалось сопло, создающее угол раскрытия конуса факела струи равный величине 30° . С началом работы центрального сопла все краевые источники подачи струй инертных газов отключались.

Для всех трех схем подачи инертных газов в грузовой трюм была получена зависимость изменения во времени концентрации кислорода в ходе процесса вентиляции. Измерения проводились одновременно на различных высотах в шести грузовых трюмах. Результаты сравнения со стандартной технологией показаны на рис. 2. Поскольку при проведении экспериментов главным вопросом являлся выбор наиболее результативной схемы подачи инертных газов, то длительность работы газоанализатора была ограничена периодом в 5 часов. Приведенная на графиках величина концентрации кислорода определялась как средняя величина для всех четырех измерительных створов (центрального, на выходе и двух промежуточных).

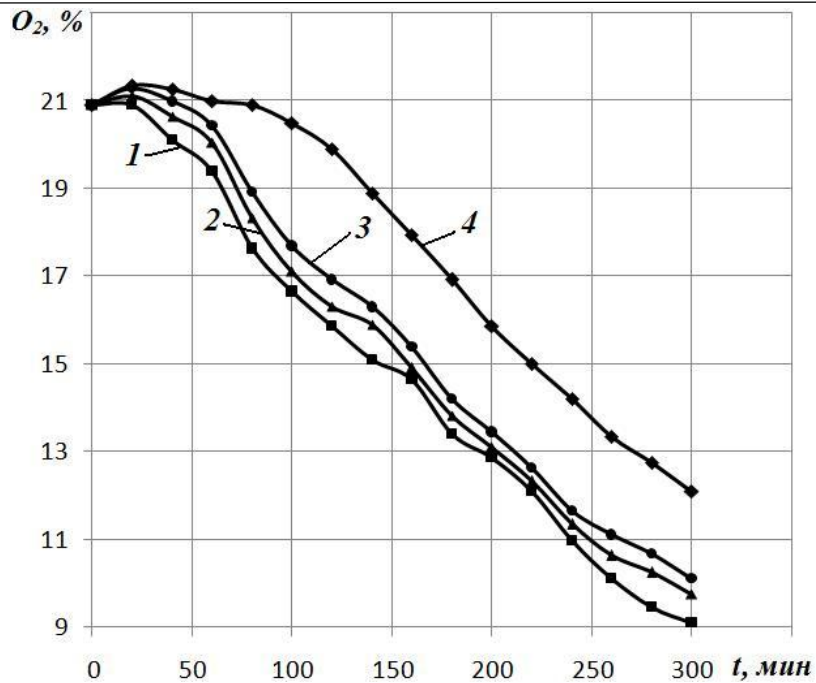


Рисунок 2 – Швидкість зміни концентрації кисню в трюмі при використанні трьох технологій подачі інертних газів:

1 – перша технологічна схема; 2 – друга технологічна схема; 3 – третя технологічна схема; 4 – стандартна подача інертних газів

Як видно на графіках, якісний характер процесу зменшення концентрації кисню всередині трюма у всіх чотирьох випадках залишався практично ідентичним. Це вказує на те, що вплив кута розкриття факела струї інертних газів на характер витіснення повітря з трюма не є основним і що на процес впливає ступінь щільної стратифікації багатовимірного потоку газів і повітря всередині робочого простору вантажного трюма.

На рис. 2 також видно, що якість роботи другої технологічної схеми подачі інертних газів порівняно з першою схемою краще, але найбільше скорочення часу вентиляції вантажного трюма було досягнуто з використанням третьої технологічної схеми. Порівняно з використанням традиційної подачі інертних газів зміни в кращу сторону при інших рівних умовах привели до додаткового зменшення концентрації кисню за той же самий період вентиляції трюма.

Порівняння результатів вимірювань, описуваних весь процес зміни концентрації кисню в вантажному трюмі танкера з використанням примусової і стандартної технології подачі інертних газів, показано на рис. 3. На цьому ж рисунку наведено дані теоретичних розрахунків (сплошна лінія) процесу вентиляції трюма. Приведені на графіку значення концентрації кисню відповідають точці виходу повітря з вантажного трюма в атмосферу. Експериментальні дані, показані на рис. 3, були отримані одночасно, коли два повністю ідентичних вантажних трюма заповнювали інертними газами. Подача газів відбувалася за стандартної технологічної схеми і з використанням розробленої комбінованої схеми (третья технологічна схема на рис. 1).

Аналіз наведених результатів показує, що використання примусової подачі призвело до кількісного, але не якісного розходження в змінах за часом концентрації кисню всередині трюма. Отримане розходження між двома експериментальними кривими вказує на досягнення головної мети досліджень.

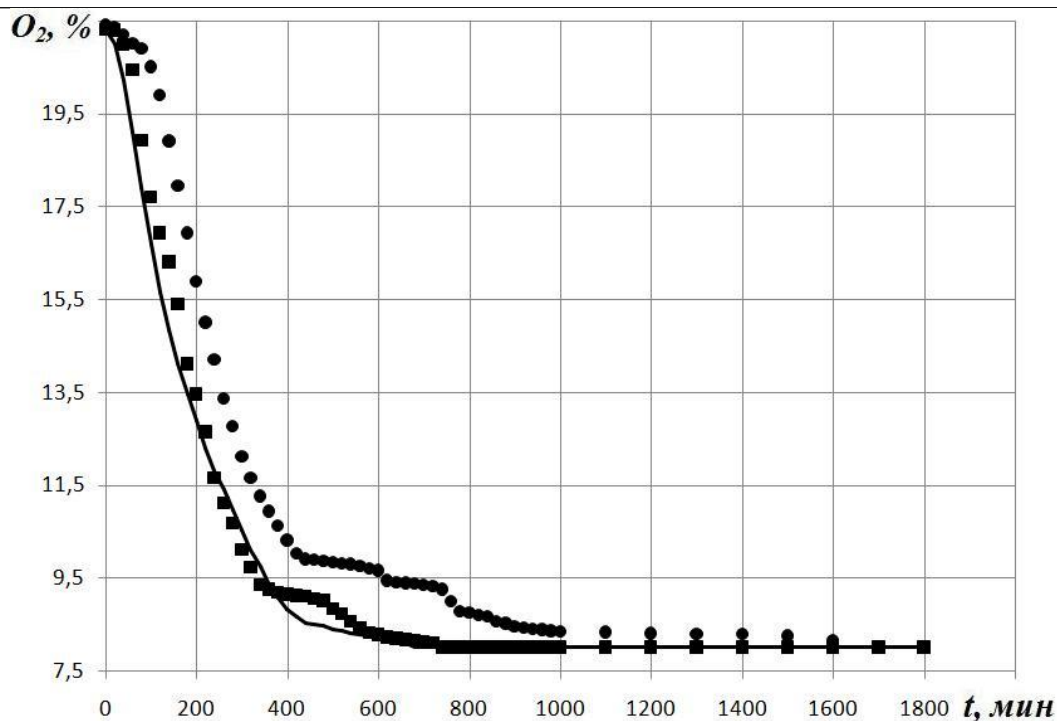


Рисунок 3 – Изменение во времени концентрации кислорода при вентиляции инертными газами грузовых трюмов танкера:

● – стандартная подача; ■ – принудительная подача; сплошная линия – расчет

Использование процесса принудительной подачи инертных газов внутрь трюма приводит к получению самого главного и основного результата – сокращению времени, затрачиваемого на вентиляционную обработку трюмов танкера перед получением нового груза. На графике видно, что в начале процесса вентиляции изменение концентрации кислорода происходит одинаково вне зависимости от способа подачи ИГ. Существенное расхождение между кривыми начинается через 80 минут после начала процесса вентиляции трюма. В зависимости от способа вентиляции трюма получаемая конечная концентрация кислорода внутри его рабочего пространства отличается и ее значение в случае принудительной вентиляции становится меньше, чем при естественной. На рис. 3 видно, что выход на стационарное значение концентрации кислорода равное 8 %, при принудительной подаче инертных газов наблюдается приблизительно через 740 минут после начала процесса вентиляции трюма. Аналогичная величина концентрации в ходе естественной вентиляции трюма за этот период времени была больше и составляла 9,25 %. Ее выход на стационарное значение наблюдался приблизительно через 1700 минут после начала процесса вентиляции трюма.

В процентном соотношении улучшение процесса вентиляции трюма при переходе от естественной к принудительной вентиляции трюма составило 13,5 %. Сокращение затраченного времени при прочих равных условиях составило 56,47 %.

В ходе вытеснения воздуха при помощи инертных газов температура внутри грузового трюма танкера постоянно растет. Процесс ее изменения во времени по высоте танка был изучен и полученные результаты ее измерения показаны на рисунке 4. Приведенные четыре кривые соответствуют четырем измерительным створам располагавшимся на соответствующих высотах грузового танка: 0, 25 %, 50 %, 100 %.

По аналогии с процессом изменения концентрации кислорода внутри рабочего объема трюма также наблюдается стабилизация температуры воздуха и инертных газов. Как видно на рис. 4, начиная с момента времени равного 960 минутам, температура на всех измерительных уровнях перестает изменяться и принимает свое стационарное значение.

При сравнении результатов измерений температуры на выходе из трюма при стандартной и принудительной вентиляции было установлено, что стабилизация в

последнем случае также наступает ранее. Температурный градиент, составляющий $-17\text{ }^{\circ}\text{C}$, достигался за время меньшее на 38,18 % по сравнению со стандартной операцией вентиляции грузового трюма танкера.

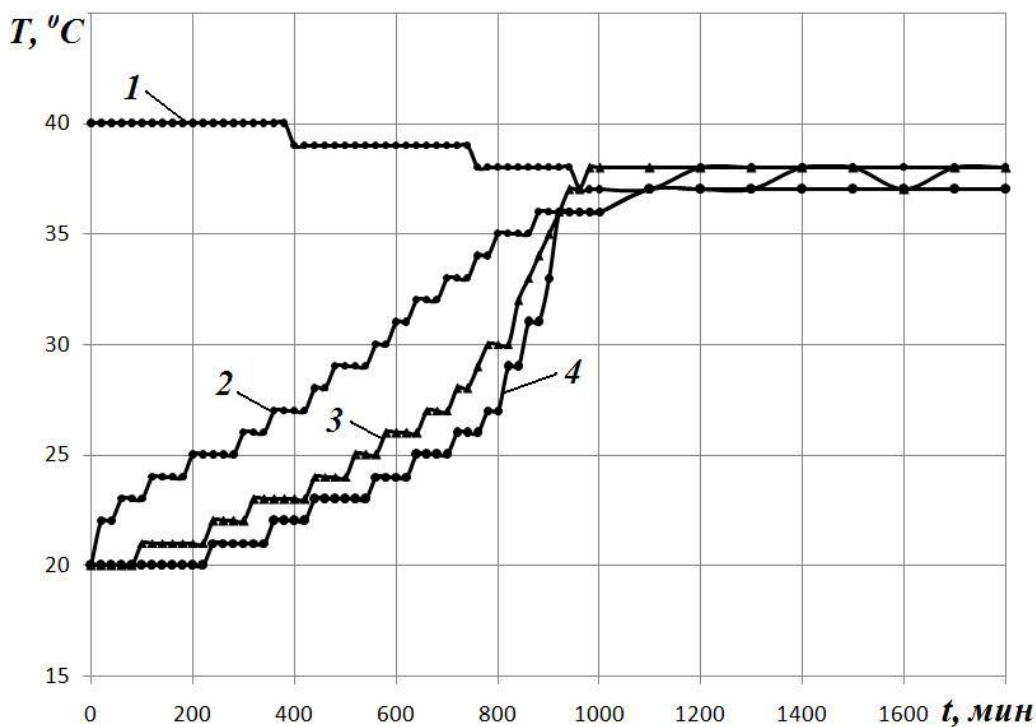


Рисунок 4 – Характер изменения температуры по высоте грузового трюма танкера. Расположение створа по отношению к высоте трюма H : 1 – 0; 2 – $0,25H$; 3 – $0,5H$; 4 – H

Выводы

1. Используемая в настоящее время технология вытеснения воздуха за счет инертных газов из грузовых трюмов на танкерах характеризуется большой продолжительностью процесса. Для решения этой проблемы предложено повысить качество работы системы инертных газов на танкерах за счет использования новой технологии принудительной подачи инертных газов в грузовое пространство трюма.

2. При вентиляции трюма принудительная подача инертных газов должна быть согласованной со структурой движущегося с невысокими скоростями потока воздуха внутри ограничивающих его жестких стенок грузового трюма. Для этого была разработана комбинированная схема подачи инертных газов в трюм судна.

3. За счет реализации на танкере разработанной технологии принудительной подачи инертных газов в грузовой трюм в процентном соотношении улучшение процесса при переходе от естественной к принудительной вентиляции трюма составило 13,5 %. Сокращение затраченного времени при прочих равных условиях составило 56,47 %.

4. При принудительной подаче инертных газов в грузовой трюм судна стабилизация температуры внутри трюма наступает раньше, чем в случае использования стандартной технологии. Температурный градиент, составляющий $-17\text{ }^{\circ}\text{C}$, достигался за время меньшее на 38,18 % по сравнению со стандартной операцией вентиляции грузового трюма танкера.

5. Дальнейшие исследования должны быть направлены на разработку способов технической реализации разработанной технологии в зависимости от конструкции танкера и технических характеристик судовой системы инертных газов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Малахов А. В., Колегаев М. А., Бражник И.Д. Метод принудительной вентиляции трюмов на танкерах. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І.Вернадського. Серія «Технічні науки»*. 2018. № 29 (68;3). С. 166–169.
2. International Convention for the Prevention of Pollution from Ships, MARPOL 73/78.
3. Джалурия Й. Естественная конвекция. Тепло– и массообмен. Москва: Мир, 1983.
4. Зубарев В. Н., Козлов А. Д., Кузнецов В. М. Теплофизические свойства технически важных газов при высоких температурах и давлениях : справочник. Москва : Энергоатомиздат, 1989.
5. Уонг Х. Основные формулы по теплообмену для инженеров. Москва: Атомиздат, 1979.
6. Гусенов Д. А., Спектор С. С., Вайнер Л. З. Технологические расчеты процессов переработки нефти. Москва : Химия, 1964.
7. Elder J. W. (2006). Turbulent free convection in a vertical slot. *Journal of fluid mechanics*. 23(1), 99–111.
8. Eckert E.R.G. & Carlson W. O. (1961). Natural convection in an air enclosed between two vertical plates with different temperatures. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2 (2), 106–120.
9. Абрамович Г. Н., Крашенников С. У., Секундов А. Н., Смирнова И. П. Турбулентное смешение газовых струй. Москва : Наука, 1974.
10. Абрамович Г. Н. Теория турбулентных струй. Москва : Наука, 1960.

REFERENCES

1. Malakhov, A. V., Kolegaev, M. A. & Brazhnik, I. D. (2018). Metod prinuditelnoj ventiljacii tryumov na tankerax. *Vcheni zapiski Tavrijskogo nacionalnogo universitetu imeni V.I.Vernadskogo. Seriya «Texnichni nauki»*, 29 (68;3), 166–169.
2. International Convention for the Prevention of Pollution from Ships, MARPOL 73/78.
3. Dzhalurija, J. (1983). *Estestvennaya konvekciya. Teplo– i massoobmen*. Moskva : Mir.
4. Zubarev, V. N., Kozlov, A. D. & Kuznecov, V.M. et al. (1989). *Teplofizicheskie svojstva texniceski vazhnyx gazov pri vysokix temperaturax i davleniyax : spravocnik*. Moskva : Energoatomizdat.
5. Uong, X. (1979). *Osnovnye formuly po teploobmenu dlya inzhenerov*. Moskva : Atomizdat.
6. Gusejnov, D. A., Spektor, S. S. & Vajner, L. Z. (1964). *Texnologicheskie raschety processov pererabotki nefi*. Moskva : Ximiya.
7. Elder J. W. (2006). Turbulent free convection in a vertical slot. *Journal of fluid mechanics*. 23 (1), 99–111.
8. Eckert E. R. G. & Carlson W. O. (1961). Natural convection in an air enclosed between two vertical plates with different temperatures. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2 (2), 106–120.
9. Abramovich, G. N., Krashennikov, S. Y., Sekundov, A. N. & Smirnova, I. P. (1974). *Turbulentnoe smeshenie gazovyx struj*. Moskva : Nauka.
10. Abramovich G.N. (1960). *Teoriya turbulentnyx struj*. Moskva : Nauka.

Бражник І. Д. ЗМІНА РОБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМИ ІНЕРТИЗАЦІЇ ТАНКЕРА ЗАВДЯКИ ПРИМУСОВОМУ ПОДАННЮ ГАЗІВ

У статті розглянута проблема підвищення якості процесу заповнення інертними газами вантажних приміщень танкерів під час зміни типу вантажу. На підставі аналізу недоліків роботи сучасних технологічних схем встановлено, що робочий процес не може гарантувати високу якість процесу вентиляції вантажних приміщень танкера. Метою досліджень є підвищення якості роботи системи інертних газів на танкерах за рахунок використання нової технології примусового подання інертних

газів до вантажного простору трюму. Результати моделювання показали, що найбільше скорочення часу процесу можливо отримати завдяки примусовому поданню інертних газів. Проведено аналіз впливу на такий процес характеристик робочих струменів і проведено дослідження роботи трьох технологічних схем розташування соплових насадок на поверхні вантажного приміщення. Встановлено, що істотне скорочення часу робочого процесу можливо отримати завдяки комбінованому використанню чотирьох периферійних і одного центрального сопел для введення інертних газів.

Ключові слова: танкер, система інертних газів, концентрація кисню, соплова насадка, кут факела, швидкість процесу.

Brazhnik I. D. CHANGE OF OPERATING CHARACTERISTICS OF TANKER INERTIZATION SYSTEM BY USE OF FORCED GAS SUPPLY

The aim of the research is to improve the quality of the inert gas system on tankers through the use of new technology for the forced inert gas supply to the cargo hold space.

The article deals with the problem of increasing the quality of the process of filling the cargo spaces of tankers with inert gases when changing the cargo type. Based on the analysis of the shortcomings of the operation of modern technological schemes, it has been stated that the working process cannot guarantee the high quality of ventilation process of the cargo spaces of the tanker. The simulation results have shown that the greatest reduction of the process time can be obtained due to the forced supply of inert gases. An analysis on checking the influence of the working jets on the characteristics of such a process has been done and an investigation of the operation of three technological schemes for the location of cone nozzles on the surface of the cargo space has been provided. The currently used technology for displacing air from inert gases from cargo holds on tankers is characterized by a long process time. To solve this problem, it was proposed to improve the quality of the inert gas system on tankers through the use of new technology for the forced inert gas supply to the cargo hold space. During the ventilation of the hold, the forced supply of inert gases must be consistent with the structure of the air stream moving at low speeds inside the rigid walls of the cargo hold bounding it. For this, a combined scheme for supplying inert gases to the hold of the vessel was developed. Due to the implementation on the tanker of the developed technology for the forced supply of inert gases to the cargo hold as a percentage, the process improvement in the transition from natural to forced hold ventilation was 13.5%. Reducing the time spent, ceteris paribus, amounted to 56.47%. Further research should be aimed at developing methods for the technical implementation of the developed technology, depending on the design of the tanker and the technical characteristics of the ship's inert gas system.

Keywords: tanker, inert gas system, oxygen concentration, cone nozzle, plume angle, speed of the process.

© Бражнік І. Д.

Статтю прийнято
до редакції 4.03.19

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПОИСКОВО-СПАСАТЕЛЬНОЙ ОПЕРАЦИИ ПО СПАСЕНИЮ ЛЮДЕЙ В МОРСКОЙ ЗОНЕ ОТВЕТСТВЕННОСТИ УКРАИНЫ

Годованиук С. П., старший преподаватель Херсонской государственной морской академии, e-mail: godovaniuk1969@gmail.com, ORCID: 0000-0003-0382-2440;

Селиванов С. Е., д.т.н., профессор Херсонской государственной морской академии, e-mail: godovaniuk1969@gmail.com, ORCID: 0000-0001-8813-6276

К морской зоне ответственности Украины относится определенная зона Черного и Азовского морей. При моделировании поисково-спасательной операции по спасению людей в море составлены математические модели: изменения температуры тел в воде, колебания температуры по месяцам для Черного и Азовского морей. Для построения математической модели изменения температуры тела человека в воде использовался закон Ньютона-Рихмана. Построены графики зависимости изменения температуры тела человека в воде для разных температур воды при значениях коэффициента теплоотдачи как функции различия температур. Проведен помесичный анализ колебаний температуры воды в Черном и Азовском морях. Построен график колебаний температуры воды в Азовском море и приведен соответствующий аппроксимирующий полином. Проведенный анализ работы спасательных операций показал, что повышение эффективности спасательных операций предлагается достичь за счет увеличения процента перекрытия береговой линии путем создания дополнительных пунктов базирования средств спасания и увеличение количества скоростных катеров. Получены абсолютные и процентные количественные значения, на которые может быть повышен уровень эффективности казенного предприятия (КП) «Морская поисково-спасательная служба».

Ключевые слова: зона ответственности, моделирование, математические модели, спасательные операции, колебания температуры, эффективность предприятия.

DOI: 10.33815/2313-4763.2019.1.20.012-019

Введение. Бурное развитие научно-технического прогресса, а именно развитие новейших нанобиоинформационно-когнитивных технологий (NBIC) положительно повлиял на ситуацию и вызвал потребность в разработке новой концепции и создания во всемирном масштабе эффективной системы поиска и спасания (САР от английского SAR search and rescue) [1]. На выполнение требований IAMSAR относительно улучшения координации управления поиском и спасанием людей на море Украина создала единую систему поиска и спасания людей на море (ЕСПСМ) [2]. Поисково-спасательные силы Украины согласно международным обязательствам государства должны обеспечить поиск и спасание людей, судов и др. в определенной морской зоне ответственности Украины [3]. Организационно-техническое обеспечение деятельности Комитета осуществляет Мининфраструктуры при участии казенного предприятия «Морская поисково-спасательная служба» (КП «МПСС») [4].

В системе поиска и спасания – SAR выделяют 3 вида спасания: спасание людей, спасание имущества, спасание от загрязнения [1, 5]. Основные правовые документы, регламентирующие спасание на море: Конвенция по поиску и спасанию на море 1979 г. [1] и Конвенция по охроне человеческой жизни на море 1974 (СОЛАС-74) [6]. Основной нормативный акт – Кодекс торгового мореплавания (КТМ), в котором изложены права и обязанности капитана и экипажа судна при оказании помощи в море судну или лицу, которым угрожает гибель [7].

Постановка задачи. Жесткие ограничения на имеющееся время спасения людей в море накладывают временные условия выживания человека в воде. Эти условия зависят от поры года, погодных условий, состояния поверхности моря, подводных и ветровых течений и т.п. Поэтому при моделировании поисково-спасательной операции необходимо, в первую очередь, составить математические модели: изменения температуры тела человека в воде, а также колебание температуры по месяцам для Черного и Азовского морей.

Цель работы. Построить математические модели изменения температуры тела человека в воде, модель колебания температуры воды в Черном и Азовском морях, провести исследования условий для повышения эффективности спасательных операций.

Результаты исследований. Для построения математической модели изменения температуры тела человека в воде использовался закон Ньютона-Рихмана, который запишем в виде дифференциального уравнения первого порядка [1]:

$$\frac{dT_b}{dT} = k(T_v - T_b), \quad (1)$$

где T_b – внутренняя температура тела человека; T_v – температура окружающей воды в море/океане; k – коэффициент пропорциональности, который может быть не всегда постоянным для определенных диапазонов температур.

Коэффициент может быть определен как:

$$k = \frac{\alpha S}{C}, \quad (2)$$

где α – коэффициент теплоотдачи, который большей частью определяется экспериментально, а также не всегда является постоянной величиной; S – эффективная поверхность тела; C – теплоемкость тела.

Решение дифференциального уравнения изменения температуры тела человека в воде (1) запишем так:

$$T_b(t) = T_v + (T_{ob} - T_v)e^{-kt}, \quad (3)$$

где T_{ob} – начальная внутренняя температура тела человека.

Учитывая формулу (2), получим:

$$T_b(t) = T_v + (T_{ob} - T_v)e^{-\frac{\alpha S}{C}t}. \quad (4)$$

Для тела человека возьмем значение эффективной поверхности тела человека $S = 1,8 \text{ м}^2$, удельная теплоемкость тела $C_{\text{чт}} = 3,47 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$, средняя масса человека – 80 кг, начальная внутренняя температура тела человека $T_{ob} = 36,8 \text{ }^\circ\text{C}$ [2].

Используя эти данные, а также принимая во внимание, что при температуре тела $30 \text{ }^\circ\text{C}$ теряется сознание, снижение температуры тела до $25 \text{ }^\circ\text{C}$ – опасно для жизни, а ниже $20 \text{ }^\circ\text{C}$ – наступает смерть, найдем коэффициент теплоотдачи α для значений, приведенных в табл. 1.

Для определения коэффициента теплоотдачи α возьмем среднее значение температурных и временных интервалов (табл. 1).

Таблица 1 – Средние значения температурных интервалов

Температура воды, $^\circ\text{C}$	Время до наступления, ч		Допустимое время, мин
	потеря сознания	возможной смерти	
10	0,25 – 0,5	0,25 – 1,5	3 – 5
10 – 12	0,5 – 1	1 – 2	10
13 – 15	2 – 4	4 – 6	20
16 – 18	3 – 5	6 – 8	30
19 – 21	4 – 7	8 – 10	40
26	12	Опасно для жизни	

Построим графики зависимости изменения температуры тела человека в воде для разных температур воды при значениях коэффициента теплоотдачи α как функции температур (рис. 1).

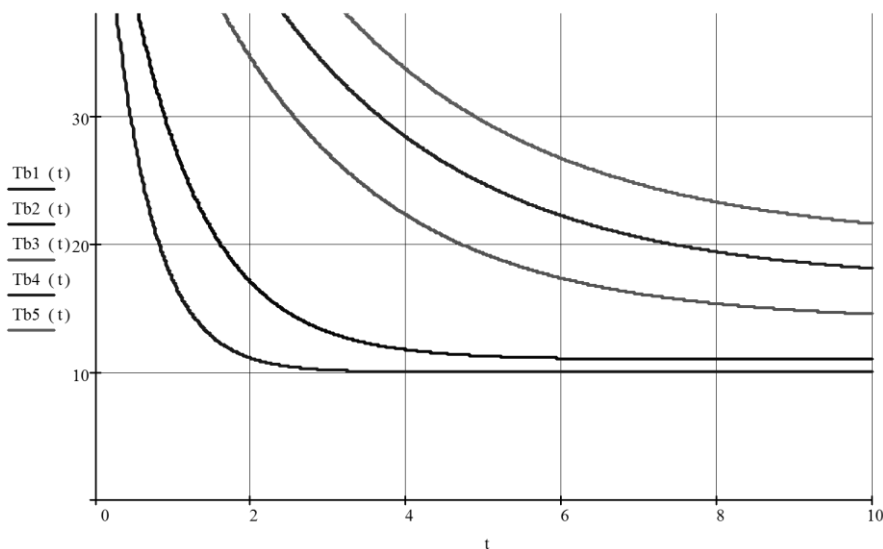


Рисунок 1 – Графики изменения температуры тела человека в воде в зависимости от температуры воды:

$T_{b1}(t)$ – для температуры воды 10 °С, $T_{b2}(t)$ – для температуры воды 11 °С, $T_{b3}(t)$ – для температуры воды 14 °С, $T_{b4}(t)$ – для температуры воды 17 °С, $T_{b5}(t)$ – для температуры воды 20 °С

Приведем помесичный анализ колебаний температуры воды в Черном и Азовском морях (табл. 2) [3].

Таблица 2 – Колебание температуры воды в Черном и Азовском морях

Номер n/n	Месяц	Температура морской воды T_w °С	
		Черное	Азовское
1	Январь	+8,9	+3,5
2	Февраль	+7,8	+3,7
3	Март	+8	+4,1
4	Апрель	+10,4	+9,5
5	Май	+16,7	+18,4
6	Июнь	+22	+23,6
7	Июль	+24,9	+25,7
8	Август	+25,9	+25,3
9	Сентябрь	+23,1	+19,9
10	Октябрь	+18,5	+14
11	Ноябрь	+14,4	+8,5
12	Декабрь	+11,2	+4,5

Анализ данных табл. 2 свидетельствует, что температура воды в Черном море в течение года колеблется в диапазоне от +7,8 °С до +25,9 °С, а в Азовском – от +3,5 °С до +25,7 °С. При этом колебание температуры имеет сезонный характер, так минимальная температура воды в Черном море наблюдается в феврале, в Азовском – в январе. Максимальная температура воды в Черном море обычно в августе, тогда как в Азовском – в июле.

На основании выполненного анализа построим математическую модель колебаний температуры воды в Черном и Азовском морях, применяя программный пакет MS Excel 365. Как временной интервал возьмем интервал один месяц. Каждому месяцу предоставляем порядковый номер согласно номеру в календарном году.

По результатам исследования установлено, что наилучшую степень соответствию статистическим данным, согласно методу наименьших квадратов, для колебаний температуры воды в Черном море имеет полином 5-го порядка (коэффициент детерминации $R^2 = 0,9936$), а для колебаний температуры воды в Азовском море – полином 6-го порядка (коэффициент детерминации $R^2 = 0,9968$).

Полученную математическую модель колебаний температуры воды в Черном море представим в такой форме:

$$T_{vB}(t_n) = 0,0029 \cdot t_n^5 - 0,074 \cdot t_n^4 + 0,4893 \cdot t_n^3 + 0,1167 \cdot t_n^2 - 4,7918 \cdot t_n + 13,414, \quad (5)$$

а математическая модель колебаний температуры воды в Азовском море:

$$T_{vA}(t_n) = -0 \cdot t_n^6 + 0,0463 \cdot t_n^5 - 0,6995 \cdot t_n^4 + 4,7354 \cdot t_n^3 - 13,842 \cdot t_n^2 + 17,105 \cdot t_n - 3,7265 \quad (6)$$

По результатам моделирования построен график колебаний температуры воды в Черном море, и соответствующий аппроксимирующий полином приведен на рис. 2; график колебаний температуры воды в Азовском море соответствующий аппроксимирующий полином на рис. 3.

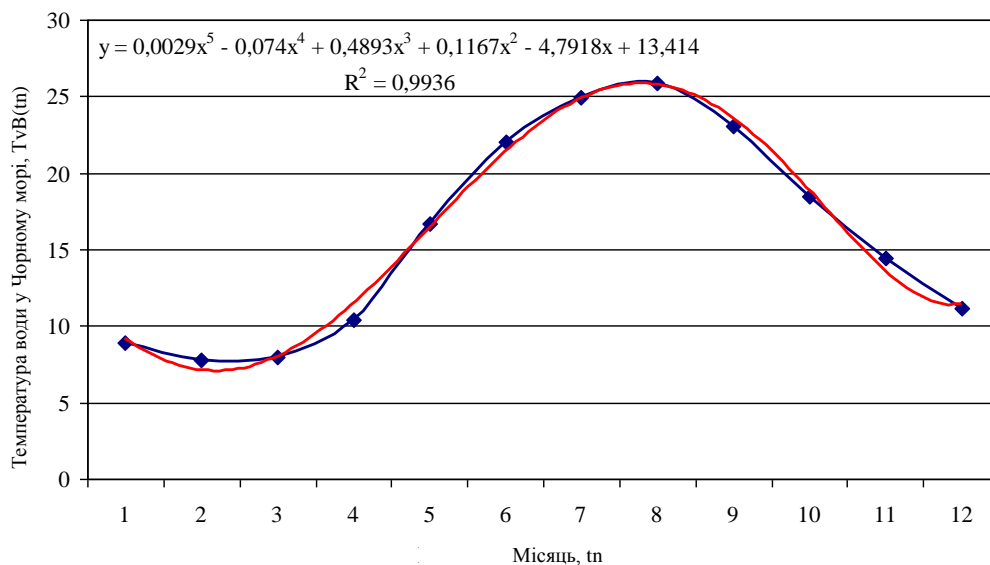


Рисунок 2 – График колебаний температуры воды в Черном море и соответствующий аппроксимирующий полином

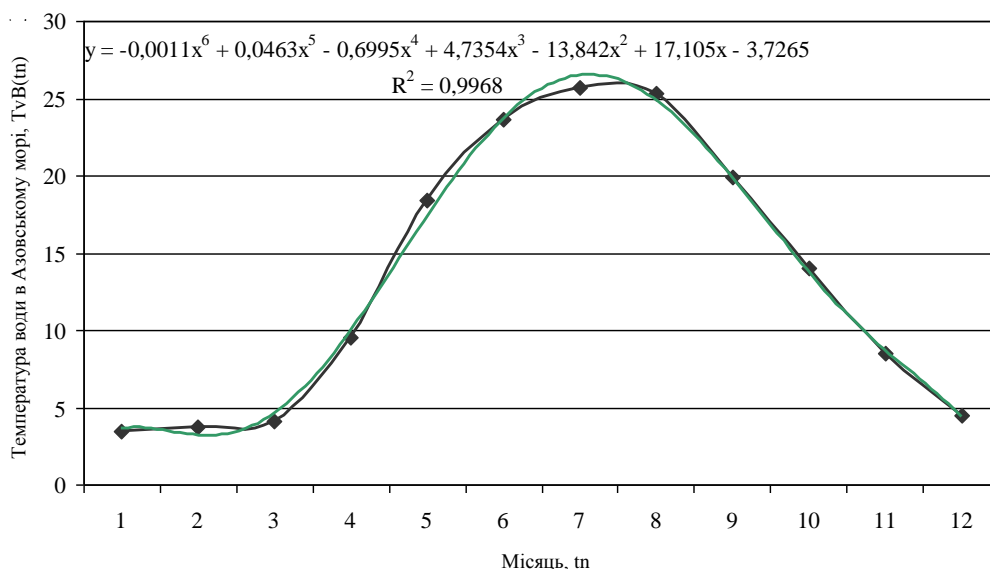


Рисунок 3 – График колебаний температуры воде в Азовском море и соответствующий аппроксимирующий полином

Зависимости (5) и (6) могут быть подставлены в формулу (4) с учетом коэффициента α как функции различия температур. Из уравнения (3) получена зависимость для времени пребывания человека в воде:

$$t = - \frac{\ln \left(- \frac{T_v - T_b}{T_{ob} + T_v} \right)}{k} \quad (7)$$

Полученные ежемесячные значения допустимого времени пребывания человека в воде $t_{доп}$ для температуры тела $T_b = 20^\circ\text{C}$ (наступление смерти) для Черного и Азовского морей сведены в табл. 3.

Таблица 3 – Значение максимально допустимого времени пребывания человека в водах Черного и Азовского морей

Номер n/n	Месяц	Максимально допустимое время пребывания человека в воде (для $T_b = 20^\circ\text{C}$), ч	
		Черное	Азовское
1	Январь	0,75	0,475
2	Февраль	0,68	0,484
3	Март	0,7	0,502
4	Апрель	0,85	0,789
5	Май	7,16	9,1
6	Июнь	–	–
7	Июль	–	–
8	Август	–	–
9	Сентябрь	–	17,8
10	Октябрь	9,27	2,059
11	Ноябрь	4,8	0,729
12	Декабрь	0,9	0,521

Согласно данным официального сайта казенного предприятия (КП) «Морская поисково-спасательная служба» (www.sar.gov.ua/ru/) сегодня на службе находятся шесть катеров: тяжелые аварийно-спасательные катера ПСК-01 и ПСК-02 проекта Patrol 150 с максимальной скоростью 35 узлов, легкие аварийно-спасательные катера ПСК-03, ПСК-04 и ПСК-05 проекта Boomeranger C-1100 SAR RIB с максимальной скоростью 32 узла, а также катер ПСК-06, данные за техническими характеристиками которого отсутствуют.

Определим эффективную площадь (радиус действия) для катеров проекта Patrol 150 и Boomeranger C-1100 SAR RIB, учитывая полученные данные выживания человека в водах Черного и Азовского морей, максимальных нужных скоростей, в случае отсутствия задержек обработки информации и изготовления команд на выполнение необходимых спасательных операций, а также при условиях точного знания местоположения людей.

Максимальная эффективная площадь ограничена кругом радиуса r с центром в точке нахождения спасательного судна (место базирования).

Радиус определим из условия:

$$r = V \cdot t_{доп}, \quad (8)$$

$$t_{доп} \geq t_{зустр}$$

Предварительный расчет прямой расстояния протяжностью береговой линии Украины (не учитывая временно оккупированной АР Крым) на основании картографического сервиса Google Maps получены такие результаты: для Черного моря прямая береговая линия имеет протяженность около 420 км, а для Азовского – около 290 км.

Всего КП «МПСС» имеет пять быстроходных спасательных катеров. Учитывая эти данные, а также предположив, что их пункты базирования расположены на равномерном отдалении друг от друга, выполним расчеты изменения максимального плеча (удвоенного радиуса r) для катеров каждого из проектов в зависимости от $t_{\text{доп}}$, учитывая колебание температуры воды в Черном и Азовском морях (табл. 4).

Таблица 4 – Расчеты изменения максимального плеча

Номер n/n	Месяц	Максимальное плечо (2 r), км			
		Катера проекта Patrol 150		Катера проекта Boomeranger C-1100	
		Черное море	Азовское море	Черное море	Азовское море
1	Январь	97,5	61,75	90	57
2	Февраль	88,4	62,92	81,6	58,08
3	Март	91	65,26	84	60,24
4	Апрель	110,5	102,57	102	94,68
5	Май	930,8	1183	859,2	1092
6	Июнь	–	–	–	–
7	Июль	–	–	–	–
8	Август	–	–	–	–
9	Сентябрь		2314		2136
10	Октябрь	1205,1	267,67	1112,4	247,08
11	Ноябрь	624	94,77	576	87,48
12	Декабрь	117	67,73	108	62,52

Анализ данных свидетельствует, что в зимние месяцы береговая линия не полностью перекрывается для Черного и Азовского морей,

Учитывая наличие пяти быстроходных катеров и принятое допущение специфики их базирования, перекрытие береговой линии представлено в табл. 5.

Таблица 5 – Перекрытие береговой линии Черного и Азовского морей

Номер n/n	Месяц	Неперекрытая береговая линия			
		Черное море		Азовское море	
		в км	в %	в км	в %
1	Январь	285	32,14	114	60,69
2	Февраль	258,4	38,48	116,16	59,94
3	Март	266	36,67	120,48	58,46
4	Апрель	323	23,10	189,36	34,70
5	Май	2720,8	Полностью	2184	Полностью
6	Июнь		Полностью		Полностью
7	Июль		Полностью		Полностью
8	Август		Полностью		Полностью
9	Сентябрь		Полностью	4272	Полностью
10	Октябрь	3522,6	Полностью	494,16	Полностью
11	Ноябрь	1824	Полностью	174,96	39,67
12	Декабрь	342	18,57	125,04	56,88

Если взять за критерий эффективности функционирования КП «МПСС» величину перекрытия береговой линии, то в зимние месяцы существенным образом снижается вероятность удачного проведения поисково-спасательных операций.

Выводы. Во время организации поисково-спасательных операций, кроме сокращения времени на сбор заявок, их обработки, принятия решения на проведение операции, а также сокращение времени, израсходованного судном-спасателем на

преодоление расстояния между ним и аварийным судном, необходимо прежде всего учесть имеющееся время на спасение людей. Повышения эффективности спасательных операций предлагается достичь за счет увеличения процента перекрытия береговой линии путем создания дополнительных пунктов базирования средств спасания и увеличения количества скоростных катеров. Абсолютные и процентные количественные значения, на которые может быть повышен уровень эффективности КП «МПСС», приведены в табл. 5.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Международная конвенция по поиску и спасанию на море 1979 года с поправками SAR-79. (Текст на рус. и англ. языках). Санкт-Петербург : ЦНИИМФ. 2005. 555 с.
2. Про відновлення єдиної системи пошуку та рятування на морі: від 24 лютого 2016 р. *Постанова № 158. Кабінет Міністрів України*. Київ, 2016.
3. Про затвердження нормативних актів з пошуку та рятування на морі: від 10 вересня 2002 р. *Наказ № 643. Міністерство транспорту України*. Київ, 2002.
4. Про утворення координаційного комітету з пошуку і рятування на морі: від 16 листопада 2016 р. *Постанова № 830. Кабінет Міністрів України*. Київ, 2016.
5. Ситник И. А., Степанов Э. А. *Анализ состояния, структуры и возможностей национальной морской системы поиска и спасания в зоне ответственности Украины*. Севастополь: Академия военно-морских сил Украины им. П. С. Нахимова, 2012. 7 с.
6. Международная конвенция по охране человеческой жизни на море 1974 года СОЛАС (текст, измененный Протоколом 1988 года к ней, с поправками). Текст на рус. и англ. Санкт-Петербург : ЦНИИМФ. 2010. 992 с.
7. Кодекс торговельного мореплавства України: станом на 5 січня 2017 р. Верховна Рада України. Київ, 2017.
8. Давидзон М. И. Закон охлаждения Ньютона-Рихмана и конвективный теплообмен. *Вестник Ивановского гос. универ. Серия: естест., общест. науки*. Иваново, 2012. № 2. С. 73–79.
9. Физиология человека / под ред. Г. И. Косицкого. Москва: ООО «Изд. дом Альянс», 2009. 544 с.
10. Ходаков В. Е., Соколова Н. А., Чёрный С. Г. Влияние природно-климатических факторов на социально-экономические и производственные системы. Херсон : ХНТУ, 2012. 331 с.

REFERENCES

1. The 1979 International Convention on Search and Rescue at Sea, as amended by the SAR-79. (Text in Russian and English. Languages). (2005). St. Petersburg : TSNIIMF.
2. About the unified system of the hunt for the sea: from 24 February 2016 p. (2016). *Postanova number 158. Kabinet Ministriv Ukraine*. Kyiv.
3. About the hardening of regulatory acts in the sea and in the sea: in 10 September 2002. (2002). *Mandate number 643. Ministry of Transport of Ukraine*. Kyiv.
4. About the approval of the coordinating committee to the companion and imitation of the sea: from 16 leaf fall 2016 p. (2016). *Postanova No. 830. Kabinet Ministriv Ukraine*. Kyiv.
5. Sitnik, I. A. & Stepanov, E. A. (2012). Analysis of the state, structure and capabilities of the national maritime search and rescue system in the area of responsibility of Ukraine. Sevastopol : Academy of Naval Forces of Ukraine. P. S. Nakhimov.
6. The 1974 International Convention for the Safety of Life at Sea, SOLAS (text amended by the 1988 Protocol to it, as amended). (2010). Text in Russian. and eng. St. Petersburg : TsNIIMF.
7. Merchant Shipping Code of Ukraine: Behind the camp for 5 September 2017 p. Kyiv : Verkhovna Rada of Ukraine.

8. Davidzon M. I. (2012). Newton-Richman cooling law and convective heat transfer. *Bulletin of the Ivanovo State. Univer. Series: estest., Obschest. science.* Ivanovo, 2012. № 2. 73–79.
9. Human physiology / ed. G.I. Kositsky. (2009). Moskov : LLC Ed. Home Alliance.
10. Khodakov, V. Ye., Sokolova, N. A. & Cherny S. G. (2012). *Influence of climatic factors on socio-economic and production systems.* Kherson : KNTU.

Годованюк С. П., Селиванов С. Є. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПОШУКОВО-РЯТУВАЛЬНОЇ ОПЕРАЦІЇ З ПОРЯТКУНКУ ЛЮДЕЙ У МОРСЬКІЙ ЗОНІ ВІДПОВІДАЛЬНОСТІ УКРАЇНИ

До морської зони відповідальності України відноситься певна зона Чорного й Азовського морів. При моделюванні пошуково-рятувальної операції по порятунку людей у морі представлені математичні моделі: зміни температури тіл у воді, коливання температури по місяцях для Чорного й Азовського морів. Для побудови математичної моделі зміни температури тіла людини у воді використовувався закон Ньютона-Ріхмана. Побудовані графіки залежності зміни температури тіла людини у воді для різних температур води при значеннях коефіцієнта тепловіддачі як функції різниці температур. Наведений помісячний аналіз коливань температури води в Чорному й Азовському морях. Побудований графік коливань температури води в Азовському морі й наведений відповідний апроксимувальний поліном. Проведений аналіз роботи рятувальних операцій, показав, що підвищення ефективності рятувальних операцій пропонується досягти завдяки збільшенню відсотка перекриття берегової лінії шляхом створення додаткових пунктів базування засобів рятування і збільшення кількості швидкісних катерів. Отримані абсолютні й процентні кількісні значення, на які може бути підвищений рівень ефективності казенного підприємства (КП) «Морська пошуково-рятувальна служба».

Ключові слова: зона відповідальності, моделювання, математичні моделі, рятувальні операції, коливання температури, ефективність підприємства.

Godovanuk S.P., Selivanov S. E. MATHEMATICAL MODEL OF SEARCH AND RESCUE OPERATION TO SAVE PEOPLE IN THE SEA AREA OF RESPONSIBILITY OF UKRAINE

The sea area of responsibility of Ukraine includes a certain zone of the Black Sea and the Azov Sea. When modeling search and rescue operation to save people at sea, the mathematical models have been compiled: changes of the temperature of bodies in water, monthly temperature fluctuation for the Black Sea and the Azov Sea. Newton-Richmann's law was used to compose a mathematical model of changing human body temperature in water. The graphs of the dependence of change in temperature of human body in water for different water temperatures for the values of heat emission coefficient as a function of difference of temperatures have been composed. The monthly analysis of water temperature fluctuations in the Black Sea and in the Azov Sea has been conducted. A graph of water temperature fluctuations in the Azov Sea is constructed and a corresponding approximating polynomial is given. The values of maximum possible time of human stay are certain in the Azov Sea and in the Black Sea (monthly) that substantially depend on a season. The mathematical model of water temperature fluctuations in the Black Sea and the mathematical model of water temperature fluctuations in the Azov Sea are given. The analysis of work of rescue operations has shown that increasing of efficiency of rescue operations is proposed to be obtained by increasing the percentage of coastline closure by creating additional rescue facilities-based stations and by increasing the number of speed boats. During the organization of search and rescue operations, in addition to reducing the time for collecting applications, processing them, making a decision to conduct the operation, as well as reducing the time spent by the rescue vessel to cover the distance between it and the emergency vessel, it is necessary first to take into account the available time for rescue people. It is proposed to increase the efficiency of rescue operations by increasing the percentage of coastline closure by creating additional rescue facilities based outposts and increasing the number of speed boats. The absolute and percentage quantitative values have been received by which the level of efficiency of the state-owned enterprise «Marine Search and Rescue Service» can be increased.

Keywords: area of responsibility, modeling, mathematical models, rescue operations, temperature fluctuations, efficiency of enterprise.

© Годованюк С. П., Селиванов С. Є.

Статтю прийнято
до редакції 1.04.19

ТРЕНАЖЕР ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ПОДГОТОВКИ СУДОВЫХ СПЕЦИАЛИСТОВ

Иванов А. А., аспирант кафедры эксплуатации судового электрооборудования и средств автоматики Херсонской государственной морской академии, e-mail: artiva1978@gmail.com, ORCID: 0000-0002-1919-2570;

Тимофеев К. В., к.т.н., доцент кафедры эксплуатации судового электрооборудования и средств автоматики Херсонской государственной морской академии, e-mail: kvtimofeev2013@gmail.com, ORCID:0000-0002-8668-6159;

Авраменко Н. Н., заведующий высоковольтной лабораторией Херсонской государственной морской академии, Украина, e-mail: avrnik1948@gmail.com, ORCID: 0000-0002-1753-3562;

Растегина Г. И., старший преподаватель-методист Херсонского морского колледжа, Украина, e-mail: rastegina@gmail.com, ORCID 0000-0001-7349-5989

В работе показана необходимость применения высоковольтного тренажера, который позволяет не только формировать требуемую компетентность персонала машинной команды, но также дает возможность вести научно-исследовательскую работу, отрабатывать методы и критерии оценки компетентности, позволяет оценить и продемонстрировать полученные практические навыки и моделирования штатных и аварийных ситуаций и действий при возникновении неисправностей высоковольтного оборудования. Целью работы выступила необходимость раскрыть возможности разработанного высоковольтного тренажерного комплекса для качественного обучения, тренинга и стажировки, которые отвечают требованиям и стандартам конвенции ПДНВ, а также для проведения научных исследований и моделирования штатных и аварийных ситуаций и действий при возникновении неисправностей высоковольтного оборудования. Приведена функциональная схема высоковольтного тренажера и показано использование его в решении исследовательской задачи влияния параметров кабеля на силовой модуль инвертора преобразователя частоты.

Ключевые слова: высоковольтный тренажер, гребная электрическая установка, симулятор, компетентность, преобразователь частоты, инвертор.

DOI: 10.33815/2313-4763.2019.1.20.020-029

Постановка проблемы. В мировом флоте на многих судах с гребной электрической установкой (ГЭУ), разных по типу и назначению, используются судовые высоковольтные электроэнергетические системы (СЭЭС). Согласно международной конвенции по подготовке и дипломированию моряков и несению вахты (ПДНВ) [1], с манильскими поправками с 1 января 2017 года для работы на судах с напряжением силовой электрической установки свыше 1000 Вольт переменного тока обязательным требованием для персонала машинной команды является прохождения курсов по безопасной эксплуатации высоковольтного оборудования.

В связи с этим, возникает необходимость проведения обучения на специализированных тренажерах, которые в полной мере должны соответствовать стандартам и требованиям ПДНВ. Такие тренажеры должны быть способны моделировать эксплуатационные возможности соответствующего судового оборудования до уровня физической реальности.

На данный момент подготовка персонала машинной команды не в полной мере удовлетворяет требованиям ПДНВ из-за малого количества тренажерных комплексов, использующих реальное оборудование, обеспечивающее контролируемую эксплуатационную среду, способную воспроизводить разнообразные условия, включающие аварию, опасные или нештатные ситуации.

Анализ исследований и публикаций. Эксплуатационный профиль морских судов стал более разнообразен, а выполнение многочисленных задач привело к увеличению мощности силовых энергетических установок (СЭУ) и усложнению выполняемых ими операций. Возник компромисс между эффективностью и адаптируемостью к различным выполняемым морскими судами задачам, это привело к появлению разнообразных СЭУ [2].

На рис. 1 показана классификация СЭУ, которые по связи главного двигателя с движителем можно разделить на три типа:

- механические СЭУ;
- СЭУ с электродвижением;
- гибридные СЭУ.

В настоящее время широкое применение нашли электроходы с высоковольтной единой электроэнергетической системой (ЕЭЭС) [3], которая обеспечивает электроэнергией гребные электрические установки (ГЭУ) и общесудовые потребители электроэнергии. Для работы с такими сложными высоковольтными судовыми системами требуется высококвалифицированный и компетентный персонал машинной команды.

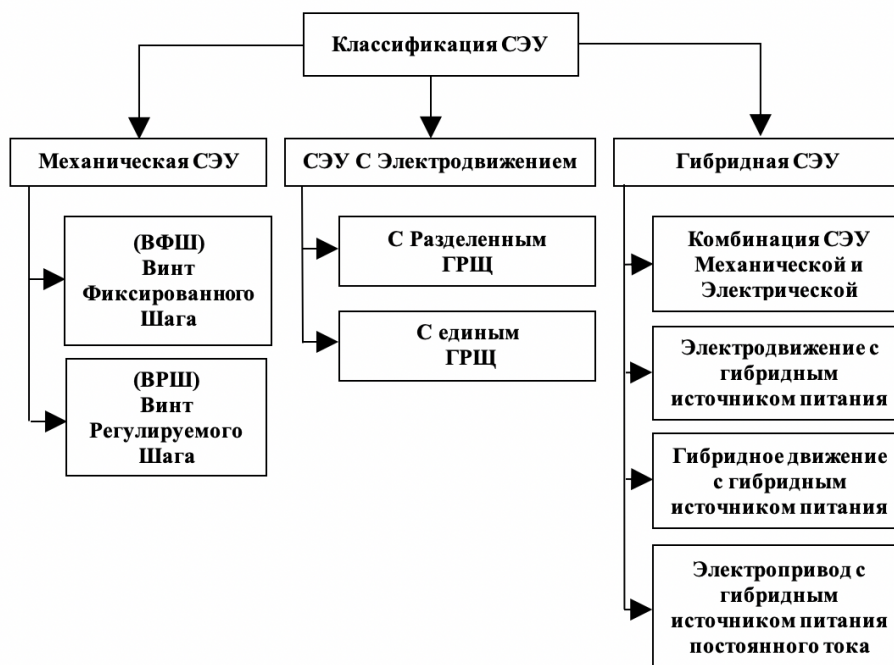


Рисунок 1 – Классификация судовой энергетической установки

Для квалифицированной подготовки такого персонала на основе стандартов и требований ПДНВ международные морские организации разработали и утвердили следующие документы:

- модельные курсы (7.02, 7.04, 7.08, 2.07), разработаны IMO (International Maritime Organization) [4–7];
- руководства и учебные планы (R005 Rev.2, C010, SEL031/M217), разработаны IMCA (International Marine Contractors Association) [8–10];
- критерии проведения обучения персонала по высоковольтному оборудованию на уровне эксплуатации и управления, разработаны MNTB (Merchant Navy Training Board) [11].

В этих документах подробно описываются принципы проведения обучения, способы демонстрации и перечни компетенций, которым должен, в полной мере, соответствовать персонал машинной команды, а также минимальные знания, понимания и профессиональные навыки по высоковольтным судовым системам после прохождения обучения.

Известны разнообразные виртуальные симуляторы, такие, как «TRANSAS» [12], «KONGSBERG» [13] и другие, в основу которых вошли различные модули проведения обучения по высоковольтному оборудованию. Несмотря на широкие функциональные возможности виртуальных симуляторов, они не могут заменить реально действующее

оборудование и зависят от программного обеспечения, что снижает обучающий эффект и понимание.

Подготовка специалистов на виртуальных симуляторах дает хорошее теоретическое понимание происходящих процессов, но отсутствует состояние реальности и возможность адаптации к условиям работы реального высоковольтного оборудования и проведения практических упражнений, что значительно снижает эффективность подготовки персонала.

Существуют тренажерные комплексы, включающие в себя как виртуальные инструменты, так и физические компоненты. В частности, в [14] описан полномасштабный тренажерный комплекс, который обеспечивает адекватное воспроизводство эксплуатационных ситуаций по техническому использованию реального судового оборудования и подготовку по мониторингу, контролю и управлению генераторными агрегатами в ручном, полуавтоматическом и автоматическом режимах работы электростанции, контролю и управлению электромеханическими системами, а также решению задач параметрирования, визуализации и т. п.

Недостатком такого тренажерного комплекса является лишь имитация высокого напряжения, поэтому персонал машинной команды не в полной мере могут получить практическую подготовку по обслуживанию высоковольтного оборудования и проведению ряда процедур, связанных с безопасным использованием контрольно-измерительных инструментов и переносных заземляющих устройств.

Цель статьи. Цель статьи – раскрыть возможности разработанного высоковольтного тренажерного комплекса для качественного обучения, тренинга и стажировки, которые отвечают требованиям и стандартам конвенции ПДНВ, а также для проведения научных исследований и моделирования штатных и аварийных ситуаций и действий при возникновении неисправностей высоковольтного оборудования.

Изложение основного материала. Обучение, подготовка и повышение компетентности персонала машинной команды во многом зависит от тренажерной базы с наличием реального оборудования, позволяющего отрабатывать практические навыки и профессионализм при эксплуатации современных судовых высоковольтных систем с высоким уровнем автоматизации.

Развитие и внедрение реально функционирующих лабораторий-тренажеров с судовым электрооборудованием обеспечит необходимый уровень компетентности при эксплуатации и техническом обслуживании высоковольтных и низковольтных электроэнергетических систем.

В соответствии с требованиями стандартов ПДНВ, персоналу машинной команды, для работы на судах с высоковольтными системами, необходимо проходить соответствующее обучение и подготовку по высоковольтным системам на уровне эксплуатации и управления.

Согласно рекомендациям ИМО модельных курсов по эксплуатации и техническому обслуживанию систем напряжением свыше 1000 В на уровне эксплуатации в процесс обучения должны быть включены следующие темы:

- электрические разряды в диэлектриках, газах, электрические пробои в жидких диэлектриках;
- изоляция высоковольтного электрооборудования, классификация изоляции, условия и требования, предъявляемые к изоляции силовых кабелей, вращающихся машин;
- перенапряжения в электрических системах высокого напряжения (HV, англ. high voltage), коммутационные перенапряжения с индуктивностью и емкостью;
- функциональные, эксплуатационные требования и требования безопасности к судовым системам HV;
- силовые высоковольтные однолинейные схемы HV, схемы установленных электрических защит;
- работа коммутационных устройств;
- меры предосторожности и процедуры при работе в системах с HV.

На уровне управления необходимо понимать и иметь профессиональные навыки по следующим процедурам:

- назначать квалифицированный персонал для проведения техобслуживания и ремонта распределительных устройств различных типов;
- принимать меры по исправлению неисправных действий в обнаружении неисправностей в системах с HV;
- разрабатывать процедуры безопасного переключения для предотвращения поражения электрическим током и безопасного замера сопротивления изоляции;
- разрабатывать процедуры по испытанию изоляции и защите с выполнением всех требований по технике безопасности.

Демонстрация компетентностей на действующем реальном высоковольтном электрооборудовании требует следующих пониманий и профессиональных навыков:

- практического проведения всех операций на высоковольтном распределительном щите;
- включения и отключения электропитания к потребителям с помощью коммутационных устройств высокого напряжения;
- синхронизации генераторов HV;
- выполнения блокировок, действий с ключами, операций по установке и выемке высоковольтного генераторного выключателя;
- настройки и регулировки параметров релейной защиты;
- выполнения замеров параметров (U , I , P , Q , f , $R_{из}$) на высоковольтном оборудовании;
- дистанционного управления на HV через микропроцессорный модуль;
- восстановления напряжения в аварийных ситуациях на высоковольтном ГРЩ;
- безопасного выполнения работ в действующих электроустановках с составлением процедур и использованием защитных средств.

Профессиональная деятельность персонала машинной команды на судне направлена на эксплуатацию и обслуживание реальных технических средств, а не виртуальных аналогов. В этой статье группой специалистов описывается разработка концепции высоковольтного тренажера, позволяющая решать задачи компетентной подготовки специалистов по теоретическим знаниям и практическим навыкам на базе оборудования фирмы «Schneider Electric» с напряжением 6,3 кВ, которое показано на рис. 2.

В состав высоковольтного тренажера входит высоковольтный ГРЩ типа MCset фирмы «Schneider Electric», состоящий из трех отдельных ячеек, две из которых укомплектованы высоковольтными автоматическими выключателями типа EVOLIS и системами контроля и управления релейной защитой и визуального наблюдения релейных защит Sepam T40, а третья ячейка оборудована трансформатором напряжения, защитными предохранителями и системой блокировок по установке заземляющего устройства и разряда конденсаторов.

Высокое напряжение формируется с помощью повышающего трансформатора мощностью 10 кВА, напряжением 0,38 кВ на первичной обмотке и 6,3 кВ – на вторичной обмотке.

В качестве нагрузки на высоковольтный ГРЩ служит тренажер гребного электродвигателя (ГЭД) и ГЭУ с преобразователями частоты и двумя асинхронными электродвигателями на одном валу, который получает питание от понижающего трансформатора мощностью 10 кВА, напряжением 6,3 кВ на первичной обмотке и 0,38 кВ на вторичной обмотке.

Управление высоковольтным тренажером и нагрузкой обеспечивается с трех компьютеризированных постов, с помощью специально разработанных программ.

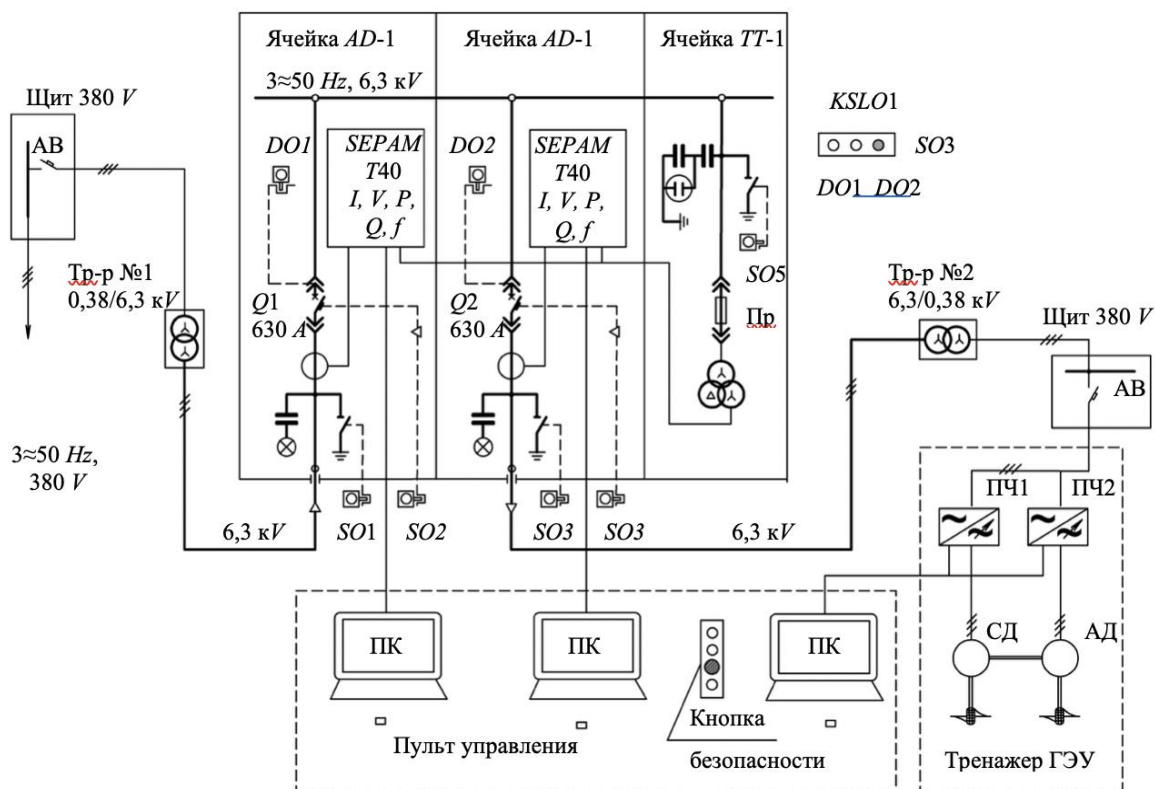


Рисунок 2 – Схема высоковольтного тренажера

При помощи программного обеспечения SFT 2841 [15] можно задавать и редактировать специальные функции управления и контроля реле защиты «Seram» [16], в том числе редактировать логические уравнения для программирования оригинальных функций управления и контроля, создавать персонализированные сообщения для сигнализации при местном управлении, персонализировать матрицы управления выходных реле, сигнальных ламп и сигнальных сообщений в соответствии с заданными функциями.

Связь между силовым оборудованием, блоками контроля и управления высоковольтным тренажером выполняется с помощью микропроцессорных интерфейсных модулей RS485-Modbus, находящихся в низковольтных секциях ГРЩ.

Главная операторская панель позволяет управлять высоковольтным тренажером и асинхронными электродвигателями ГЭУ с помощью частотных преобразователей, а также моделировать штатные и аварийные ситуации.

Вблизи высоковольтного тренажера для обеспечения должного уровня безопасности находятся шкафы с необходимыми средствами индивидуальной защиты и специализированными контрольно-измерительными инструментами.

Высоковольтный тренажер имеет разнообразный спектр возможностей в подготовке высококвалифицированных специалистов и позволяет решать следующие задачи:

- формировать понимание структуры построения и применения высоковольтных схемных решений на современных судах;
- ознакомления с возможностями высоковольтного оборудования по обеспечению движения судна, его маневренности и удержанию на позиции;
- приобретения практических навыков работы на действующей электростанции высокого напряжения;
- изучения высоковольтного коммутационного оборудования и умения его безопасно обслуживать и эксплуатировать;
- изучения на практике релейной защиты в высоковольтных сетях, методов определения временных задержек реле и расчетов уровней тока короткого замыкания;

- умения на практиці нести вахту по високовольтному обладнанню і приймати заходи по комутаційним переключенням і наборам схем в об'ємі, необхідному для забезпечення живлення судових споживачів і безпечної експлуатації електроенергетических установок;
- вести перевірку роботи судових високовольтних електростанцій на різних режимах завантаження, використовуючи тренажер ГЭД і ГЭУ, включаючи режим «екскаваторної характеристики»;
- проводити на практиці обробку динамічного управління через мікропроцесорний модуль головного розподільного щита, використовуючи мнемосхеми і комп'ютер;
- набуття навичок дій в аварійних ситуаціях, включаючи обесточивання по високовольтній стороні;
- набуття навичок технічного обслуговування високовольтного електрообладнання і тестування з урахування складання планів і процедур з вказанням заходів безпеки;
- набуття навичок по безпечної експлуатації високовольтного електрообладнання і визначення рівнів повноважень;
- демонстрації навичок по замірам напруги, вимірюванню і встановці автоматических вимикачів, вимірюванню опору ізоляції трансформаторів і кабелів;
- демонстрації професійних навичок і умінь на затвердженні тренажері для отримання IV групи допуску по електробезпеці.

Вся установка тренажерного комплексу дозволяє не тільки формувати необхідну компетентність персоналу машинної команди, але також дає можливість вести науково-дослідницьку роботу, обробляти методи і критерії оцінки компетентності, дозволяє оцінити і продемонструвати отримані практичні навички.

Тренажер виробляє всі судові експлуатаційні ситуації, забезпечує підготовку по моніторингу, контролю і управлінню високовольтної електростанцією. Крім різних комбінацій і режимів роботи, на навантажувальне пристрій тренажером передбачена можливість імітації несправностей, аварійних ситуацій, нестандартної помилки, що дозволяє обробляти дії персоналу машинної команди в умовах аварійної роботи технічних засобів судна.

Немаловажним фактором є компетентність навчаючого в умовах наявності високої напруги на тренажері. Тому необхідно вміти розробляти і дотримуватися процедур по безпечної експлуатації електроустановки і застосуванню захисних засобів. Вміти на практиці продемонструвати організаційні і технічні заходи з використанням індивідуальних засобів захисту в зоні дії НВ.

Підготовка на діючому тренажері механіків і електромеханіків по безпечної експлуатації діючих електроустановок вище 1000 В і отримані знання в області високовольтних технологій судових систем «Чоловік-машина» дозволять підвищити безпеку плавання на сучасних судах – це те, що вимагають всі міжнародні організації.

В якості прикладу розглянемо застосування високовольтного тренажера в дослідницьких завданнях. В частині, в приводах малої і середньої потужності для з'єднання з двигателем перетворювача частоти (ПЧ) нерідко використовується довга кабель (наприклад, в сервоприводах), при цьому навантаження отримує значущу ємнісну складову, що необхідно враховувати при розрахунку втрат переключення в інверторі. Розглядається вплив ємності кабелю на транзистори вихідного модуля ПЧ.

Частотні і динамічні характеристики IGBT (біполярний транзистор з ізолюваним затвором (англ. Insulated-gate bipolar transistor)) транзисторів силового модуля в багатьох визначають конкретні умови роботи судового частотного перетворювача. В специфікаціях силових ключів параметри переключення приводяться

для фиксированных режимов, определенных производителем. Анализ технической документации показывает, что различные производители используют условия нормирования, которые отличаются. Более того, иногда они указаны недостаточно четко, в результате чего абсолютно одинаковые модули могут иметь различные характеристики [17].

В документации приводятся временные параметры IGBT: время задержки включения и выключения $t_{d(on)}$, $t_{d(off)}$, время нарастания t_r и спада t_f , а также энергия включения / выключения E_{on} и E_{off} . Для FWD указывается пиковое значение обратного тока I_{RRM} , заряд и энергия обратного восстановления Q_{rr} и E_{rr} .

Условиями определения динамических характеристик являются: напряжение питания V_{CC} , ток коллектора I_C , напряжение включения / выключения $V_{G(on)}$ и $V_{G(off)}$, номиналы внешнего резистора затвора R_{Gon} и R_{Goff} .

Некоторые производители указывают величину распределенной индуктивности DC-шины L_σ , скорость нарастания и спаду тока коллектора di/dt_{on} и di/dt_{off} , а также время нарастания напряжения «коллектор-эмиттер» dv_{CE}/dt при выключении IGBT. Для описания динамического поведения диода нормируются следующие параметры: скорость спада тока при выключении di/dt_{off} и соответствующие значения напряжения на затворе IGBT ($V_{GE(on)}$ и $V_{GE(off)}$).

Справочные значения динамических потерь силовых ключей приводятся в документации с учетом работы на индуктивную нагрузку, соответствующую требованиям стандартов IEC и согласуется с условиями эксплуатации в большинстве реальных приложений.

Влияние распределенной емкости кабеля исследовалось на примере стандартного привода, в состав которого входит трехфазный инвертор напряжения и асинхронный двигатель (ASM), подключенный с помощью экранированного кабеля разной длины. На рисунке 3 показана функциональная схема привода, содержащий принципиально важные компоненты фильтра электромагнитных помех EMI (англ. Electromagnetic Interference), такие как сетевой фильтр и Y конденсаторы. IGBT переключаются с высокими скоростями изменения напряжения dv/dt между фазами, а также между фазами и шиной заземления, что приводит к протеканию тока через паразитные емкости, которые находятся между проводами и экраном.

Направление емкостного тока показано стрелками на рис. 3, он проходит от транзистора через Y конденсаторы на шасси, кабели и экраны, затем обратно в DC шину и IGBT. Поскольку корпус двигателя обычно закрепляется на заземленной платформе, часть тока протекает непосредственно на землю и обратно в сеть и инвертор.

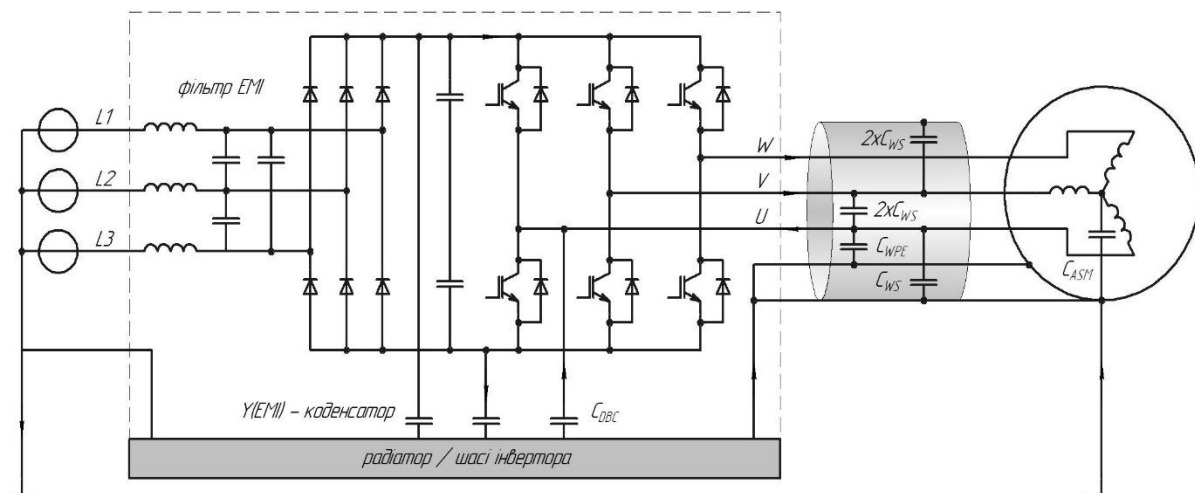


Рисунок 3 – Упрощенная принципиальная схема привода

В инверторе привода использован модуль MiniSKiiP 1 (SKiiP 1 AC12T4V1) с током $I_C(nom) = 8$ А и рабочим напряжением $V_{CES} = 1200$ В. Номинальные значения динамических

потерь: $E_{on} = 0,87$ мДж и $E_{off} = 0,75$ мДж $\rightarrow E_{sw(ref)} = 1,62$ мДж (при 8 А, 600 В, 150 °С, $R_G = 56$ Ом). Подключение инвертора к двигателю осуществляется с помощью двойного экранированного кабеля сечением 4x4 мм² с максимальным током 34 Arms. Выходной фильтр не используется [18].

Потери холостого хода не учитываются в общей формуле коммутационных потерь инвертора, работающего в режиме ШИМ. Они считаются равными нулю при нулевой нагрузке, хотя это не совсем корректно, если она чисто индуктивная. Небольшой емкостной ток, обусловленный наличием паразитных емкостей в полупроводниковых элементах и модулях относительно земли протекает в любом случае. Референтное значение (ref), используемое в формуле, указывается в спецификациях при номинальных условиях измерения. Как правило, это $T_{j(op, max)}$, $I_C(nom)$ и, например $V_{CC} = 600$ В для IGBT с рабочим напряжением 1200 В:

$$P_{SW} = f_{sw} \cdot E_{SW(ref)} \cdot \frac{\sqrt{2} I_{OUT}}{\pi} \cdot \frac{1}{I_{ref}} \cdot (1 + TC(T_j - T_{ref})) \cdot \left(\frac{V_{CC}}{V_{ref}} \right)^{Exp}.$$

Целесообразно дополнить эту формулу выражением, учитывающий емкостный ток кабеля. Он дает смещение динамической энергии (здесь около 20 % при температуре + 150 °С), которое прямо пропорционально частоте переключения и также зависит от длины кабеля и приложенного напряжения. Увеличение длины кабеля приводит к росту коммутационных потерь и задается показателем степени (здесь 0,37):

$$P_{SW} = f_{sw} \cdot E_{SW(ref)} \cdot \left(0,2 \left(\frac{L_{cable}}{10 \text{ м}} \right)^{0,37} + \frac{\sqrt{2} I_{OUT}}{\pi} \cdot \frac{1}{I_{ref}} \cdot (1 + TC(T_j - T_{ref})) \right) \cdot \left(\frac{V_{CC}}{V_{ref}} \right)^{1,4}.$$

Сравнение динамических потерь ШИМ инвертора при $V_{CC} = 700$ В, $I_{out} = 7$ А и $f_{sw} = 8$ кГц, $E_{SW} = 1,62$ мДж (8 А, 600 В, +150 °С):
а) без кабеля:

$$P_{SWa) } = 8 \text{ кГц} \cdot 1,62 \text{ мДж} \cdot \left(0,2 \left(\frac{0}{10 \text{ м}} \right)^{0,37} + \frac{\sqrt{2} \cdot 7 \text{ А}}{\pi} \cdot \frac{1}{8 \text{ А}} \cdot (1 + 0,0025(125^\circ\text{C} - 150^\circ\text{C})) \right) \times \\ \times \left(\frac{700 \text{ В}}{600 \text{ В}} \right)^{1,4} = 5,9 \text{ Вт};$$

б) кабель 20 м:

$$P_{SWб) } = 8 \text{ кГц} \cdot 1,62 \text{ мДж} \cdot \left(0,2 \left(\frac{20}{10 \text{ м}} \right)^{0,37} + \frac{\sqrt{2} \cdot 7 \text{ А}}{\pi} \cdot \frac{1}{8 \text{ А}} \cdot (1 + 0,0025(125^\circ\text{C} - 150^\circ\text{C})) \right) \times \\ \times \left(\frac{700 \text{ В}}{600 \text{ В}} \right)^{1,4} = 10,1 \text{ Вт}.$$

При аналогичном уровне потерь проводимости IGBT и в заданном режиме работы ($P_{cond} \sim 5,8$ Вт) это означает, что общее значение мощности рассеяния увеличивается от $P_{IGBT} = P_{SW} + P_{cond} = 11,7$ Вт без кабеля до 15,9 Вт (+36%) с экранированным кабелем длиной в 20 м. Во время перегрузки степень влияния кабеля в процентном соотношении снижается. Например, при двукратной перегрузке ($I_{out} = 14$ А) величина P_{cond} возрастает до 19 Вт, тогда как значение $P_{sw a)}$ без кабеля составляет 11,9 Вт, а с кабелем $P_{sw б)} = 16$ Вт. Итак, общие потери увеличиваются от 30,9 до 35 Вт (+13%).

Выводы. Предлагаемый вид обучения и подготовки является важным фактором, так, как в судовых условиях нет возможности имитации всевозможных аварийных ситуаций и режимов.

Полученный опыт и навыки на высоковольтном тренажере, позволяет персоналу машинной команды работать на различном высоковольтном оборудовании судов с электродвижением, показывая высокий уровень знаний и подготовки, и реализовывать функции эксплуатации и функции управления, и решать задачи безопасного судоходства.

Тренажер выполнен с учетом требований Конвенции ПДМНВ-78, раздела А-I/12, поэтому время работы кандидатов на данном тренажере может быть зачтено в ценз практической подготовки.

Тренажер высоковольтного электрооборудования дает возможность в полной мере вести переподготовку механиков и электромехаников с выдачей сертификатов по HV.

Высоковольтный тренажерный комплекс позволяет выполнять следующие операции:

- воспроизводить эксплуатационные возможности соответствующего судового оборудования максимально приближенные к условиям реального судна со степенью физической реальности;

- воспроизводить разнообразные условия, которые могут включать аварию, опасные или необычные ситуации, а также ситуации, потенциально и реально возможные при эксплуатации пропульсивных судовых систем;

- создавать условия для поведения человека с достаточной реальностью, позволяющей лицу, проходящему подготовку, приобрести необходимые навыки;

- инструктору контролировать, наблюдать и вести запись действий лиц, проходящих подготовку, для проведения их эффективного опроса после занятий;

- моделировать нестандартные ситуации и вероятные ошибки оборудования.

Также на высоковольтном тренажере можно вести научные исследования и проводить эксперименты магистрам, аспирантам, докторантам по всему спектру вопросов высоковольтных сетей и переходных процессов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Конвенция ПДНВ, (STCW). ИМО, 2017. 378 с. (Международная морская организация, Лондон).

2. Geertsma, R. D., Negenborn, R. R. & Hopman J. J. (2017). Design and control of hybrid power and propulsion systems for smart ships: A review of developments. Elsevier, Applied Energy 194, 30–54.

3. Григорьев Л. В., Петухов В. А. Современные и перспективные судовые валогенераторные установки. С-Пб. : Издательство ГМА им. адм. С.О.Макарова, 2009. 177 с.

4. Chief Engineer Officer and Second Engineer Officer. ИМО модельный курс 7.02. (2014). ИМО. London. 278.

5. Officer in Charge of an Engineering Watch. ИМО модельный курс 7.04. (2014). ИМО. London. 236.

6. Electro-Technical Officer. ИМО модельный курс 7.08. (2014). ИМО, London. 152.

7. Engine-Room Simulator. ИМО модельный курс 2.07. (2017). ИМО, London. 184.

8. Safety Procedures for Working on ROV High Voltage Equipment (Above 1kV), (2017). IMCA R005 Rev.2.

9. High Voltage Training (A syllabus for training offshore workers involved with high voltage equipment). (2006). IMCA C010.

10. Offshore vessel, High Voltage Safety. (2012). IMCA SEL031, M217.

11. High Voltage Course Criteria, Operational and Management Level. (2015). MNTB.

12. High Voltage Training Breaker, Transas. Retrieved from <https://www.transas.com/products/simulation/engine-room-and-cargo-handling-simulators/HighVoltageBreaker>.

13. K-SIM, Engine High Voltage, Kongsberg. Retrieved from <https://www.kongsberg.com/globalassets/digital/maritime-simulation/k-sim-engine/docs/high-voltage-product-sheet/k-sim-engine-high-voltage-product-sheet.pdf>.

14. Муха Н. И. Практическая подготовка судовых электромехаников на полномасштабном тренажерном комплексе. *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. 2012. Вип. 3. С. 589–593.
15. Software SFT2841, Schneider Electric. Retrieved from https://www.schneider-electric.com/en/download/document/Setup_Software_SFT2841/.
16. Protection Relay Sepam series 40, Schneider Electric. Retrieved from <https://www.schneider-electric.com/en/product-range/934-sepam-series-40/>.
17. Semiconductor devices – discrete devices. Part 9: Insulated-gate bipolar transistors (IGBT). (2007). IEC 60747-9.
18. Lamp, J. (2008). IGBT Peak Voltage Measurement and Snubber Capacitor Specification. Application Note AN-7006. SEMIKRON, 156.

REFERENCES

1. Konvenciya PDNV, (STCW). IMO, 2017. (Mezhdunarodnaya morskaya organizaciya, London).
2. Geertsma, R. D., Negenborn, R. R. & Hopman J. J. (2017). Design and control of hybrid power and propulsion systems for smart ships: A review of developments. Elsevier, Applied Energy 194, 30–54.
3. Grigorjev L. V., Petukhov V. A. *Sovremenniye i perspektivniye sudoviye valogeneratoriye ustanovki*. S-Pb. : Izdatel'stvo GMA im. adm. S.O.Makarova, 2009.
4. Chief Engineer Officer and Second Engineer Officer. 7.02. (2014). IMO. London. 278.
5. Officer in Charge of an Engineering Watch. 7.04. (2014). IMO, London. 236.
6. Electro-Technical Officer. 7.08. (2014). IMO, London. 152.
7. Engine-Room Simulator. 2.07. (2017). IMO, London. 184.
8. Safety Procedures for Working on ROV High Voltage Equipment (Above 1kV), (2017). IMCA R005 Rev.2.
9. High Voltage Training (A syllabus for training offshore workers involved with high voltage equipment). (2006). IMCA C010.
10. Offshore vessel, High Voltage Safety. (2012). IMCA SEL031, M217.
11. High Voltage Course Criteria, Operational and Management Level. (2015). MNTB.
12. High Voltage Training Breaker, Transas. Retrieved from <https://www.transas.com/products/simulation/engine-room-and-cargo-handling-simulators/HighVoltageBreaker>.
13. K-SIM, Engine High Voltage, Kongsberg. Retrieved from <https://www.kongsberg.com/globalassets/digital/maritime-simulation/k-sim-engine/docs/high-voltage-product-sheet/k-sim-engine-high-voltage-product-sheet.pdf>.
14. Mukha N. I. (2012). Prakticheskaya podgotovka sudovihkh ehlektromekhanikov na polnomasshtabnom trenazhernom komplekse. *Elektromekhanichni i energozberigayuchi sistemi*, 3.
15. Software SFT2841, Schneider Electric. Retrieved from https://www.schneider-electric.com/en/download/document/Setup_Software_SFT2841/.
16. Protection Relay Sepam series 40, Schneider Electric. Retrieved from <https://www.schneider-electric.com/en/product-range/934-sepam-series-40/>.
17. Semiconductor devices – discrete devices. Part 9: Insulated-gate bipolar transistors (IGBT). (2007). IEC 60747-9.
18. Lamp, J. (2008). IGBT Peak Voltage Measurement and Snubber Capacitor Specification. Application Note AN-7006. SEMIKRON, 156.

Іванов А. А., Авраменко М. М., Растьогіна Г. І., Тимофєєв К. В. ТРЕНАЖЕР ВИСОКОВОЛЬТНОГО ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ПІДГОТОВКИ СУДНОВИХ ФАХІВЦІВ
У роботі показана необхідність застосування високовольтного тренажера який дозволяє не тільки формувати необхідну компетентність персоналу машинного відділення, але також дає можливість

вести науково-дослідну роботу, відпрацьовувати методи і критерії оцінки компетентності, дозволяє оцінити і демонструвати отримані практичні навички та моделювання штатних та аварійних ситуацій і дій при виникненні несправностей високовольтного обладнання. Наведено функціональну схему високовольтного тренажера та показано використання його в рішенні дослідницької задачі впливу параметрів кабелю на силовий модуль інвертора перетворювача частоти.

Ключові слова: високовольтний тренажер, гребна електрична установка, симулятор, компетентність, перетворювач частоти, інвертор.

Ivanov A. A., Avramenko M. M., Rastegina G. I., Timofeev K. V. HIGH VOLTAGE SIMULATOR FOR TRAINING OF SHIP PERSONNEL

The development and implementation of actually functioning simulators of marine electrical equipment provide the necessary level of competence in the operation and maintenance of high-voltage and low-voltage electric power systems.

The work shows the possibilities of the developed high-voltage training complex for high-quality education, training and scientific research.

The need to apply the high-voltage simulator allows to form the required competence of the engine room personnel, develop methods and criteria for assessing competence, evaluate and demonstrate the practical skills obtained, and also provides an opportunity to conduct scientific research work.

The simulator reproduces most ship's operating situations, provides training on monitoring, control and operation of high-voltage power plants. In addition to various combinations and modes of operation, it is possible to simulate normal and emergency situations and action under faulty conditions of high-voltage equipment in compliance with all safety procedures by using appropriate high-voltage instruments and personal protective equipment. The gained experience and skills on the high-voltage simulator allows the machine team personnel to work on various high-voltage equipment of ships with electric movement, showing a high level of knowledge and training, and to implement the operation functions and management functions, and solve the problems of safe navigation.

The simulator was made taking into account the requirements of the PDMNV-78 Convention, section A-I / 12, therefore, the working hours of candidates on this simulator can be counted into the qualification of practical training.

The gained knowledge and experience in the field of high-voltage technologies of ship's systems will allow to increase the level of safety on ships, which is required by all international organizations.

Keywords: high-voltage simulator, electrical propulsion plant, competence, training, procedures, scientific research, frequency converter, inverter.

© Іванов А. А., Авраменко М. М., Растьогіна Г. І., Тимофєєв К. В.

Статтю прийнято
до редакції 26.03.19

MODELS OF DECISION MAKING BY A NAVIGATOR UNDER IMPLICIT AGREEMENTS WITH COLREG RULES

Nosov P. S., *Ph.D., Associate Professor of Navigation and Electronic Navigation Systems Department, Kherson State Maritime Academy, e-mail: pason@ukr.net, ORCID:0000-0002-5067-9766;*

Zinchenko S. M., *Ph.D., Senior Lecturer of Ship Management Department, Head of Laboratory navigation simulator, Kherson State Maritime Academy, e-mail: srz56@ukr.net, ORCID: 0000-0001-5012-5029;*

Ben A. P., *Ph.D., Professor, Associate Professor, Deputy Rector for scientific and pedagogical work, Kherson State Maritime Academy, e-mail: a_ben@i.ua, ORCID: 0000-0002-9029-3489;*

Nahrybelnyi Ya. A., *Ph.D., Associate Professor, Dean of Navigation Department at the Kherson State Maritime Academy, e-mail: yar1507@ukr.net, ORCID: 0000-0003-3266-5798;*

Dudchenko O. M., *Ph.D., Associate Professor, Kherson branch of the National University of Shipbuilding adm. Makarova, Ukraine, e-mail: kbnuos@gmail.com, ORCID: 0000-0002-7724-089*

The purpose of the article is the model of perception of difficult situations by the navigator where the rules of COLREG are inconsistent. To build these models, a formal analysis of the situations was carried out, which allowed to design a decision-making support system to reduce risks and accidents related to sea transport. The article presents formal approaches that take into account the factors of vessel speed, qualification of a navigator, and the situations that influence the formation of maneuvering strategies. The illustrations show difficulties and ambiguous situations from the point of view of the rules. An important factor for decision-making is the ability of an adequate perception of the situation by a navigator, and the conditions in which this process is considerably difficult are given. The arguments are made in favor of the use of ECDIS and AIS navigation information systems, and the examples that indicate the difficulties of making decisions at the time of a large number of vessels are given. A relationship between the perception of service information by the navigator and the choice of maneuvering strategies is made. The recommendations on the development of a decision-making support system for navigators in difficult navigation situations are given. The approaches to apply a decision-making support system, as well as the formation of data about the navigator are proposed.

Keywords: navigation information systems, maneuvering strategies, human factor, navigator.

DOI: 10.33815/2313-4763.2019.1.20.031-039

Introduction. Navigator controls the vessel using international rules and conventions that ensure the safety of navigation [1]. Difficult locations require from the navigator more than knowledge of the basics of international rules [2]. Hydrographs and high traffic implies the emergence of abnormal situations. Such situations introduce risk and uncertainty for the navigator [3]. A large list of accidents related to sea transport indicates that the rules do not cover all situations [4–5]. Many naval officers cite cases from world practice confirming these statistics. For example, in the general concept of COLREG it is indicated that the differences of two vessels are considered. This feature is also described in the works of S. Zinchenko [6–7] (Fig. 1). Another factor contributing to an increase in a stressful situation is high level of responsibility [8–10].

Experiments that were conducted at the Kherson State Maritime Academy confirm that an increased stress threshold arises even in simulators [11]. This means that in real conditions, stress indicators will be higher. Practice shows that in case of immediate danger or interference deviations from the rules are possible. But only the navigator determines the level of «immediacy.» This suggests that at the time of decision-making there may be an inaccuracy in assessing the situation. The opinion of one navigator may differ from the assessment of the situation of another. A difficult situation arises when it is difficult to determine the behavior strategy of navigators of other vessels in case of divergence [12].



Figure 1 – Interaction of two vessels / vessel and obstacles

The organization of the watch on the captain's bridge is very important. Errors in making decisions are increased if on the captain's bridge there is a substitution of roles in the team.

In the conditions of watch keeping, especially when practicing maneuvers in relation to locations, the decision to manage the ship is influenced by several members of the watch keeping duty. In some cases, when it's required by the changes in the situation, the captain gives the command to immediately strengthen the watch on the bridge. Typically, this decision is affected by: visibility, weather and sea conditions, the intensity of navigation and other features of the navigation situation. At the same time, the number of members of the watch keeping duty is increasing, which also contributes a factor capable of adversely affecting the decision of the navigator. To construct a formal model, consider the following scheme for the interaction of watch members. During the maneuvers, the naval officer requests the watch personnel to specify the indications of navigational instruments and other parameters necessary for steering the vessel.

In this case, local interactions occur short-term in time between the members of the watch and the deck officer (captain).

We will assume that two subjects are involved in the interaction: D is a deck officer or a captain and F is a member of the personnel on duty. In this example, the captain instructs before the start of the passage of the location, and immediately at the time the first mate takes command. Thus, the participant at number 1 (the captain) does not participate in team interaction, but can prompt the first mate. Each watch interaction solves the micro-task of steering the vessel at the current moment.

During the transition, the command performs a different kinds of tasks n consisting of a finite sequence of operations depending on the complexity $h_i, i = 1, \dots, n$. Members of the watch keeping duty D and F are divided into interacting groups D_1, \dots, D_j and F_1, \dots, F_s depending on the level of qualification and experience. This leads to the formation of groups D_L, F_S for completing the tasks n and accomplishing the result K_i^L, \bar{K}_i^S .

But the transition from dynamic positioning to manual vessel control may cause inadequate response of specialists if the team is not ready. Testing of such events were conducted on the navigation simulator NTPRO 5000 and confirmed our fears. The experiment has shown that the actions of navigators with the loss of control over the vessel cause spontaneous movements on the bridge.

At a certain point in time, the watch keeping begins to independently make decisions from the whole team, this can be seen in the chronology of events (Fig. 2):



Figure 2 – Interference with the navigation watch

A study of the trajectory of the control vessel confirmed the fact of loss of control. A computer program was developed to analyze the vessel's control path. The graph shows that loss of control occurs soon after turning off the dynamic positioning due to the human factor (Fig. 3).

There is a direct relationship between the spontaneous behavior of the watch crew and the loss of control over the vessel. Therefore, it is important to track the movements of the watch crew on the bridge using software tools. These software tools are important to add to the overall complex of the decision support system of the navigator.

The navigator needs to know the characteristics of maneuvering other vessels in such situations [13]. Maneuvering situations often lead to a vessel drift. For example, the navigator is forced to increase the speed of the vessel in order to have time to make a U-turn near Ma Van in Hong Kong (Fig. 4) [14].

This situation forces you to make a difficult decision, the risk of a vessel being stranded or avoiding collision with a counter vessel. The cases that were considered in the introduction a lot and it speaks of the problem of perception of the navigator.

The purpose of the article is to simulate the perception of difficult situations by the navigator where the rules are rejected. Formal analysis will allow to design a decision support system for the navigator. The system will significantly reduce the risks and accidents on maritime transport in situations that are considered.

The solution of the problem. The considered task is defined by various vessels and trajectories of movement. An example of such a task can be considered in the location of New York. The figure shows a large accumulation of vessels - targets on the radar (Fig. 5).

This task consists in finding patterns of navigator behavior in situations that are not provided for by the COLREG rules. Models of navigator behavior must pass the stage of formalization and further algorithm.

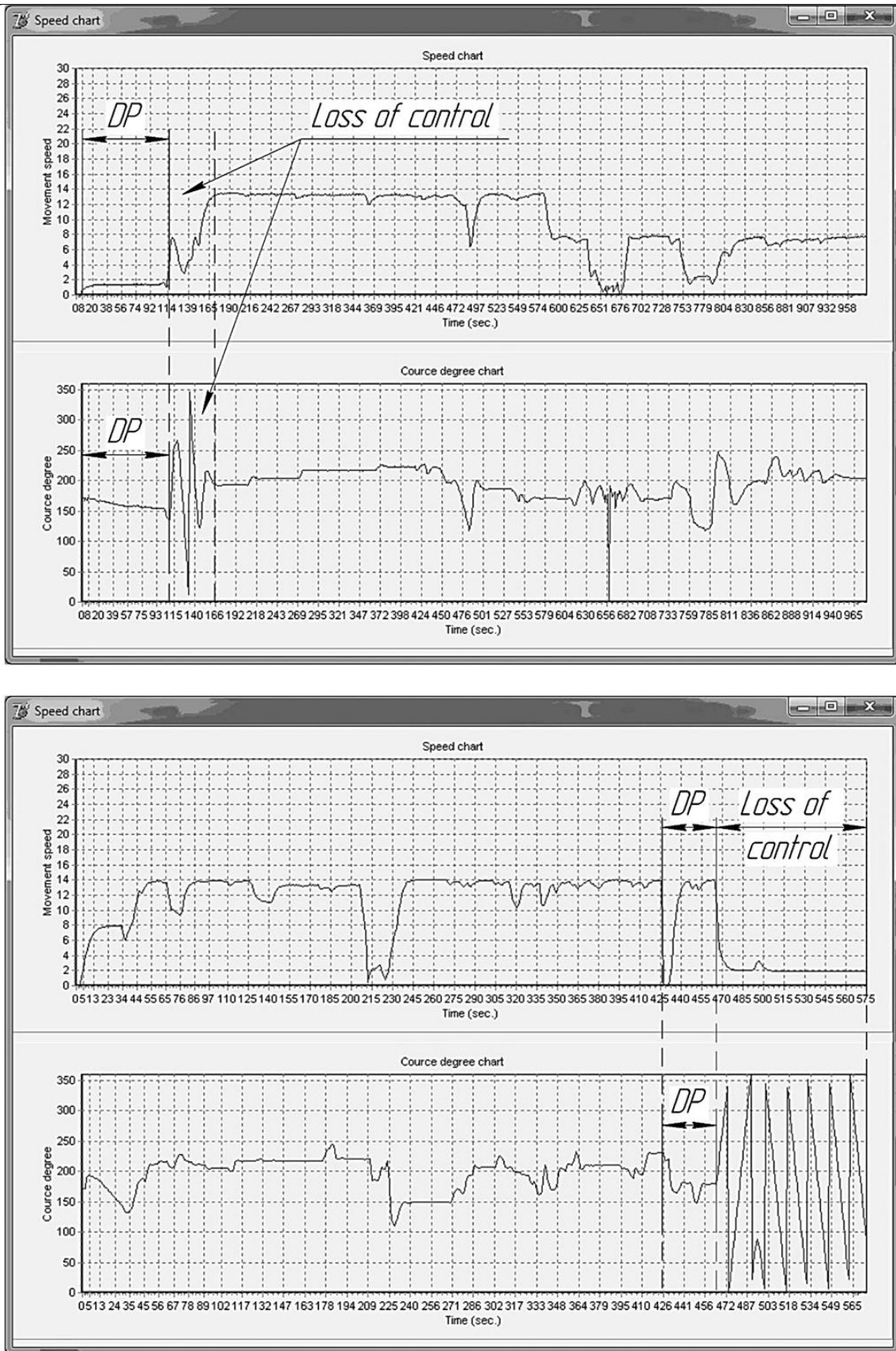


Figure 3 – Periods of loss of control due to the fault of the human factor



Figure 4 – Satellite image of difficult location and navigation map

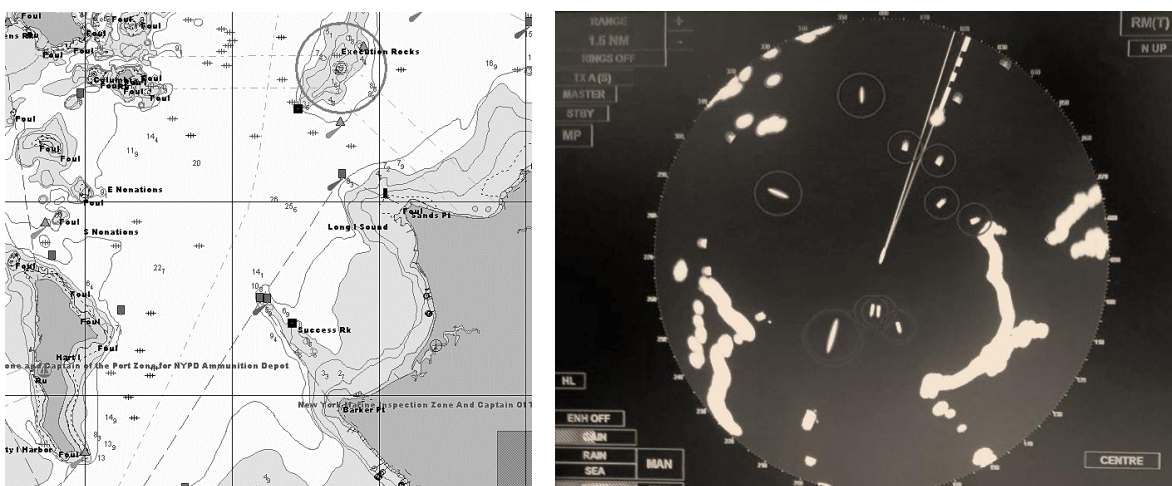


Figure 5 – Fragment of the navigation map and the image of the radar

The set of vessels will be represented as $Q = \{1, 2, \dots, q\}$. Factor deviations from the rules will be $\gamma \in \Delta$. This factor will be taken into account by all location navigators. Each navigator determines the strategy of behavior I_i , including maneuvers γ_i . Each navigator assumes the strategy of the behavior of another navigator, especially a vessel with a heading $\gamma_{ij} \in \Omega, j \in Q$. The strategy of the third vessel is considered first as $\gamma_{ijk} \in \Delta, j, k \in Q$. The number increases depending on the number of participants $\gamma_{ij_1 \dots j_l} \in \Delta, j_1, \dots, j_l \in Q$.

Situations can be described formally as follows $S_{t_1} = \{Q', (P_i)_{i \in Q}, f_i(\cdot)_{i \in Q}, I\}$, where, Q' – a set of navigators, P_i – a set of actions navigators.

This model is represented by the target function: $f_i(\cdot): \Delta \times P_1 \times \dots \times P_n \rightarrow \mathcal{R}^n$.

The perception of each navigator determines the mechanism for triggering a maneuvering strategy. Observation of the area allows the navigator to determine its position in the interaction of several participants in the event. Event participants can be divided into two conditional groups. The first group is active, which affects the strategy of other navigators on the map B . The second group is passive, which is in standby mode and adapts to the actions of the first G . A maneuver is considered effective if the risk is reduced when moving to a new state in a given area w

1. The divergence of the two vessels to minimize risks:

$$G(w) + B \xrightarrow{\xi_{t,r}} G(w)_1 + G(w)_2 \quad (1)$$

2. The status of the navigator becomes active, a maneuver is performed:

$$G(w) \xrightarrow{\xi_{t,r}} B \tag{2}$$

3. Navigator decides to give the other vessel:

$$B \xrightarrow{\xi_{t,r}} G(w) \tag{3}$$

4. Navigator changes the area for better maneuvering:

$$G(w)_1 + G(w^*)_2 \xrightarrow{\xi_{t,w^*} > \xi_{t,w}} G(w)_1 + G(w)_2 \tag{4}$$

where, $\xi_{t,w}, \xi_{t,w^*}$ – probabilities of transition states.

The main criterion of effectiveness is the value of the probability of the chosen strategy. Communication with the nearest vessels increases the likelihood of a result, but vessels of the second radius do not participate in the interaction. Navigator has the opportunity to observe the developments of the nearest vessels. His experience may allow to expand the number of vessels surveyed, but even an experienced captain cannot predict all events (Fig. 6).

Navigation equipment ECDIS, AIS signals about intersecting courses and dangerous proximity with other vessels, but does not provide information about the strategies chosen by navigators.

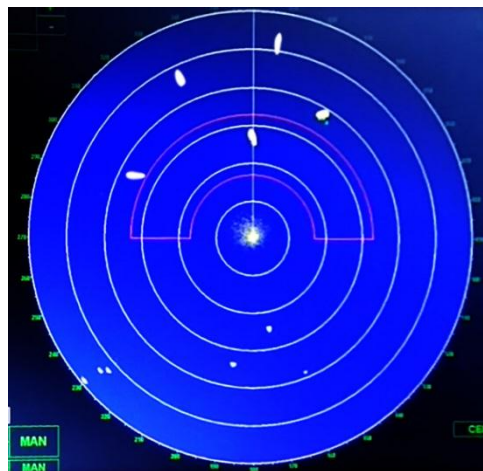


Figure 6 – Multiple strategies

The strategy is effective when the safety of further navigation at a high level. The linguistic safety scale has several levels: “catastrophe”, “dangerous”, “increased attention”, “usual situation”, “time to make decisions”. A completed maneuver results in one of the listed conditions. ξ_{P_i} .

Each navigator is in one of three states: 1 – the vessel follows to the waypoint without visible obstacles; 2 – the vessel is in the zone of increased attention and the navigator determines the strategy for maneuvering; 3 – the navigator performs a divergence maneuver.

This classification identifies three main criteria for assessing each state: 1 – navigator fatigue a ; 2 – security level W ; 3 – time spent on maneuver τ . The fatigue of the navigator increases depending on the sequence and complexity of the maneuvers performed during the passage of the location:

$$a_s = a_{s,t}^0 + a_{s,t+1}^1, \dots, a_{s,t+q}^k \tag{5}$$

The fatigue of the navigator directly depends on the intensity of the occurrence of difficult situations when maneuvering a vessel. The intensity index also depends on the congestion zones of the sea transport [16]. The higher the accuracy of maritime transport, the higher the likelihood of fatigue in the navigator. The difficulty lies in the fact that the navigator initially chooses the

basic average speed when planning the transition route (Fig. 7). This fact complicates the situation, because for emergency braking it takes a lot of time.



Figure 7 – Calculation of the average speed in ECDIS

To ensure sufficient security, it is necessary not to exceed the maximum speed $y^{\max,i}$. In this case, the navigator will have time to prevent a collision with the help of divergence maneuvers. The selected safe speed of the vessel \dot{y} will be (6):

$$\dot{y} = \begin{cases} \dot{y}^i, & \text{if } y < y^{\max,i}, t \in [t_b^i; t_b^i + T_b^i], w \in S^i \quad \forall \tau \\ 0, & \text{elce} \end{cases} \quad (6)$$

where t_b^i – the beginning of entry into the zone of increased attention; T_b^i – the duration of the maneuver on the discrepancy; S^i – territory, which is characterized by the presence of a difficult situation; \dot{y}^i – permissible speed of sea transport.

Conclusion. The higher the experience and qualifications of the navigator, the more accurately the vessel’s speed and types of maneuvering are chosen. We denote the integral indicator of experience-qualification as Z . The final group of navigators define the set $Z = \{Z_{t_1}, \dots, Z_{t_k}\}$. Each navigator chooses an action with respect to the adopted strategy $\{p_{t_1}, \dots, p_{t_k}\}$, $p_{t_k} \in P_{\zeta(t_k)}$, $k \in \{1, \dots, y\}$, where ζ determines its belonging to the COLREG rule.

In this case, the objective function will be: $f_t = (y_{t_1}, p_{t_1}, \dots, p_{t_k})$. Then, when designing algorithms, lowering the risk level is possible by identifying the complexity of the situation. However, at the moment there are no systems allowing to classify the situation with a high degree of accuracy. Visual observation does not give complete information about what is happening. Many vessels with different strategies make significant adjustments, complicating the process. Further research will be focused on the development of automated tools for identifying navigator strategies.

REFERENCES

1. Zobair Ibn, Awal & Hasegawa, K. (2017) A Study on Accident Theories and Application to Maritime Accidents. *Procedia Engineering*, Vol. 194, 298–306. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.08.149.
2. Havold, J. I. (2010). Safety culture and safety management aboard tankers. *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 95, Issue 5, 511-519. DOI: 10.1016/j.res.2010.01.002.

3. Rolf, J. Bye & Asbjørn L. Aalberg (2018) Maritime navigation accidents and risk indicators: An exploratory statistical analysis using AIS data and accident reports. *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 176, 174–186. DOI: 10.1016/j.res.2018.03.033.
4. Ming-Cheng, Tsou. (2016). Multi-target collision avoidance route planning under an ECDIS framework. *Ocean Engineering*, Vol. 121, 268–278. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2016.05.040.
5. Puisa, R., Lin, L., Bolbot, V. & Vassalos, D. (2018). Unravelling causal factors of maritime incidents and accidents. *Safety Science*, 110(A), 124–141. DOI: 10.1016/j.ssci.2018.08.001.
6. Zinchenko, S., Nosov, P., Mateichuk, V., Mamenko, P. & Grosheva, O. (2019). Automatic collision avoidance with many targets, including maneuvering ones. *MNPK pamiati profesoriv Fomina Yu. Ya. i Semenova V. S. (FS-2019)*, 24 – 28 kvitnia 2019, Odesa – Stambul – Odesa, 343–349.
7. Zinchenko S., Nosov P., Mateichuk V., Mamenko P. & Grosheva O. (2019). Use of navigation simulator for development and testing ship control systems. *MNPK pamiati profesoriv Fomina Yu. Ya. i Semenova V. S. (FS-2019)*, 24 – 28 kvitnia 2019, Odesa – Stambul – Odesa, 350–355.
8. Özkan, Uğurlu, Serdar, Yıldız, Sean, Loughney & Jin, Wang (2018). Modified human factor analysis and classification system for passenger vessel accidents (HFACS-PV). *Ocean Engineering*, Vol. 161, 47–61. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2018.04.086.
9. Emre, Akyuz. (2016). Quantitative human error assessment during abandon ship procedures in maritime transportation. *Ocean Engineering*, Vol. 120, 21–29. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2016.05.017.
10. Xi Y. T., Yang Z. L., Fang Q. G., Chen W. J., & Wang J. (2017). A new hybrid approach to human error probability quantification–applications in maritime operations. *Ocean Engineering*, Vol. 138, 45–54. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2017.04.018.
11. Nosov P. S., Ben A. P., Mateichuk V. N., Safonov M. S. (2018) Identification of “Human error” negative manifestation in maritime transport. *Radio Electronics, Computer Science, Control. Zaporizhzhia National Technical University*, № 4 (47), 204–213. DOI: 10.15588/1607-3274-2018-4-20.
12. Tor A., Johansen, Andrea, Cristoforo & Tristan Perez. (2016). Ship Collision Avoidance Using Scenario-Based. *Model Predictive Control*. IFAC.
13. Ventikos N. P., Papanikolaou A. D., Louzis K. & Koimtzoglou A. (2018). Statistical analysis and critical review of navigational accidents in adverse weather conditions. *Ocean Engineering*, Vol. 163, 502–517. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2018.06.001.
14. Yuanzhi, Zhang, Erjia, Ge. (2013). Temporal scaling behavior of sea-level change in Hong Kong – Multifractal temporally weighted detrended fluctuation analysis. *Global and Planetary Change*, Vol. 100, 362–370. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2012.11.012.
15. Seabrooke, W., Hui, E. C. M, Lam, W. H. K. & Wong, G. K.C. (2003) Forecasting cargo growth and regional role of the port of Hong Kong. *Cities*, 20(1), 51–64. DOI: 10.1016/S0264-2751(02)00097-5.

Носов П. С., Зинченко С. Н., Бень А. П., Нагрибельный Я. А., Дудченко О. Н. МОДЕЛИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ НАВИГАТОРОМ ПРИ НЕЯВНЫХ СОГЛАСОВАНИЯХ С ПРАВИЛАМИ МППСС

Целью статьи являются модели восприятия штурманом сложных ситуаций, в которых несогласованы правила МППСС. Для построения данных моделей проведен формальный анализ ситуаций, что позволило спроектировать систему поддержки принятия решений для уменьшения рисков и аварийности на морском транспорте. В статье приводятся формальные подходы учитывающие факторы скорости движения судна, квалификации штурмана и условий влияющих на формирование стратегий маневрирования. Приведены иллюстрации показывающие сложности и неоднозначные с точки зрения правил обстоятельства. Важным фактором для принятия решений остается способность адекватного восприятия ситуации штурманом, приведены условия, в которых данный процесс значительно затруднен. Приводится аргументация в пользу применения навигационных информационных систем ECDIS и AIS, приведены примеры, указывающие на

трудности принятия решений в момент скопления большого количества судов. Проводится зависимость между восприятием служебной информации штурманом и выборе стратегий маневрирования. Даны рекомендации по разработке системы поддержки принятия решений штурманом в сложных навигационных ситуациях. Предложены подходы применения системы поддержки принятия решений, а также формирования данных о штурмане.

Ключевые слова: навигационные информационные системы, стратегии маневрирования, человеческий фактор, штурман.

Носов П. С., Зінченко С. М., Бень А. П., Нагрибельний Я. А., Дудченко О. М. МОДЕЛІ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ НАВІГАТОРОМ ПРИ НЕЯВНИХ УЗГОДЖЕННЯХ З ПРАВИЛАМИ МППСС

Метою статті є побудова моделі сприйняття штурманом складних ситуацій, де неузгоджені правила МППСС. У реальних умовах виникає протиріччя між вимогами міжнародних правил та високим трафіком морських перевезень. Особливі ускладнення у роботі судноводія виникають також під час виконання маневрів при розходженні суден з багатьма цілями, що також супроводжується факторами стресу та невизначеності. Такі обставини суттєво впливають на рівень безпеки під час переходу у проливах та небезпечних районах мореплавання.

З метою більш глибокого аналізу було проведено ряд експериментів засобами морських навігаційних стимуляторів у рамках проведення тренажерної підготовки з кадетами що підтверджують гіпотезу статті про виникнення ситуацій які змушують судноводія відхилитися від правил МППСС. Враховуючи даний факт у статті було запропоновані моделі щодо визначення стратегії поведінки судноводіїв під час нестандартних ситуацій при розходженні з суднами у вузькостях.

Для побудови даних моделей проведено формальний аналіз ситуацій, що дозволяє спроектувати систему підтримки прийняття рішень для зменшення ризиків та аварійності на морському транспорті.

У статті визначено що під час виникнення помилок членами навігаційної вахти на капітанському містку при управлінні судном виникають несанкціоновані зміни ролей, коли член вахти тимчасово замінює іншого без дозволу капітана або старшого помічника. Таким чином формується стала реакція що змушує в окремих випадках спотворювати як спектр уваги кожного учасника ситуації так і сприяти розвитку практичних навичок щодо подолання складних ситуацій відповідно до кваліфікаційних вимог судноводія.

Враховуючи складність навігаційної ситуації, а також можливість прояву несприятливих погодних умов та інтенсивність морського трафіку за розпорядженням капітана вахта може бути підсилена що також впливає на модель поведінки кожного судноводія і формує його стратегію на майбутнє.

У статті наводяться формальні підходи що враховують фактори швидкості руху судна, кваліфікацію штурмана і ситуації, що впливають на формування стратегій маневрування. Наведені ілюстрації показують складності і неоднозначні з точки зору правил обставини. Важливим фактором для прийняття рішень залишається здатність адекватного сприйняття ситуації штурманом. Наводиться аргументація на користь застосування навігаційних інформаційних систем ECDIS і AIS, наведені приклади, що вказують на труднощі прийняття рішень в момент скупчення великої кількості суден.

Приводиться залежність між сприйняттям службової інформації штурманом і виборі стратегій маневрування. Дано рекомендації з розробки системи підтримки прийняття рішень штурманів в складних навігаційних умовах. Запропоновано підходи застосування системи підтримки прийняття рішень, а також формування даних про штурмана.

Ключові слова: навігаційні інформаційні системи, стратегії маневрування, людський фактор, штурман.

© Носов П. С., Зінченко С. М., Бень А. П., Нагрибельний Я. А., Дудченко О. М.

Статтю прийнято
до редакції 18.05.19

ОСОБЕННОСТИ КОНТРОЛЯ ОСТОЙЧИВОСТИ БУКСИРНЫХ СУДОВ ПРИ МАНЕВРИРОВАНИИ НА ШЕЛЬФЕ

Товстокорый О. Н., к.т.н., заведующий кафедрой управления судном Херсонской государственной морской академии, e-mail: otovstokory@gmail.com, ORCID: 0000-0003-3048-0028;

Нестеренко В. Б., старший преподаватель кафедры управления судном Херсонской государственной морской академии;

Завальнюк О. П., к.т.н., доцент кафедры эксплуатации судового электрооборудования и средств автоматики Херсонской государственной морской академии, Украина, e-mail: olgazavalnjuk82@gmail.com, ORCID: 0000-0003-3755-8350

В последнее время большое развитие получили операции на шельфе по установке, обслуживанию буровых платформ, элементов нетрадиционных видов энергетики, прокладке и обслуживанию подводных трубопроводов, кабелей и т.д. В процессе выполнения таких операций мореходные качества судов, их маневрирование в значительной степени отличаются от маневрирования обычных транспортных судов. Это касается также требований и контроля состояния остойчивости при проведении операций по буксировке и завозке якорей. В последнее время произошло несколько крупных аварий судов во время буксировки и завозки якорей, повлекших человеческие жертвы и утраты судов. Основной причиной этих аварий была потеря остойчивости и опрокидывание судов из-за резкого усиления натяжения буксирного троса в траверсном направлении, а также «человеческий элемент», который руководил операциями, но допустил развитие процесса гирдинга, что привело к аварийному исходу. Сложность специфичной работы оффицерных буксиров должна быть хорошо понятна и объяснима не только операторам-буксировщикам, но и судоводителям буксируемых объектов, которые часто становятся свидетелями, а нередко пассивными соучастниками трагедии. Знание и понимание технических процессов, происходящих на буксирных судах при буксировке, позволило бы судоводителям буксируемых объектов или вспомогательных судов, участвующих в буксировке, в случае опасности появления гирдинга включаться непосредственно в процессы буксировки, активно влиять на безопасность ситуации активным торможением объекта, увеличением скорости, если объект самоходный, отдачей якоря или якорей, перекладкой руля с целью изменения курса или торможения. ИМО ведущие классификационные общества ужесточили требования к остойчивости судов, участвующих в проведении таких операций, и издали ряд документов, регламентирующих вопросы безопасности. Так, были регламентированы требования по учету кренящего момента от натяжения буксирного троса, по ограничению угла крена от натяжения буксирного троса, по максимальному натяжению троса, по аварийной отдаче буксирного троса в опасной ситуации. Разработаны рекомендации по предотвращению ситуации гирдинга и выходу из нее. Следует также подчеркнуть, что учебный процесс подготовки морских специалистов по исследуемой проблеме остается в стороне, тогда как деятельность ИМО, ведущих мировых классификационных сообществ и организаций-партнеров по совместной разработке месторождений и добычи углеводородов непрерывно направлена на развитие вопросов безопасности.

Обоснована необходимость включения раздела «Остойчивость судов при выполнении буксировочных работ и работ по завозке якоря» в учебные программы морских учебных заведений.

Ключевые слова: остойчивость судов, буксировка, завозка якорей, кренящий момент, угол крена, гирдинг.

DOI: 10.33815/2313-4763.2019.1.20.040-046

Постановка проблемы в общем виде и ее связь с важными научными или практическими задачами. В последнее время большое развитие получили операции судов на шельфе. Это направление в большей мере связывалось с развитием нефтяной и газодобывающей отраслей промышленности, но сейчас оно распространилось и на другие виды деятельности, такие, как установка ветроэнергетических модулей, добыча полезных ископаемых и т.д. Во время этих операций маневрирование судов в значительной мере отличается от маневрирования обычных транспортных судов. В учебной программе дисциплины «Управление судном» подготовки бакалавров судовождения в Херсонской государственной морской академии (ХДМА) это уже нашло свое отражение. Вместе с тем,

при выполнении некоторых видов операций следует рассматривать специфический подход к расчету и контролю остойчивости судов. Это касается, в первую очередь, судов, участвующих в буксировочных операциях и операциях по завозке якорей.

Анализ последних достижений и публикаций, в которых начато решение данной проблемы и выделение нерешенных ранее частей общей проблемы. При выполнении операций судами на шельфе нередки аварийные случаи. Так, согласно [1] расследован случай с опрокидыванием и затоплением буксира «STEVENS POWER» во время операций по завозке якорей судна-трубоукладчика «CASTORO OTTO» 19.10.2003 у побережья Нигерии. В [2] расследован аварийный случай с опрокидыванием и затоплением буксира «BOURBON DOLPHIN» во время операций по завозке якорей для полупогруженной буровой вышки «TRANSOCEAN RATHER» 12.04.2007 к западу от Шетландских островов. Согласно [3] расследован случай с опрокидыванием и затоплением буксира «NORTH ARM VENTURE» во время буксировки баржи «NORTH ARM EXPRESS» 02.07.2009 из Toba Inlet в Sechelt Inlet (Канада). В [4] сообщается о случае опрокидывания и затопления буксира «ИССЫК-КУЛЬ» во время отшвартовки т/х «NOMADE EAGLE» 05.02.2013 от причала №2 ССР «Океан» (Николаев). В [5] отмечается случай с опрокидыванием и затоплением буксира для завозки якорей «JASCON 4» во время буксировочных операций по удержанию танкера во время погрузочных операций у грузового буя в открытом море 26.05.2013 у побережья Нигерии.

Из вышеприведенных фактов следует, что случаи опрокидывания и затопления буксировщиков происходили как во время операций по завозке якорей, так и при буксировочных операциях, причем как с малыми буксировщиками, так и с крупными.

Минимальный объем курса «Stability», рекомендованного Международной морской организацией в модельных курсах 7.01 и 7.03 [6-7], не предусматривает изучения вопросов остойчивости оффшорных судов в случаях, когда эти суда привлекаются к буксировкам объектов и завозке якорей.

Формулирование целей статьи (постановка задачи). Целью данной статьи является обоснование необходимости включения раздела «Остойчивость судов при выполнении буксировочных работ и работ по завозке якоря» в учебные планы и программы учебных дисциплин морских учебных заведений.

Изложение материала исследования с обоснованием полученных научных результатов. Во всех случаях, согласно официальным «casualty reports», причиной аварий стало явление, называемое «girding», то есть резкое увеличение нагрузки на буксирный трос в траверзном направлении, и невозможность выйти из опасной ситуации путем маневрирования двигателями, что приводило к резкому, значительному крену и опрокидыванию.

Так как управление буксирами осуществлялось квалифицированными офицерами, можно в причинах аварии указать и «человеческий элемент». Очевидно, что не все меры были предприняты экипажами буксиров, нельзя исключать вариант не совсем верных, а может и ошибочных решений. Все это свидетельствует о недостаточно глубокой подготовке судоводителей и/или недостаточном изучении процессов, происходящих при буксировке.

В мировом морском сообществе этой проблеме уделялось определенное внимание и ранее, до описанных выше событий.

Так, в [8] судам-снабженцам в оффшоре посвящалась глава 4.5 «Offshore supply vessels», где в пункте 4.5.6.2 перечислены критерии остойчивости для таких судов, где, в частности, указывалось, что:

– площадь под кривой восстанавливающих моментов (кривая GZ) должна быть не менее 0,070 метр-радиан до угла крена 15°, если максимальное плечо восстанавливающего момента (GZ) наблюдается при 15° и 0,055 метр-радиан до угла крена 30°, если максимальное плечо восстанавливающего момента (GZ) наблюдается при 30° и более. Когда максимальное плечо восстанавливающего момента (GZ) наблюдается между 15° и

30° , соответствующая площадь под кривой восстанавливающих моментов должна быть не менее: $0,055 + 0,001(30^\circ - \theta_{\max})$ метр-радиан;

– площадь под кривой восстанавливающих моментов (кривая GZ) между углами крена 30° и 40° или между 30° и θ_{\max} , если этот угол меньше 40° , должна быть не меньше чем 0,03 метр-радиан;

– плечо восстанавливающего момента (GZ) должно быть не меньше 0,20 м при угле крена, равному или больше чем 30° ;

– максимум диаграммы статической остойчивости (GZ) должен быть при угле крена не менее чем 15° ;

– начальная метацентрическая высота (GM_0) должна быть не менее 0,15 м.

Практически все критерии остойчивости соответствуют или близки по значениям критериям остойчивости транспортных судов, хотя условия работы буксиров несколько напряженнее, а риски происшествий намного реальнее.

В [9], после катастрофы «BOURBON DOLPHIN» появились дополнения. Так в Части В. «Рекомендации для определенных типов судов и дополнительные указания» в главе 2.4 «Offshore supply vessels», кроме приведенных выше критериев, добавился еще один: учитывать требования Части А, от 2.1.3. до 2.1.5 и Части В, 5.1.

В этих разделах повышаются требования к остойчивости буксиров, учету различных факторов, влияющих на остойчивость. В «General precautions against capsizing» об остойчивости судов указывается, что суда, занятые в буксировочных операциях, должны иметь достаточный запас остойчивости, чтобы противостоять кренящему моменту, возникающему от действия буксирной линии без угрозы безопасности буксирующему судну. Палубный груз на борту буксировщика должен быть размещен таким образом, чтобы не ставить под угрозу безопасную работу экипажа на палубе, не мешать правильному функционированию буксирного оборудования, а также быть правильно закрепленным. Оснастка буксирной линии должна включать буксировочную «пружину» и устройство для быстрой отдачи буксирного троса.

Эти вопросы являются составной частью компетентности судоводителей [10], и самым внимательным образом нуждаются в изучении в морском учебном заведении с ситуативным разбором всех элементов в условиях, близких к реальным и нестандартным.

Ведущие мировые классификационные сообщества также уделили внимание проблеме безопасности буксирных судов. Например, Bureau VERITAS (BV) в [11] рассмотрело вопросы безопасности касательно следующих аспектов: остойчивость судов ($24 \text{ м} \leq L \leq 100 \text{ м}$); остойчивость неповрежденного судна (ссылка на IS Code 2008, IMO Res.MSC.267(85));

BV выразило беспокойство о том, что требуемая минимальная начальная метацентрическая высота ($GM_0 = 0,15 \text{ м}$) не является достаточной для судов, занятых буксировочными операциями, а критерия динамической остойчивости при буксировке, который включен в требования для предотвращения гирдинга при буксировке, просто не существует. Нет также критериев остойчивости для судов, вовлеченных в операции заправки якорей.

Проблеме остойчивости оффшорных судов посвящены также следующие документы [12]:

– NMD (Norwegian Maritime Directorate) Циркуляр – Series V, RSV 04-2008, 14.07.2008;

– IMO Sub-Committee SLF 52, пункт рабочей программы по минимуму остаточной остойчивости во время операций по загрузке якоря, также других операций, где суда подвергаются воздействию аналогичных значительных внешних воздействий (Норвегия) был подготовлен к MSC 88 на декабрь 2010;

IMO Sub-Committee SLF 52 рассматривает вопросы, касающиеся остойчивости судов во время заправки якоря, где предусмотрено, что расчеты должны быть сделаны для максимально допустимых вертикальных и горизонтальных (поперечных) сил/натяжений,

которые может испытать судно в наиболее неблагоприятных условиях для поперечных сил/натяжений до достижения максимального угла крена, ограниченного одним из следующих углов, в зависимости от того, который из них меньше:

1. Угол крена эквивалентный значению GZ , соответствующему 50% от GZ_{\max} ;
2. Угол заливания рабочей палубы, причем палуба считается плоской;
3. 15° .

Должны быть приняты во внимание типичные условия завозки якоря, включая критические промежуточные состояния.

В результате всестороннего изучения данного вопроса было установлено, что шесть организаций, связанных с разработкой и добычей углеводородов в море, а именно: «Norwegian Ship owners' Association»; «Norwegian Oil and Gas Association» (бывшая «Norwegian Oil Industry Association (OLF)»); «Netherlands Oil & Gas Production Association»; «Danish Ship owners Association»; «Oil & Gas UK»; «United Kingdom Chamber of Shipping» совместно разработали и ввели в действие «Guidelines for Offshore Marine Operations» Revision: 0611-1401 от 06/11/2013. В этом руководстве [13] отражены новые требования к остойчивости судна во время проведения буксировочных операций и операций по завозке якоря.

Некоторые положения данного руководства относительно остойчивости судов приводятся ниже, в том числе о том, что остойчивость судна является объектом ответственности капитана, и должна быть проверена перед началом операций с мобильными оффшорными объектами (МОО). В дополнение к обычным условиям плавания расчет остойчивости должен включать в себя худший случай и предполагать сценарии, которые могут иметь место в период проведения операции и в случае ее задержки. Должны быть приняты во внимание расход топлива, воды и других запасов одновременно с погрузкой и выгрузкой цепи или троса.

Любые специфические условия, ограничивающие остойчивость судна (например, использование и ограничения танков для успокоения качки, требования о минимальном запасе топлива и свободных поверхностях) должны приниматься во внимание, быть доступными и понятными для всех участников процесса.

Расчеты должны показать максимальное допустимое натяжение троса/цепи, включая любую поперечную силу, что должно быть приемлемым для того, чтобы максимальное наклонение судна было лимитировано одним из следующих углов:

1. Угол крена эквивалентный значению GZ , соответствующему 50% от GZ_{\max} ;
2. Угол заливания рабочей палубы, причем палуба считается плоской;
3. 15° .

Таким образом, выяснено, что аналогичные требования по ограничению максимального наклонения судна под действием рабочих нагрузок якорного каната или завозимого якоря были установлены группой организаций-партнеров по совместной разработке месторождений и добычи углеводородов в Северном море.

Сложность специфичной работы оффшорных буксиров должна быть хорошо понятна и объяснима не только операторам-буксировщикам, но и судоводителям буксируемых объектов, которые часто становятся свидетелями, а нередко пассивными соучастниками трагедии. Знание и понимание технических процессов, происходящих на буксирных судах при буксировке, позволило бы судоводителям буксируемых объектов или вспомогательных судов, участвующих в буксировке, в случае опасности появления гирдинга включаться непосредственно в процессы буксировки, активно влиять на безопасность ситуации активным торможением объекта, увеличением скорости, если объект самоходный, отдачей якоря или якорей, перекладкой руля с целью изменения курса или торможения.

Выводы и перспектива дальнейшей работы по данному направлению.

Учитывая вышеизложенное, можно сделать следующие выводы:

1. В последнее время произошло несколько крупных аварий судов во время буксировки и завозки якорей, повлекших человеческие жертвы и утраты судов. Основной причиной этих аварий была потеря остойчивости и опрокидывание судов из-за резкого усиления натяжения буксирного троса в траверзном направлении, а также «человеческий элемент», который руководил операциями, но допустил развитие процесса гирдинга, что привело к аварийному исходу;

2. Международные морские организации отреагировали на данную проблему и выработали требования к регламентированию остойчивости во время буксировочных операций и операций по завозке якорей. Эти требования отражены в руководящих документах;

3. Однако в документах, регламентирующих обучение персонала судов, дополнений изменений касательно остойчивости при проведении таких операций сделано не было. Поэтому данный вопрос не включен в учебные программы морских учебных заведений и не изучается при подготовке специалистов флота.

4. Предлагается включить вопросы изучения остойчивости при проведении буксировочных операций и операций по завозке якорей в программы обучения курсантов морских учебных заведений.

5. Перспектива дальнейших исследований авторов будет направлена на разработку дополнения к компетенции судоводителя (Function 3: Controlling the Operation of the Ship and Care for Persons on Board at the Management Level [6]), предусматривающее углубление знаний и понимания морским специалистом процесса буксировки.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. «STEVENS POWER». Capsizing and foundering during anchor handling operation on 19 October 2003. Casualty report. Division for investigation of maritime accident Danish Maritime Authority. Date 28 June 2004. Case: 199940518. URL: <http://www.emsa.europa.eu/Documents/medias/11-171.pdf/>.

2. The Loss of the «BOURBON DOLPHIN» on 12 April 2007. NOU. Official Norwegian Reports. 2008: 8. Government Administration Services. Information Management. Oslo 2008. URL: <https://www.regjeringen.no/en/dokumenter/nou-2008-8/>.

3. Marine investigation report M09W0141 tug «NORTH ARM VENTURE» while towing the barge «NORTH ARM EXPRESS» entrance to Sechelt rapids, British Columbia, 19 July 2009 URL: <http://www.tsb.gc.ca/eng/rapports-reports/marine/2009/>.

4. Акт розслідування аварійної морської події – перевертання та затоплення буксира «ИССЫК-КУЛЬ» під час виводу із акваторії суднобудівельного заводу «Океан» теплоходу «NOMAD EAGLE», 05.02.2013. Комісія Укрморречінспекції. 28.02.2013. Київ URL: <https://www.sismit.gov.ua/>.

5. Tugboat «JASCON 4» sinks in heavy weather off Nigeria. May 29, 2013. URL: <https://www.gcaptain.com/tugboat-jascon-sinks-heavy-weather/>.

6. Model Course 7.01 Master and Chief Mate. London : IMO, 2014. 352 p.

7. Model Course 7.03 Officer in charge of a navigational watch. London: IMO, 2014. 274 p.

8. Resolution IMO A.749(18) dd 04.11.1993 «Code of intact stability for all types of ships covered by IMO instruments». URL: <http://www.imo.org/>.

9. Resolution MSC.267(85) (adopted on 4 December 2008) adoption of the International code on intact stability, 2008 (2008 IS CODE). URL: <http://www.imo.org/>.

10. Международная конвенция о подготовке и дипломировании моряков и несении вахты. Лондон : ИМО, 2011. 413 с.

11. Gijsbert De Jong, Bureau Veritas. Olivier Daniel, Groupe Bourbon. OSV Rules & Regulations. Regulatory Developments & Practical Applications. OSV Summit 2010. London, 23-24 March 2010. URL: <http://www.bureauveritas.com/>.
12. IMO Sub-Committee SLF 52. URL: <http://www.imo.org/>.
13. Guidelines for Offshore Marine Operations. Revision: 0611-1401 on 06/11/2013. *The North West European Area*. URL: <http://www.g-omo.info/>.

REFERENCES

1. «STEVENS POWER». Capsizing and foundering during anchor handling operation on 19 October 2003. Casualty report. Division for investigation of maritime accident Danish Maritime Authority. Date 28 June 2004. Case: 199940518. Retrieved from <http://www.emsa.europa.eu/Documents/medias/11-171.pdf/>.
2. The Loss of the «BOURBON DOLPHIN» on 12 April 2007. NOU. Official Norwegian Reports. 2008: 8. Government Administration Services. Information Management. Oslo 2008. Retrieved from <https://www.regjeringen.no/en/dokumenter/nou-2008-8/>.
3. Marine investigation report M09W0141 tug «NORTH ARM VENTURE» while towing the barge «NORTH ARM EXPRESS» entrance to Sechart rapids, British Columbia, 19 July 2009. Retrieved from <http://www.tsb.gc.ca/eng/rappports-reports/marine/2009/>.
4. Akt rozsliduvannia avariinoi morskoi podii – perevertannia ta zatoplennia buksyry «ИССЫК-КУЛЬ» pid chas vyvodu iz akvatorii sudnobudivelnoho zavodu «Okean» teplokhodu «NOMAD EAGLE», 05.02.2013. Komisiia Ukrmorrinchinspektsii. 28.02.2013. Kyiv. Retrieved from <https://www.sismit.gov.ua/>.
5. Tugboat «JASCON 4» sinks in heavy weather off Nigeria. May 29, 2013. Retrieved from <https://www.gcaptain.com/tugboat-jascon-sinks-heavy-weather/>.
6. Model Course 7.01 Master and Chief Mate. London : IMO, 2014.
7. Model Course 7.03 Officer in charge of a navigational watch. London: IMO, 2014.
8. Resolution IMO A.749(18) dd 04.11.1993 «Code of intact stability for all types of ships covered by IMO instruments». Retrieved from <http://www.imo.org/>.
9. Resolution MSC.267(85) (adopted on 4 December 2008) adoption of the International code on intact stability, 2008 (2008 IS CODE). Retrieved from <http://www.imo.org/>.
10. Mezhdunarodnaya konvenciya o podgotovke i diplomirovanii moryakov i nesenii vakhtih. (2011). London : IMO.
11. Gijsbert De Jong, Bureau Veritas. Olivier Daniel, Groupe Bourbon. OSV Rules & Regulations. Regulatory Developments & Practical Applications. OSV Summit 2010. London, 23-24 March 2010. Retrieved from <http://www.bureauveritas.com/>.
12. IMO Sub-Committee SLF 52. Retrieved from <http://www.imo.org/>.
13. Guidelines for Offshore Marine Operations. Revision: 0611-1401 on 06/11/2013. *The North West European Area*. Retrieved from <http://www.g-omo.info/>.

Товстокорий О. М., Нестеренко В. Б., Завальнюк О. П. ОСОБЛИВОСТІ КОНТРОЛЮ ОСТІЙНОСТІ БУКСИРНИХ СУДЕН ПРИ МАНЕВРУВАННІ НА ШЕЛЬФІ

Останнім часом значного розвитку отримали операції на шельфі зі встановлення, обслуговування бурових платформ, елементів нетрадиційних видів енергетики, прокладання та обслуговування підводних трубопроводів, кабелів і т.д. У процесі виконання таких операцій морехідні якості суден, їх маневрування в значній мірі відрізняються від маневрування звичайних транспортних суден. Це стосується також вимог і контролю стану остійності при проведенні операцій з буксирування та завезення якорів. Останнім часом відбулося кілька великих аварій суден під час буксирування і завезення якорів, які спричинили людські жертви і втрати суден. Основною причиною цих аварій була втрата остійності і перекидання суден через різке посилення натягу буксирного троса у напрямку траверсів, а також «людський фактор». Складність специфічних робіт офісирних буксирів повинна бути добре зрозуміла і зрозуміла не тільки операторам-буксирувальникам, а й судноводіям буксируваних об'єктів, які часто стають свідками, а нерідко пасивними співучасниками трагедії. Знання і розуміння технічних процесів, що відбуваються на буксирних судах при буксируванні, дозволило б судноводіям буксируваних об'єктів або допоміжних суден, які беруть участь у буксируванні, в разі появи небезпеки гідінга включатися безпосередньо в процеси буксирування,

активно впливати на безпеку ситуації активним гальмуванням об'єкта, збільшенням швидкості, якщо об'єкт самохідний, віддачею якоря або якорів, перекладанням керма з метою зміни курсу або гальмування.

ІМО провідні класифікаційні суспільства посилили вимоги до остійності суден, що беруть участь в проведенні таких операцій, і видали ряд документів, що регламентують питання безпеки. Так, були регламентовані вимоги щодо обліку моменту крену, який залежить від натягу буксирного троса, щодо обмеження кута крену від натягу буксирного троса, в залежності від максимального натягу троса, щодо аварійної віддачі буксирного троса в небезпечній ситуації. Розроблено рекомендації щодо запобігання ситуації гірдинга і виходу з неї.

Слід також підкреслити, що навчальний процес підготовки морських фахівців з досліджуваної проблеми залишається осторонь, тоді як діяльність ІМО, провідних світових класифікаційних товариств і організацій-партнерів щодо спільної розробки родовищ і видобутку вуглеводнів безперервно спрямована на розвиток питань безпеки.

Обґрунтовано необхідність включення розділу «Остійність суден при виконанні буксирувальних робіт і робіт щодо завезення якоря» в навчальні програми морських навчальних закладів.

Ключові слова: остійність суден, буксирування, завезення якорів, момент крену, кут крену, гірдинг.

Tovstokory O., Nesterenko V., Zavalniuk O. FEATURES OF TUGBOATS STABILITY CONTROL IN MANEUVERING ON THE SHELF

Recently, operations on the shelf for the installation and maintenance of drilling platforms, elements of non-traditional types of energy, laying and maintenance of underwater pipelines, cables, etc. have received great development. In the process of performing such operations, the seaworthiness of ships, their maneuvering, are significantly different from the maneuvering of ordinary transport ships. This also applies to the requirements and control of the state of stability when carrying out operations for towing and handling anchors. In recent years, several serious accidents have occurred, causing death and loss of ships. The main cause of these accidents was the loss of stability and the overturning of vessels due to a sharp increase in the tension of the towing cable in the traverse direction, as well as the "human element" that led the operations, but allowed the development of the girding process, which led to an emergency outcome. The complexity of the specific work of offshore tugs should be well understood and explainable not only to tug operators, but also to navigators of towed objects, who often become witnesses, and often passive accomplices of the tragedy. Knowledge and understanding of the technical processes occurring in tugboats when towing would allow towers of towed objects or auxiliary vessels involved in towing, in the event of a risk of girding, to be included directly in the towing processes, to actively influence the safety of the situation by actively slowing the object, if the object is self-propelled, anchor or anchors are handed down, the steering wheel is relocated to change course or braking.

IMO, leading classification societies have tightened the stability requirements for vessels participating in such operations, and issued a number of documents regulating safety issues. Thus, the requirements for taking into account the heeling moment from the tension of the towing cable, for limiting the angle of heel from the tension of the towing cable, for the maximum tension of the cable, for emergency recoil of the towing cable in a dangerous situation were regulated. Recommendations for the prevention of the situation of girding and out of it are developed.

It should also be emphasized that the educational process of training marine specialists on the problem under study is set aside, while the activities of IMO, the world's leading classification communities and organizations - partners in joint development of fields and hydrocarbon production are continuously focused on the development of safety issues. The necessity of including the section "Ship stability when performing towing work and anchor handling" in the educational programs of maritime educational institutions is substantiated.

Keywords: ship stability, towing, handling of anchors, heeling moment, angle of list, girding.

© Товстокорый О. Н., Нестеренко В. Б., Завальнюк О. П.

Статтю прийнято
до редакції 14.03.19

ІНЖЕНЕРІЯ У ТРАНСПОРТНІЙ ГАЛУЗІ

МАХОВИК ДВИГУНА ЗІ ЗМІННИМ МОМЕНТОМ ІНЕРЦІЇ

Самарін О. Є., к.т.н., доцент кафедри експлуатації суднових енергетичних установок Херсонської державної морської академії, e-mail: kaf_energo@ksma.ks.ua, ORCID: 0000-0002-6304-0777

Запропоновано конструкцію маховика поршневого двигуна, у якому при запуску двигуна основна маса маховика концентрується у центрі біля маточини, а при досягненні холостих обертів основна маса переміщується до зубчастої реборди на периферію маховика. Це досягається тим, що на диску шарнірно встановлено важелі, на кінцях яких закріплено грузи або на диску жорстко закріплено напрямні, у яких розташовано грузи. Важелі притягнуто пружинами до маточини так, що грузи впираються у неї, або грузи притягнуто пружинами до маточини так, що вони впираються у неї. Сила пружин розрахована так, що при частоті обертання маховика, яка дорівнює холостим оборотам двигуна, важелі відхиляються і грузи впираються у реборду маховика або грузи переміщуються по напрямних і впираються у реборду маховика.

Маховик зі змінним моментом інерції працює наступним чином. Перед запуском двигуна пружини діють на важелі з грузами або на грузи і притягують їх до маточини так, що вони впираються у неї. Тому при запуску двигуна сила інерції маховика мінімальна. Після запуску двигуна на грузи діє відцентрова сила, яка їх відхиляє від маточини і при досягненні двигуном холостих обертів притискає до зубчастої реборди. У такому положенні грузів сила інерції маховика максимальна. Застосування маховика дозволить полегшити запуск двигуна та зменшити витрати енергії з перерахованих перерозподілу основної маси маховика між центром та периферією і відповідного зменшення або збільшення сили інерції.

Ключові слова: маховик, колінчастий вал, поршковий двигун, момент інерції, відцентрова сила.

DOI: 10.33815/2313-4763.2019.1.20.048-054

Вступ. Маховик являє собою спеціальне дископодібне механічне пристосування, що кріпиться болтами до заднього кінця колінчастого вала і слугує головним чином для створення інерції обертання колінчастого вала й трансмісії [1]. Завдяки силам інерції маховик виводить поршні з мертвих точок і забезпечує рівномірність обертання колінчастого вала. Він виконує наступні функції:

- зниження нерівномірності обертання колінчастого вала;
- передача крутного моменту від двигуна до коробки передач;
- передача крутного моменту від стартера на колінчастий вал двигуна.

Враховуючи масове використання маховиків у двигунах внутрішнього згоряння і високі вимоги до пускових характеристик та стабільності роботи при експлуатаційному режимі навантаження, а також вимоги до зниження витрат палива, проблема зменшення пускового моменту та його підвищення при експлуатації двигуна набуває практичної значущості.

Аналіз конструкції маховиків. Розрізняють такі різновиди конструкції маховика[2]:

- суцільний;
- двомасовий;
- полегшений.

Найбільшого поширення набув маховик суцільної конструкції, що являє собою масивний чавунний диск. На зовнішню поверхню диска напресовано сталевий зубчастий вінець, що забезпечує провертання колінчастого вала при запуску двигуна за допомогою стартера. З одного боку маховика виконана маточина для кріплення до фланця колінчастого вала, інший бік грає роль ведучого диска зчеплення.

При роботі двигуна на різних оборотах колінчастий вал постійно закручується і розкручується, тобто піддається крутильним коливанням. У двигуні застосовуються гасителі крутильних коливань різної конструкції. Одним з таких пристроїв є двомасовий маховик (інша назва – амортизаційний маховик).

Маховик включає два диски, з'єднані за допомогою пружинно-демпферної системи, яка дозволяє повністю ізолювати трансмісію від крутильних коливань і забезпечити рівномірну роботу її елементів. Із застосуванням двомасових маховиків відпадає необхідність демпфувального пристрою у відомому диску зчеплення.

Перевагами двомасових маховиків є гасіння коливань, зниження вібрацій, ізоляція шумів, зручність перемикавання передач, зниження зносу синхронізаторів, захист трансмісії від перевантаження і навіть економія палива. З іншого боку, інтенсивна робота двомасового маховика призводить до посиленого зносу пружинно-демпферної системи і навіть поломки її основного елемента – дугової пружини. Все це стримує масове застосування демпферного маховика на двигунах.

Сучасні тенденції розвитку автомобільних двигунів, такі як даунсайзинг (зменшення обсягу і маси двигуна зі збереженням потужності) і даунспідинг (розширення діапазону крутного моменту двигуна з можливістю роботи на низьких оборотах), зажадали нового рівня гасіння коливань. З 2008 року на двигунах застосовується двомасовий маховик з маятниковим гасителем коливань.

Для усунення нерівномірності обертання колінчастого вала в діапазоні низьких оборотів на маховику разом з дуговою пружиною встановлюється відцентровий маятник. Він створює власні коливання, які у протифазі накладаються на згладжені коливання після дугової пружини й повністю їх гасять.

Відцентровий маятник виконаний у вигляді вантажів, розташованих по колу маховика. За низьких оборотів двигуна вантажі маятника розгойдуються сильніше, тому що відцентрові сили, які діють на них малі. При збільшенні оборотів амплітуда коливань вантажів зменшується і їх роль в гасінні коливань знижується.

Полегшений маховик використовується при тюнінгу двигуна. Перерозподіл маси маховика до країв диска дозволяє зменшити його масу і також зменшити момент інерції. Із застосуванням полегшеного маховика двигун швидше досягає максимальних обертів, відповідно має кращу розгінну динаміку, а також спостерігається збільшення потужності до 5 %.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Як видно з проведеного аналізу, наявні конструкції маховиків мають постійний момент інерції як при пуску, так і при експлуатації двигуна. Але робота двигуна при вказаних режимах суттєво відрізняється, що викликає різні вимоги до маховиків.

При запуску двигуна момент інерції маховика має бути мінімальним, що полегшує сам запуск і знижує витрати палива, а при робочому навантаженні момент інерції має бути максимальним, що забезпечує рівномірну й стабільну роботу двигуна. Розглянуті конструкції маховиків не відповідають установленим вимогам.

Мета та задачі проведення досліджень. Створити такий маховик поршневого двигуна, у якому при запуску двигуна основна маса маховика концентрується у центрі біля маточини, що зменшує пусковий момент інерції, а при досягненні холостих обертів основна маса переміщується до зубчастої реборди на периферію маховика, що забезпечує максимальний момент інерції і рівномірну роботу двигуна.

Для досягнення поставленої мети необхідно провести аналіз конструкції маховиків, встановити причину вказаного недоліку та запропонувати її усунення.

Рішення поставленої задачі. На рис.1 показано загальний вигляд маховика зі змінним моментом інерції.

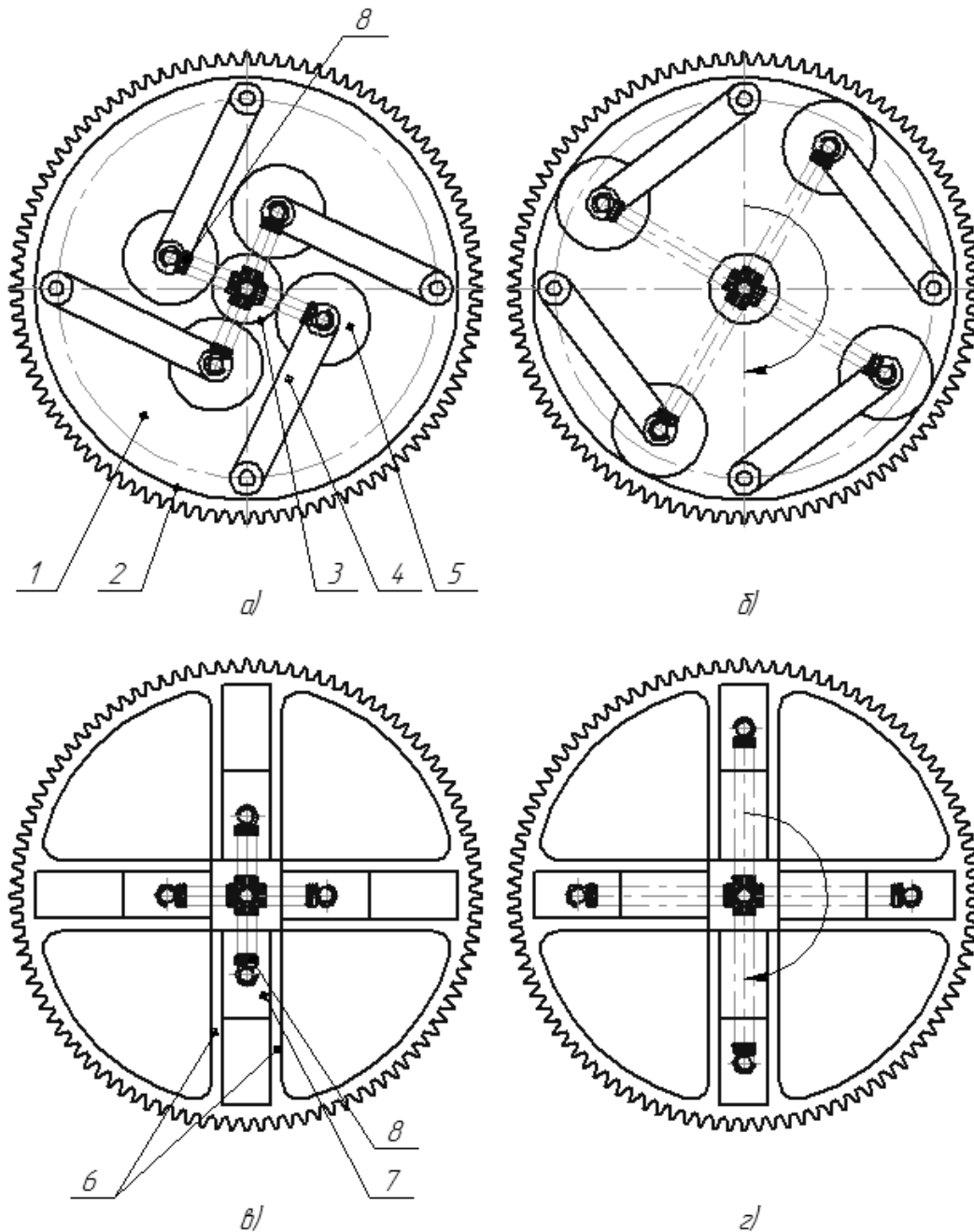


Рисунок 1 – Маховик двигуна зі змінним моментом інерції:

а – маховик з важелями перед запуском; б – маховик з важелями після досягнення холостих обертів двигуна; в – маховик з напрямними перед запуском; г – маховик з напрямними після досягнення холостих обертів двигуна; 1 – диск; 2 – зубчаста реборда; 3 – маточина; 4 – важіль; 5, 7 – груз; 6 – напрямні; 8 – пружина

Поставлена задача вирішується тим, що на диску 1 шарнірно встановлено важелі 4, на кінцях яких закріплено грузи 5 або на диску 1 жорстко закріплено напрямні 6, у яких розташовано грузи 7.

Важелі 4 притягнуто пружинами 8 до маточини 3 так, що грузи 5 упираються у неї, або грузи 7 притягнуто пружинами до маточини 3 так, що вони впираються у неї.

Сила пружин 8 розрахована так, що при частоті обертання маховика, яка дорівнює холостим обертам двигуна, важелі 4 відхиляються і грузи 5 впираються у реборду 2 маховика або грузи 7 переміщуються по напрямних 6 і впираються у реборду 2 маховика.

Шарнірне встановлення на диску 1 важелів 4, на кінцях яких закріплено грузи 5 або жорстке закріплення на диску 1 напрямних 6, у яких розташовано грузи 7, дозволяє грузам вільно переміщатись під дією пружин та сил інерції.

Притягування важелів 4 пружинами 8 до маточини 3 так, що грузи 5 впираються у неї, або притягування грузів 7 пружинами до маточини 3 так, що вони впираються у неї, дозволяє зосередити основну масу маховика біля маточини 3 і максимально зменшити силу інерції при запуску двигуна.

Розрахунок сили пружин 8 так, що при частоті обертання маховика, яка дорівнює холостим обертам двигуна, важелі 4 відхиляються і грузи 5 упираються у реборду 2 маховика або грузи 7 переміщуються по напрямних 6 і впираються у реборду 2 маховика дозволяє максимально збільшити силу інерції маховика при досягненні холостих обертів двигуна. Маховик зі змінним моментом інерції працює наступним чином.

Перед запуском двигуна пружини 8 діють на важелі 4 з грузами 5 або на грузи 7 і притягують їх до маточини 3 так, що вони впираються у неї. Тому при запуску двигуна сила інерції маховика мінімальна.

Після запуску двигуна на грузи 5 або 7 діє відцентрова сила, яка їх відхиляє від маточини 3 і при досягненні двигуном холостих обертів притискає до зубчастої реборди 2. У такому положенні грузів 5 або 7 сила інерції маховика максимальна.

Методика розрахунку маховика. Ємність маховика визначається частотою обертання, масою і його геометричними розмірами (зовнішнім і внутрішнім радіусами).

Енергія, що запасється маховиком, визначається за формулою:

$$W = \frac{E}{3600}, \text{Вт} \times \text{год};$$

де E визначається за формулою:

$$E = \frac{J(\omega_1^2 - \omega_2^2)}{2}, \text{Дж};$$

де ω_1 – максимальна кутова швидкість обертання маховика, с^{-1} ; ω_2 – мінімальна кутова швидкість обертання маховика, с^{-1} ; J – момент інерції, $\text{кг} \times \text{м}^2$.

Момент інерції визначається за формулою:

– запуск двигуна:

$$J_1 = \frac{MR^2}{2}, \text{Дж};$$

– експлуатаційний режим роботи двигуна:

$$J_2 = \frac{(M + m)R^2}{2}, \text{Дж};$$

де M і m – зосереджена маса маховика при запуску і зосереджена маса маховика при експлуатаційному режимі роботи, кг .

Висновки та рекомендації. Застосування запропонованого маховика дозволить полегшити запуск двигуна та зменшити витрати енергії завдяки перерозподілу основної маси маховика між центром та периферією і відповідного зменшення або збільшення моменту інерції.

Розробка рекомендована для застосування у складі поршневих двигунів, режим роботи яких пов'язано з частими зупинками та запусками.

Для забезпечення синхронізації роботи механізму пружини мають бути однакової довжини і жорсткості.

Перед установленням грузи мають бути зважені. Різниця маси грузів може становити не більше 1...2 % .

Маховик необхідно статично відбалансувати при розведених грузах. Після встановлення маховика на колінчастий вал останній має бути відбалансовано динамічно при робочій частоті обертання.

Для запобігання заклинюванню грузів у напрямних вони повинні бути ретельно механічно оброблені й змащені мастилом.

Кількість грузів у маховику може відрізнятись від кількості, наведеної на рис. 1. Рекомендується встановлювати парну кількість грузів, що значно полегшує вирівнювання дисбалансу як при монтажі, так і при балансуванні.

За необхідності заміни груза протилежні грузи повинні бути підібрані за масою й мінятись парами.

Для досягнення максимального ефекту від запропонованого рішення маса додаткових грузів повинна наближатись до маси основного маховика. В такому випадку зміна моменту інерції буде суттєвою.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Что такое маховик и зачем он нужен двигателю – прототип : веб-сайт. URL : <http://howcarworks.ru/>
2. Двигатель внутреннего сгорания : веб-сайт. URL : <http://systemsauto.ru>
3. Гоц А. Н. Кинематика и динамика кривошипно-шатунного механизма поршневых двигателей : учеб. пособие. Владимир: Редакционно-издательский комплекс ВлГУ, 2005. 124 с.
4. Инструкции для дизелей типа 50-98 МС. Компоненты и обслуживание. Часть 1. Копенгаген, Дания : MAN B&W Diesel A/S. 241 с.
5. Инструкции для дизелей типа 50-98 МС. Компоненты и обслуживание. Часть 2. Копенгаген, Дания : MAN B&W Diesel A/S. 249 с.
6. Инструкции для дизелей типа 50-98 МС. Эксплуатация. Часть V, VI. Копенгаген, Дания : MAN B&W Diesel A/S. 339 с.
7. Судновий малооборотний двигун : пат. 117870 України, МПК Ф02Б 39/04 (2006.01). № у 2017 01079 ; заявл. 06.02.2017, опубл. 10.07.2017, Бюл. № 13.
8. Manual Electronic Instruction. Engine Type 8K90MC-C. Operation. Doosan Engine Co., Ltd. Engine customer service tesv/ 69-3, Sinchon-dong, Changwon-City, Gyeongnam, Korea 641-370. 544 p.
9. Manual Electronic Instruction. Engine Type 8K90MC-C. Maintenance. Doosan Engine Co., Ltd. Engine customer service tesv/ 69-3, Sinchon-dong, Changwon-City, Gyeongnam, Korea 641-370. 612 p.
10. Manual Electronic Instruction. Engine Type 8K90MC-C. Description. Doosan Engine Co., Ltd. Engine customer service tesv/ 69-3, Sinchon-dong, Changwon-City, Gyeongnam, Korea 641-370. 422 p.
11. Анурьев В. И. Справочник конструктора-машиностроителя. Москва : Машиностроение, 1982. 728 с.
12. Иванов М. Н. Детали машин. Москва : Высш. школа, 1976. 399 с.
13. Кузьмин А. В., Чернин И. М., Козинцов Б. С. Расчеты деталей машин : справ. пособие. Минск : Выш. шк., 1986. 400 с.
14. Таровик Н. Г., Кулик Т. А., Котушенко Е. С. Детали машин : Соединительные муфты : справочное пособие Краматорск : ДГМА, 2013. 35 с.

REFERENCES

1. Chto takoe makhovik i zachem on nuzhen dvigatelyu – prototip. Retrieved from : <http://howcarworks.ru/>
2. Dvigatelj vnutrennego sgoraniya. Retrieved from : <http://systemsauto.ru>
3. Goc, A. N. (2005). *Kinematika i dinamika krivoshipno-shatunnogo mekhanizma porshnevihkh dvigatelej* : ucheb. Posobie. Vladimir: Redakcionno-izdateljskiy kompleks VIGU.
4. *Komponentih i obsluzhivanie* : instrukcii dlya dizelej tipa 50-98 MS. Part 1. Kopenagagen, Daniya : MAN B&W Diesel A/S.
5. *Komponentih i obsluzhivanie* : instrukcii dlya dizelej tipa 50-98 MS. Part 2. Kopenagagen, Daniya : MAN B&W Diesel A/S.
6. *Komponentih i obsluzhivanie* : instrukcii dlya dizelej tipa 50-98 MS. Part V, VI. Kopenagagen, Daniya : MAN B&W Diesel A/S..
7. Pat. UA117870U Ukrainy, MPK F02B 39/04 (2006.01). Sudnovy maloobertovy dvygun/Samarin O.E.; zayavnyk i vlasnyk patenty Khersonska derzhavna morskya akademiya. – № u2017 01079 zayavl. 06.02.2017, opubl. 10.07.2017, Bul. №13.
8. Manual Electronic Instruction. Engine Type 8K90MC-C. Operation. Doosan Engine Co., Ltd. Engine customer service tesv/ 69-3, Sinchon-dong, Changwon-City, Gyeongnam, Korea 641-370.
9. Manual Electronic Instruction. Engine Type 8K90MC-C. Maintenance. Doosan Engine Co., Ltd. Engine customer service tesv/ 69-3, Sinchon-dong, Changwon-City, Gyeongnam, Korea 641-370.
10. Manual Electronic Instruction. Engine Type 8K90MC-C. Description. Doosan Engine Co., Ltd. Engine customer service tesv/ 69-3, Sinchon-dong, Changwon-City, Gyeongnam, Korea 641-370.
11. Anurjev, V. I. (1982). *Spravochnik konstruktora-mashinostroitelya*. Moskva : Mashinostroenie.
12. Ivanov, M. N. (1976). *Detali mashin*. Moskva : Vihsh. shkola.
13. Kuzjmin, A. V., Chernin, I. M., & Kozincov, B. S. (1986). *Raschetih detaley mashin* : sprav. posobie. Minsk : Vihsh. shk.
14. Tarovik, N. G., Kulik, T. A. & Kotushenko, E. S. *Detali mashin : Soediniteljnihe muftih* : spravochnoe posobie. Kramatorsk : DGMA.

Самарин А. Е. МАХОВИК ДВИГАТЕЛЯ С ПЕРЕМЕННЫМ МОМЕНТОМ ИНЕРЦИИ

Предложена конструкция маховика поршневого двигателя, в котором при запуске двигателя основная масса маховика концентрируется в центре у ступицы, а при достижении холостых оборотов основная масса перемещается к зубчатой реборде на периферию маховика. Это достигается тем, что на диске шарнирно установлены рычаги, на концах которых закреплены грузы или на диске жестко закреплены направляющие, в которых расположены грузы. Рычаги притянуты пружинами к ступице так, что грузы упираются в неё, или грузы притянуты пружинами к ступице так, что они упираются в неё. Сила пружин рассчитана так, что при частоте вращения маховика, равной холостым оборотам двигателя, рычаги отклоняются и грузы упираются в реборду маховика или грузы перемещаются по направляющим и упираются в реборду маховика.

Маховик с переменным моментом инерции работает следующим образом. Перед запуском двигателя пружины действуют на рычаги с грузами или на грузы и притягивают их к ступице так, что они упираются в неё. Поэтому при запуске двигателя сила инерции маховика минимальна. После запуска двигателя на грузы действует центробежная сила, которая их отклоняет от ступицы и при достижении двигателем холостых оборотов прижимает к зубчатой реборде. В таком положении грузов сила инерции маховика максимальна. Применение маховика позволит облегчить запуск двигателя и уменьшить затраты энергии за счет перераспределения основной массы маховика между центром и периферией и соответствующего уменьшения или увеличения силы инерции.

Ключевые слова: маховик, коленчатый вал, поршневой двигатель, момент инерции, центробежная сила.

Samarin O. Ye. ENGINE FLYWHEEL WITH VARIABLE MOMENT OF INERTIA

A piston engine flywheel design is proposed, where, when starting the engine, the main flywheel mass, concentrates at the center of the hub, and upon reaching the engine idle speed, the main flywheel mass shifts to the tooth flange on the periphery of the flywheel. This is achieved by the fact that the levers are installed pivotally on the disc with the load weights on the end points or there are guides, fixed rigidly on the disc, at which the load weights are located. The levers are tightened to the hub in such a way, that the load weights bump into the hub or the load weights are tightened to the hub by the springs in such a way, that they bump into it. The spring force is designed so that when the flywheel rotation frequency is equal to the engine idle speed, the levers depart and the load weights bump into the flywheel flange or the load weights move by the guides and bump into the flywheel flange.

The following is the performance description of the flywheel with variable moment of inertia. Before the engine is started, the springs exert on the levers with the load weights or on the load weights and tighten the latter to the hub in such a way, that they bump into it. So while starting the engine, the flywheel inertia force is minimal. After the engine is started, the centrifugal force exerts on the load weights and deflects them from reaching the hub and upon engine reaching idle speed, tightens them to the tooth flange. In this position of the load weights, the flywheel inertia force is maximum. The use of the proposed flywheel will make it easier to start the engine and reduce energy consumption due to the redistribution of the bulk of the flywheel between the center and the periphery and the corresponding reduction or increase of the moment of inertia. The development is recommended for use in piston engines whose operating mode is associated with frequent stops and starts. To ensure that the mechanism of the mechanism is synchronized, the springs must be of the same length and rigidity. The proposed flywheel application will ease the engine start and reduce energy costs by redistributing the main flywheel mass between the center and periphery and corresponding increase or decrease of the inertia force.

Keywords: flywheel, crankshaft, piston engine, the moment of inertia, centrifugal force.

© Самарін О. Є.

Статтю прийнято
до редакції 21.12.18

ДИАГНОСТИРОВАНИЕ СУДОВОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТРЕНАЖЕРНОГО КОМПЛЕКСА ERS-500 TECHSIM TRANSAS MIP LTD В ПРОЦЕССЕ ПОДГОТОВКИ КУРСАНТОВ ХГМА

Худяков И. В., старший преподаватель кафедры эксплуатации судовых энергетических установок Херсонской государственной морской академии, e-mail: igor.khudiakov563@gmail.com, ORCID: 0000-0002-8900-7879;

Грицук И. В., д.т.н., профессор кафедры эксплуатации судовых энергетических установок Херсонской государственной морской академии, ORCID: 0000-0001-7065-6820;

Погорлецкий Д. С., старший преподаватель кафедры эксплуатации судовых энергетических установок Херсонской государственной морской академии, ORCID: 0000-0002-1256-8053;

Манжелей В. С., старший преподаватель кафедры эксплуатации судовых энергетических установок Херсонской государственной морской академии, ORCID: 0000-0002-6304-0777

Тренажерные системы занимают одно из приоритетных направлений в обучении безаварийной эксплуатации СЭУ. Целью исследования является возможность выполнения технического диагностирования судового дизеля используя тренажерное оборудование и программное обеспечение фирмы TRANSAS - ERS 5000 TechSim в процессе обучения судовых инженеров-механиков. В статье рассмотрена тренажерная подготовка инженеров-механиков на тренажере, который охватывает важнейшие направления обучения в полном соответствии с требованиями Международной конвенции о подготовке и дипломировании моряков и несении вахты STCW с Манильскими поправками от 2010. Удовлетворяет требованиям конвенций и резолюций ИМО и стандартам IEC, сертифицированный норвежским классификационным обществом DNV/GL.

В статье рассмотрены аспекты также практической подготовки судовых инженеров-механиков на тренажёрах, что является завершающей стадией теоретического обучения. При работе на тренажере ERS 5000 TechSim инженер-механик (курсант), применяя имеющиеся знания, получает опыт, весьма близкий к работе в реальных условиях, и одновременно идет процесс уточнения и закрепления его теоретических знаний.

Ключевые слова: тренажерное оборудование, ERS 5000 TechSim, диагностирование судового дизеля.

DOI: 10.33815/2313-4763.2019.1.20.055-063

Введение. Несмотря на оснащение судов новейшими энергетическими комплексами и установками, улучшения берегового обслуживания и качества подготовки экипажей, аварийность судов остается на высоком уровне. Основной причиной сложившейся ситуации является «человеческий фактор». В основном это касается адекватных действий судовых инженеров-механиков во время нахождения в чрезвычайных и аварийных условиях эксплуатации судовой энергетической установки (СЭУ). Для предотвращения возникновения таких ситуаций особое внимание уделяется повышению безопасности эксплуатации судов методом регулярной диагностики технических средств судна.

Тренажерные системы занимают одно из приоритетных направлений в обучении безаварийной эксплуатации СЭУ. Имитационно-тренажерные комплексы, максимально приближенные к реальному судовому машинному отделению, позволяют курсантам приобретать правильные и устойчивые навыки.

Учитывая важность тренажерной подготовки в формировании профессионально важных качеств, вклад в обеспечение безопасности эксплуатации при обслуживании машинного отделения судов – её обеспечение требует комплексного и системного подхода. Наблюдающееся в настоящее время развитие и конструктивное усложнение специальной техники, а также увеличение количества реализуемых в ней задач, требуют от судовых инженеров-механиков технического профессионализма, соблюдения установленных правил и порядка действий. По этой причине подготовка операторов немыслима без

использования тренажерных средств, которые позволяют экономить ресурсы учебного заведения, сократить стоимость обучения, уменьшить аварийность дорогостоящего оборудования в процессе его освоения, отрабатывать действия при возникновении нестандартных ситуаций (пожар, поступление воды в отсек, аварийное изменение параметров судовой энергетической установки, отказ систем управления).

Любой тренажер представляет собой физическую модель, подобную реальному объекту с заданной степенью точности. Особенностью тренажера является то, что при воздействии окружающих устройств и блоков на органы чувств, оператор получает визуальную, тактильную, звуковую и другую информацию, которая и создает иллюзию управления СЭУ [1, 2].

Ученые Калифорнийского государственного университета провели исследования с целью выяснить, как различные способы подачи информации влияют на качество ее усвоения. Результаты показали, что обучаемые запоминают около 10 % от того, что слышат, около 20 % того, что прочитывают, и приблизительно 90 % того, что они видят, слышат и делают [3].

Постановка задачи. Выполнить техническое диагностирование СЭУ используя тренажерное оборудование и программное обеспечение производства фирмы TRANSAS–ERS 5000 TechSim. Эта версия тренажера предназначена для проведения углубленной и расширенной подготовки в условиях штатной или аварийной ситуаций [4, 5].

Анализ полученных результатов. Программное обеспечение тренажера машинного отделения ERS 5000 TechSim имитирует дистанционное управление из центрального поста управления (ЦПУ) судна с помощью так называемых «панелей виртуального оборудования» – Dedicated Hardware (DHW панели), объединенных в отдельную DHW-консоль. Эти панели имитируют оборудования и могут представлять собой отдельные сенсорные экраны или страницы на экране монитора, например, консоль «Propulsion» или виртуальная консоль «Hardware», содержащие все дисплеи для управления и мониторинга судовых систем, узлов и механизмов. Нижняя полоса экрана тренажера содержит кнопки с именами страниц. Список пунктов выбранной страницы откроется в виде всплывающего меню [6].

Тренажер охватывает важнейшие направления обучения в полном соответствии с требованиями Международной конвенции о подготовке и дипломировании моряков и несении вахты STCW с манильскими поправками от 2010. Удовлетворяет требованиям конвенций и резолюций ИМО и стандартам ИЕС, сертифицированный норвежским классификационным обществом DNV/GL (согласно Стандарту на сертификацию морских тренажеров № 214., октябрь 2007) [4–6].

Тренажер машинного отделения Transas ERS 5000 TechSim имеет в своем составе 15–20 моделей судов-прототипов, диагностика проводится на модели танкера LCC, короткая технико-эксплуатационная характеристика которого приведена ниже (табл. 1):

Таблица 1 – Технично-експлуатационная характеристика танкера LCC

Танкер LCC (Large Crude Oil Carrier) (Aframax):	
Длина наибольшая	248,92 м
Ширина габаритная	43,8 м
Осадка по летнюю грузовую марку	14,925 м
Дедвейт	115 000 т

Пропульсивная установка – шестицилиндровый, двухтактный, простого действия, малооборотный, крейцкопфный, с газотурбинным наддувом, реверсивный главный двигатель фирмы MAN B & W марки 6S60MC–C с прямой непосредственной передачей оборотов в гребной винт фиксированного шага (табл. 2).

Таблиця 2 – Характеристики пропульсивної установки танкера LCC

Максимальная мощность главного двигателя (Maximum continuous rating, MCR)	13736 кВт (при n = 105 об / мин)
Эксплуатационная мощность (Nominal continuous rating, NCR (85% MCR))	12364 кВт (при n = 101 об / мин)
Эксплуатационная скорость судна	15,5 узлов



Рисунок 1 – Общий вид танкера LCC (Aframax)

Для проведения диагностики главного двигателя (ГД) используется панель диагностики качества процесса сгорания топлива в цилиндре (вкладка Cylinder Combustion process) (рис. 2) и панель снятия индикаторных диаграмм (вкладка Comparison) (рис. 3).

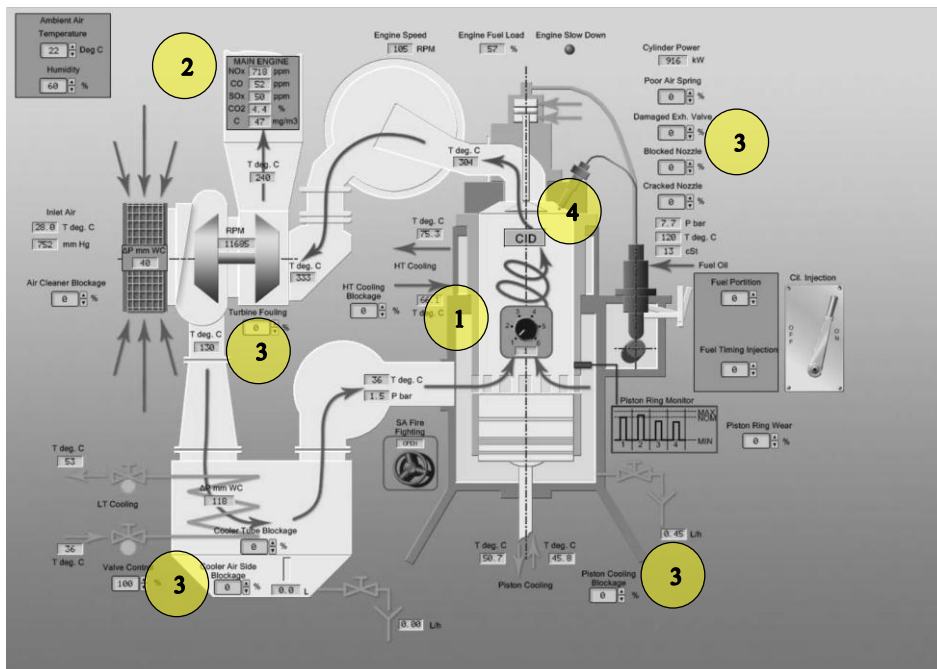


Рисунок 2 – Панель диагностики качества процесса сгорания топлива в цилиндре ГД

При нажатии на пункт меню Diag\ Cylinder Combustion process открывается интерактивная схема ГД, это позволяет наблюдать эффекты различного качества сгорания топлива в цилиндрах. Также есть возможность влиять на процесс сгорания путем внесения онлайн-корректировок или внесения неисправностей в реальном времени.

Диаграмма содержит:

- 1 селекторный переключатель – для выбора необходимого цилиндра;

- 2 MAIN ENGINE – ME индикаторы выхлопных газов;
- 3 регулятора вращения (ползунки) – для установки указанного параметра значения для введения неисправностей;
- цифровые индикаторы для отображения фактического ответа ME системные параметры;
- CID кнопка – открытие панели индикаторной диаграммы во всплывающем окне [6].

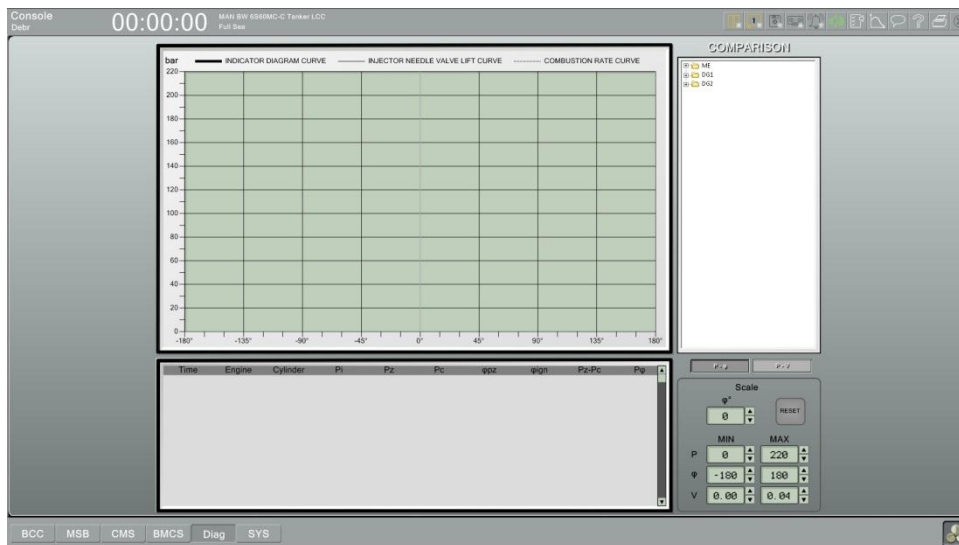


Рисунок 3 – Панель индикаторных диаграмм

На панели диагностики качества процесса сгорания топлива в цилиндре ГД мы имеем возможность имитировать такие неисправности, как:

- загрязнение воздушного фильтра турбины наддува воздуха;
- загрязнение газовой составляющей турбины наддува воздуха;
- загрязнение охладителя воздуха после турбины наддува;
- загрязнение со стороны системы охлаждения;
- перепад температур контура охлаждения высокой температуры (НТ);
- перепад температур охлаждения поршня;
- плотность воздушной пружины выхлопного клапана;
- повреждение (прогорание) выхлопного клапана;
- загрязнение или трещина распылителя форсунки;
- изменение подачи топлива;
- изменение угла опережения впрыска топлива;
- износ поршневых колец.

Учитывая то, что поврежденные или изношенные поршневые кольца трудно диагностировать в 2-тактных двигателях по косвенным параметрам, повреждение может быть неочевидным, пока оно не станет серьезным. В данной статье описывается диагностика именно этой неисправности.

Диагностику выполняем по такому алгоритму. Снять индикаторную диаграмму цилиндра №1 без износа поршневых колец главного двигателя и сохранить в памяти панели диагностики. Записать параметры двигателя вкладки CMS, M/E overview;

С помощью имитатора изменения износа поршневых колец главного двигателя Piston Ring Wear на панели Cylinder Combustion Diagnosis Panel последовательно задать величину износа поршневых колец главного двигателя 20 %; 40 %; 60 %. Последовательно при каждом значении износа поршневых колец снимать индикаторную диаграмму цилиндра № 1 и параметры двигателя вкладки CMS, M/E overview и параметры качества выхлопных газов на вкладке Diag / Emission.

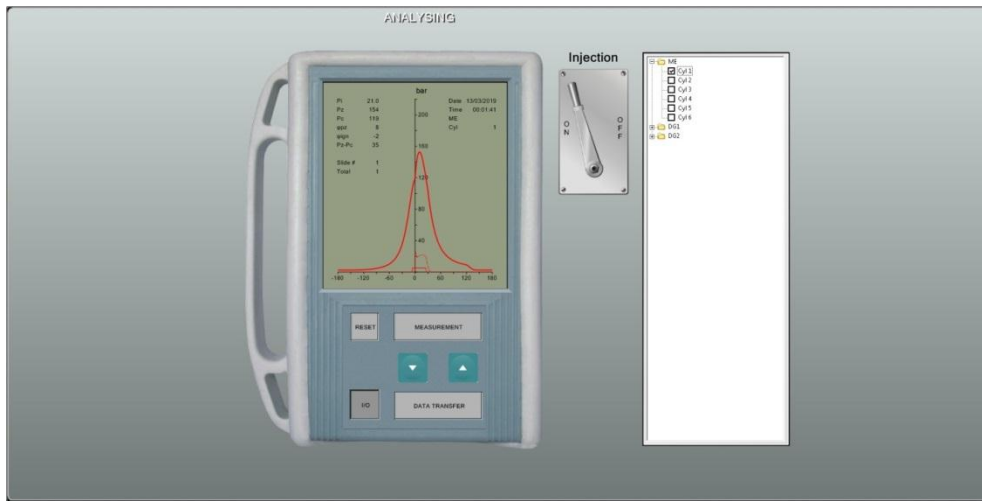


Рисунок 4 – Снятие индикаторной диаграммы в цилиндре №1 без износа поршневых колец ГД



Рисунок 5 – Параметры ГД без износа поршневых колец в цилиндре № 1

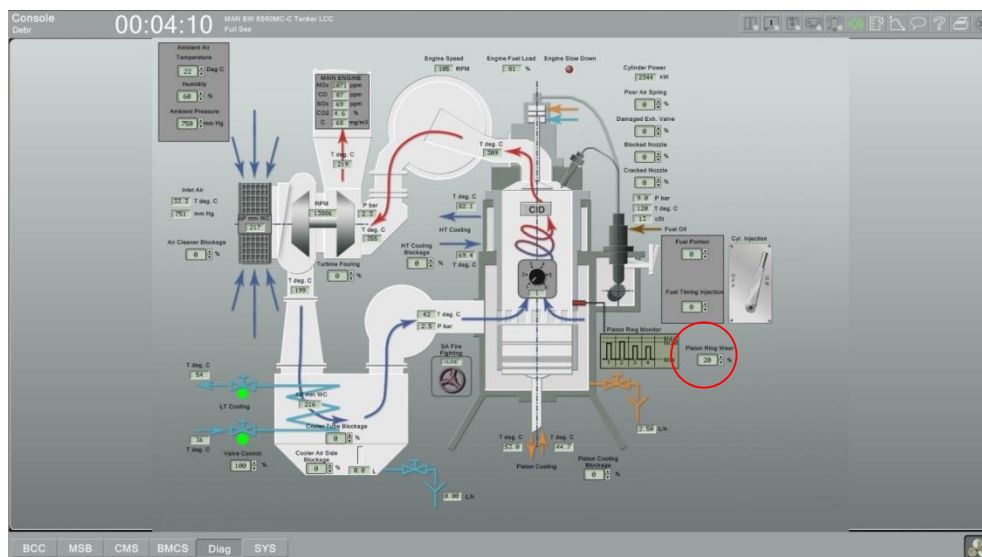


Рисунок 6 – Задана величина износа поршневых колец цилиндра №1 ГД 20 %



Рисунок 7 – Параметры ГД с износом поршневых колец 20 %

По аналогии (рис. 6) задаем величину износа поршневых колец ГД 40 % и 60 %, снимая индикаторную диаграмму и записывая параметры двигателя для каждого положения. Индикаторные диаграммы сохраняем в памяти панели диагностики.



Рисунок 8 – Параметры ГД с износом поршневых колец 40%



Рисунок 9 – Параметры ГД с износом поршневых колец 60%

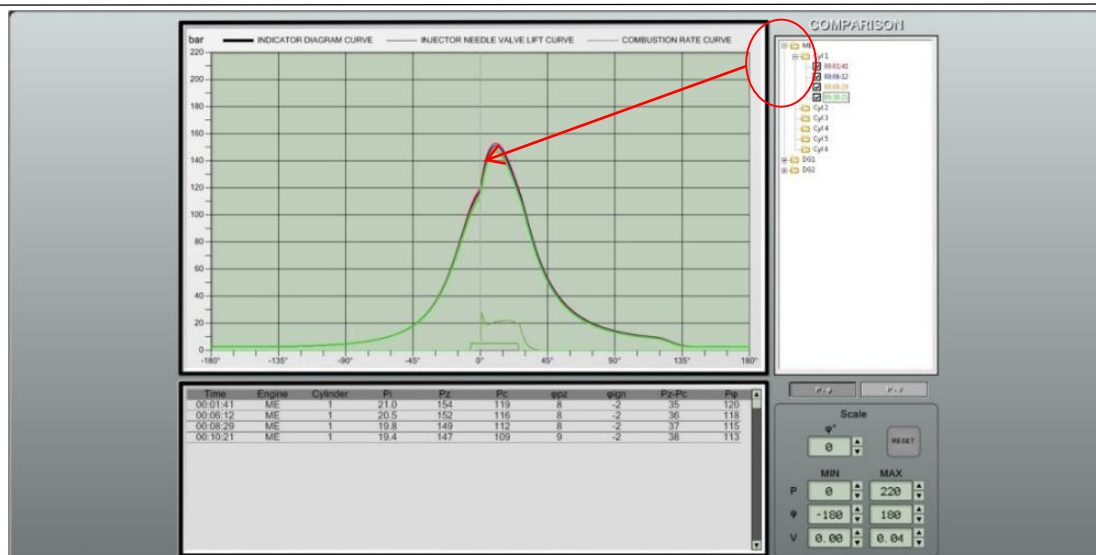


Рисунок 10 – Индикаторные диаграммы различных состояний ГД

В результате проведенного анализа изменений параметров ГД и непосредственно самих индикаторных диаграмм, в случаях различной величины износа поршневых колец были выявлены следующие изменения, свидетельствующие об изменении состояния ГД:

- снижение давления сжатия P_c от 119 до 109 бар, CID;
- снижение среднего индикаторного давления P_i от 21.0 до 19.4 бар;
- снижение максимального давления сгорания P_z от 154 до 147 бар;
- повышение температуры возврата масла охлаждения поршня;
- увеличение расхода смазочного масла в цилиндре.
- снятие индикаторных диаграмм производится при неизменной подаче топлива.

Выводы. Практическая подготовка судовых инженеров-механиков на тренажерах является завершающей стадией теоретического обучения. При работе на тренажере ERS 5000 TechSim инженер-механик (курсант), применяя имеющиеся знания, получает опыт, весьма близкий к работе в реальных условиях, и одновременно идет процесс уточнения и закрепления его теоретических знаний.

Основные преимущества использования тренажера в процессе обучения:

- возможность проведения лабораторных работ фронтальным методом (все студенты одновременно выполняют одну работу), что существенно повышает эффективность этого вида обучения;
- возможность моделирования и безопасного исследования экстремальных и аварийных режимов работы оборудования;
- возможность широкого изменения условий эксперимента;
- интенсификация обучения без потери качества усвоения материала.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тренажерные комплексы и тренажеры / Шукшунов В.Е. и др. Москва : Машиностроение, 2005. 383с.
2. Кравцов А. В. Математическое и программное обеспечение формирования окружающей обстановки тренажерных комплексов : автореф. дис. ... канд. техн. наук / ТГУ. Тула, 2010. 20 с.
3. Metcalf T. Listening to your clients. *Life Association News*, 1997, 92 (7), p. 16–18.
4. Международная конвенция подготовки и дипломирования моряков и несения вахты 1978 г. Международный кодекс о подготовке и дипломировании моряков и несении вахты 1995 года с Манильскими поправками.

5. Модельный курс IMO 2.07. Тренажер машинного отделения.
6. Тренажер TechSim 5000. ERS 5000 TechSim. MAN B&W 6S60MC-C Diesel Engine – Tanker LCC (Aframax) : учебное пособие. 2014, 11. 279 с.
7. International Maritime Organization (IMO) : веб-сайт. URL : <http://www.imo.org>
8. ООО Транзас Украина : веб-сайт. URL : <http://www.transas.com.ua>
9. Marine Engine : веб-сайт. URL : <http://www.marineengine.com>

REFERENCES

1. Shukshunov, V. E. et al. (Ed.). (2005). *Trenazherniye kompleksy i trenazheri*. Moskva : Mashinostroenie.
2. Kravcov, A. V. (2010). *Matematicheskoe i programmnoe obespechenie formirovaniya okruzhayuthej obstanovki trenazhernikh kompleksov. Extended abstract of candidate's thesis.* Tula.
3. Metcalf, T. (1997). Listening to your clients. *Life Association News*, 92 (7), 16–18.
4. Mezhdunarodnaya konvenciya podgotovki i diplomirovaniya moryakov i neseniya vakhtih (1978). *Mezhdunarodniy Kodeks o podgotovke i diplomirovanii moryakov i neseni vakhtih 1995 goda s Maniljskimi popravkami.*
5. Modeljniy kurs IMO 2.07. Trenazher mashinnogo otdeleniya.
6. Trenazher TechSim 5000. (2014). ERS 5000 TechSim. MAN B&W 6S60MC-C Diesel Engine – Tanker LCC (Aframax) : учебное пособие.
7. International Maritime Organization (IMO). Retrieved from <http://www.imo.org>
8. ООО Транзас Украина. Retrieved from <http://www.transas.com.ua>
9. Marine Engine. Retrieved from <http://www.marineengine.com>

Худяков І. В., Грицук І. В., Погорлецький Д. С., Манжелей В. С. ДІАГНОСТУВАННЯ СУДНОВОЇ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ З ВИКОРИСТАННЯМ ТРЕНАЖЕРНОГО КОМПЛЕКСУ ERS-500 TECHSIM TRANSAS MIP LTD В ПРОЦЕСІ ПІДГОТОВКИ КУРСАНТІВ

Тренажерні системи займають одне з пріоритетних напрямів у навчанні безаварійної експлуатації СЕУ. Метою дослідження є можливість виконання технічного діагностування суднового дизеля використовуючи тренажерне обладнання та програмне забезпечення фірми TRANSAS - ERS 5000 TechSim у процесі навчання суднових інженерів-механіків. У статті розглянута тренажерна підготовка інженерів-механіків на тренажері, який охоплює найважливіші напрями навчання в повній відповідності з вимогами Міжнародної конвенції про підготовку і дипломування моряків та несення вахти STCW з Манільськими поправками від 2010 року Чи задовольняє вимогам конвенції і резолюції ІМО і стандартам ІЕС, сертифікований норвезьким класифікаційним товариством DNV/GL. У статті розглянуті аспекти практичної підготовки суднових інженерів-механіків на тренажерах, що є завершальною стадією теоретичного навчання. При роботі на тренажері ERS 5000 TechSim, інженер-механік (курсант), застосовуючи наявні знання, отримує досвід, дуже близький до роботи в реальних умовах, і одночасно йде процес уточнення і закріплення його теоретичних знань.

Ключові слова: тренажерне обладнання, ERS 5000 TechSim, діагностування суднового дизеля.

Khudiakov I., Gritsuk I., Pogorletsky D., Manzheley V. DIAGNOSTICS OF SHIP POWER PLANT USING ERS-500 TECHSIM TRANSAS MIP LTD TRAINING SIMULATOR IN THE PROCESS OF TRAINING OF ENGINEER OFFICERS

Training simulators is one of the key propriety areas in teaching trouble-free operation of ship power plant. This article discusses the possibility of carrying out diagnostics process of ship diesel engine using training simulator equipment and software of TRANSAS-ERS 5000 TechSim in the process of training of engineer officers. The article discusses the training of mechanical engineers on a simulator, which covers the most important areas of training in full compliance with the requirements of the International Convention on the Training and Certification of Seafarers and Watchkeeping STCW with Manila amendments of 2010. Using the Piston Ring Wear main engine piston ring wear simulator on the Cylinder Combustion Diagnosis Panel, sequentially set the main engine piston ring wear to 20%; 40% 60% Sequentially, for each wear value of the

piston rings, take the indicator diagram of cylinder No. 1 and the engine parameters of the CMS tab, M / E overview and the exhaust gas quality parameters on the Diag / Emission tab.

The article also considers aspects of the practical training of marine mechanical engineers on simulators, which is the final stage of theoretical training. When working on the ERS 5000 TechSim simulator, a mechanical engineer (cadet), applying the existing knowledge, gains experience very close to working in real conditions, and at the same time, the process of refinement and consolidation of his theoretical knowledge is ongoing. It has been shown that when working on the ERS 5000 TechSim training simulator, engineer officers (cadets), apply existing knowledge, gain experience under realistic conditions, and simultaneously carry out the process utilizing existing theoretical knowledge.

Keywords. *Training simulator equipment, ERS 5000 TechSim, diagnostics of ship diesel engine.*

© Худяков І. В., Грицук І. В., Погорлецький Д. С., Манжелей В. С.

Статтю прийнято
до редакції 15.03.19

РОЗРОБКА КОНСТРУКТИВНИХ ЗАХОДІВ ДЛЯ ЗАХИСТУ ОБ'ЄКТІВ МІСЬКОЇ ЗАБУДОВИ ВІД ШУМУ

Чейлитко А. О., д.т.н., доцент кафедри теплоенергетики та гідроенергетики Інженерного інституту Запорізького національного університету, ORCID: 0000-0002-5713-155X;

Льїн С. В., к.т.н., доцент кафедри електротехніки та енергоефективності Інженерного інституту Запорізького національного університету, ORCID: 0000-0003-3563-9536;

Черненко А. В., аспірант кафедри міського будівництва та господарства Інженерного інституту Запорізького національного університету, ORCID 0000-0001-5421-9778;

Іванісова А. П., аспірантка кафедри електротехніки та енергоефективності Інженерного інституту Запорізького національного університету, ORCID: 0000-0002-2811-227X

У статті розглянуто негативний вплив міського шуму на людину та шумозахисні екрани як найбільш ефективні будівельно-акустичні засоби зниження шуму. Розглянуто види шумозахисних екранів в залежності від конструкції та правила їх установа з урахуванням вимог щодо безпеки руху, експлуатації дороги й транспортних засобів та експлуатації екрана. Було розроблено універсальний алгоритм проектування і впровадження шумозахисних екранів для захисту об'єктів міської забудови від шуму як при їх проектуванні, так і при реконструкції. Для спрощення сприйняття алгоритму його було представлено у вигляді блок-схеми. Створений алгоритм проектування і впровадження шумозахисних екранів для захисту об'єктів міської забудови від шуму дозволив спростити та пришвидшити встановлення шумозахисного екрана для кожного конкретного випадку.

***Ключові слова:** шум, акустичний комфорт, техногенні джерела шуму, шумозахисні екрани, алгоритм.*

DOI: 10.33815/2313-4763.2019.1.20.064-069

Вступ. В останні роки можна спостерігати стрімке збільшення автомобілів, кількості залізничних та авіа-сполучень, будівництв, промислових підприємств, усього того, що створює міський шум. Як відомо, шум негативно впливає на продуктивність праці, призводить до зростання рівня захворюваності. Разом зі збільшенням джерел шуму, зростає і його рівень, що, на думку експертів, складає близько 0,5 дБА на рік і надалі ситуація буде тільки погіршуватися [1, 2]. Так, кількість автомобілів у містах за останні 5 років збільшилася удвічі і на міських магістралях рівні звуку можуть досягати 70–80 дБА, а в окремих випадках 90 дБА і більше, що перевищує допустимі значення удвічі [3]. Шумозахисні екрани на сьогоднішні є найбільш ефективним будівельно-акустичним засобом зниження шуму. Саме тому, є необхідність їх установа для захисту об'єктів міської забудови від шуму.

Аналіз літературних даних. Заходи боротьби із шумом охоплюють дуже широке коло питань, тому в даній роботі зупинимось на розробці конструктивних рішень будівельно-акустичних засобів для захисту об'єктів міської забудови від шуму – шумозахисних екранів. У деяких випадках (наприклад, при русі транспорту мостами, шляхопроводами, естакадами, віадуками) шумозахисні екрани є єдиним будівельно-акустичним засобом із шумозахисту, застосування якого значно скорочує зону шумового забруднення. Спорудження шумозахисних екранів на автомобільних і залізничних мостах, шляхопроводах, віадуках, естакадах, розташованих на території житлової забудови, у рекреаційних, санаторно-курортних зонах та інших територіях з нормованими рівнями шуму є обов'язковим.

За конструктивним рішенням шумозахисні екрани можуть бути у вигляді вертикальної штучної стінки або стінок іншої форми у поперечному перерізі (стінка з нахиленим козирком, стінка зі спеціальними конструктивними елементами на її верхівці,

що сприяють підвищенню акустичної ефективності екрана, криволінійна стінка з нахилом у бік джерела шуму тощо) з різними поздовжніми формами (прямолінійна, ламана, криволінійна, комбінована, пластикна, ступінчаста тощо), а також у вигляді галереї чи тунелю. Шумозахисні екрани-стілки можуть бути звуковідбивними, звукопоглинальними або комбінованими, світлопрозорими й непрозорими, виготовленими із різних матеріалів (бетон, залізобетон, цегла, сталь, алюміній, плексиглас, полікарбонат тощо).

Шумозахисні екрани встановлюються на самостійні фундаменти і розраховуються на вітрові й снігові (згідно з ДБН В.1.2-2 «Навантаження і впливи») та сейсмічні (згідно з ДБН В.1.1-12 «Будівництво у сейсмічних районах України») навантаження.

Шумозахисні екрани слід установлювати на мінімально допустимій відстані від проїзної частини з урахуванням вимог щодо безпеки руху, експлуатації дороги і транспортних засобів та експлуатації екрана. За такого установлення екрана необхідне зниження рівня шуму забезпечується при найменшій його висоті. Щоб досягнути максимального шумопоглинального ефекту, необхідно розрахувати висоту шумопоглинального екрана. Приблизні розрахунки можна зробити так: від краю даху об'єкта, який треба захистити, до джерела шуму, наприклад, автомобільної дороги, проводиться пряма лінія. Точка перетину місця встановлення екрана з цією лінією буде висотою конструкції. Рациональною вважається висота 2,5–3 м, але може бути й до 6 м.

Як звукопоглинальний матеріал у конструкції шумозахисного екрана застосовуються спеціальні пористо-волокнисті звукопоглинальні вироби (або інші звукопоглинальні вироби чи конструкції), призначені для використання в умовах атмосферних впливів.

Існує декілька типів звукопоглинальних екранів, а саме: екран шумозахисний однорівневий непрозорий; екран шумозахисний сходиноквий непрозорий; комбінований шумозахисний екран, що поєднує звукопоглинальні та звуковідбивальні екрани; гнучка шумозахисна стінка (наприклад, ЦИСИЛЕНТ, у якій можливості звукоізоляції досягають 30 дБ, і яка може застосовуватися для захисту від будь-яких джерел шуму) [4].

Завданню проектування і впровадження шумозахисних екранів для захисту об'єктів міської забудови від шуму присвячені наукові праці Буторіна М. В. [5], Цигичко С. П. [6], Осипово Г. Л. [1, 7], Іваново Н. І. [8], Поспелово П. І. [9], Самойлюк Е. П. [2, 10, 11], Факторович А. А. [12] та інших.

Метою дослідження є створення універсального алгоритму проектування і впровадження шумозахисних екранів для захисту об'єктів міської забудови від шуму як при їх проектуванні, так і при реконструкції.

Методи дослідження. Задачі створення екологічно безпечних умов проживання населення на селищних територіях міста шумозахисними заходами вирішувалися на основі системного підходу.

Основна частина. З урахуванням ДБН В.1.1-31:2013 «Захист територій, будинків і споруд від шуму» та ДСН 3.3.6.037-99 «Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку» нами розроблений алгоритм проектування і впровадження шумозахисних екранів для захисту об'єктів міської забудови від шуму, який у вигляді блок-схеми представлено на рисунку 1. Детальніше описання алгоритму наведено нижче.

Для початку роботи ми вводимо всі дані про об'єкти міської забудови (ОМЗ), джерела шуму (ДШ), шумозахисні екрани (ШЕ) (оператор 2 – ввід даних).

Далі уточнюємо чи об'єкт міської забудови вже введено в експлуатацію (побудовано) чи ні (оператор 3 – ОМЗП).

Якщо ОМЗП ще не побудовано, переходимо до оператора 4 (РВ ШХДШ). На цьому етапі робимо розрахункове визначення шумової характеристики транспортного потоку окремо для денного та нічного періодів доби з найбільшою інтенсивністю руху транспорту на ділянках, де планується встановлення екрана, залежно від швидкості й інтенсивності руху транспорту, кількості смуг проїзної частини, складу транспортного потоку, типу дорожнього покриття автодороги й із урахуванням перспективної інтенсивності руху

транспорту, згідно з ДСТУ-Н Б В.1.1-33:2013 «Настанова з розрахунку та проектування захисту від шуму селищних територій».

Також для ОМЗ, що проєктуються, проводимо розрахункове визначення очікуваних еквівалентних і максимальних рівнів звуку в розрахункових точках на території (зокрема числі в точках біля фасадів будинків по їх висоті), що потребують захисту від шуму, з урахуванням наявних екранувальних і звуковідбивних споруд на шляху поширення шуму, типу покриття території, наявних смуг зелених насаджень тощо (оператор 6 – РВ РШРТ) згідно ДСТУ-Н Б В.1.1-35:2013 «Настанова з розрахунку шуму в приміщеннях і на територіях».

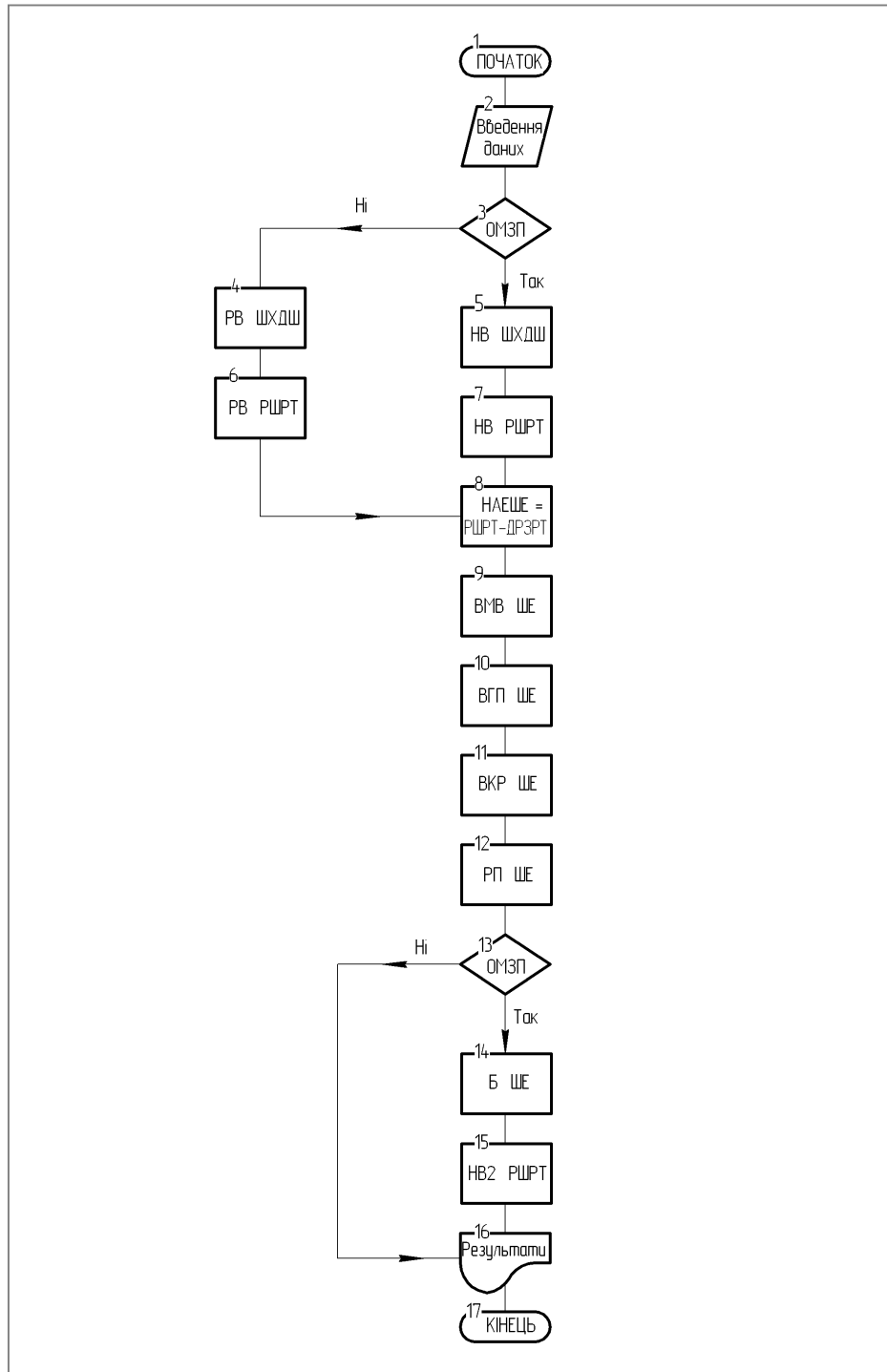


Рисунок 1 – Алгоритм проєктування і впровадження шумозахисних екранів для захисту об’єктів міської забудови від шуму

Якщо ОМЗ і ДШ є робочими (побудовані), переходимо до оператора 5 (НВ ШХДШ). На існуючих дорогах, залізницях, магістральних вулицях тощо визначаємо за результатами натурних інструментальних вимірювань, еквівалентних і максимальних рівнів звукового тиску в октавних смугах частот.

Також для робочих ОМЗ проводимо натурні інструментальні вимірювання рівнів шуму в розрахункових точках (оператор 7 – НВ РШРТ).

Після цього від операторів 6 і 7 переходимо до оператора 8 (НАЕШЕ = РШРТ – ДРЗРТ), визначаємо необхідне зниження рівнів звуку в розрахункових точках, тобто необхідну акустичну ефективність шумозахисного екрана (НАЕШЕ), як різницю рівня шуму в розрахункових точках з допустимим рівнем звуку в цих точках.

Далі визначаємо місце встановлення шумозахисного екрана відносно транспортного потоку чи інших джерел шуму (оператор 9 – ВМВ ШЕ).

Визначаємо мінімальні геометричні параметри екрана (висоту й довжину) та його поздовжню форму, за яких забезпечується необхідне зниження шуму в розрахункових точках (оператор 10 – ВГП ШЕ).

Після цього в операторі 11 (ВКР ШЕ) вибираємо конструктивне рішення шумозахисного екрана (світлопрозорий, непрозорий, звукопоглинальний, звуковідбивний чи комбінований, його матеріал). Далі розробляється проектно-кошторисна документація на виготовлення та встановлення шумового екрана (оператор 12 – РП ШЕ).

Знову уточнюємо, об'єкт міської забудови вже введено в експлуатацію (побудовано) чи ні (оператор 13 – ОМЗП). Якщо ОМЗ ще не побудовано, всю документацію відправляємо в оператор 16 (результати). Якщо ОМЗ побудовані, переходимо до оператора 14. Оператор 14 (Б ШЕ) – виготовляємо й встановлюємо шумозахисний екран згідно технічної документації.

Після встановлення ШЕ проводимо натурні інструментальні вимірювання рівнів шуму в розрахункових точках (оператор 15 – НВ2 РШРТ). Якщо рівень шуму не більше допустимого рівня звуку в даній розрахунковій точці, складається акт приймання шумозахисного екрана.

Аналогічно виконується проектування і впровадження екранів для захисту від шуму стаціонарних джерел, розташованих біля об'єктів міської забудови (наприклад, від шуму трансформаторів відкритих понижувальних підстанцій). Для стаціонарних джерел з постійним шумом акустичне проектування шумозахисного екрана виконується в октавних смугах нормованого діапазону частот.

При акустичному проектуванні шумозахисних екранів за наявності спеціалізованих комп'ютерних програм доцільно наводити карти шуму як у рівнях звуку, так і в октавних смугах частот для візуалізації очікуваних звукових полів на прилеглий території до і після встановлення екрана (екранів), а також поля акустичної ефективності екранів [4].

Висновок. Таким чином, розробку конструктивних захистів для захисту об'єктів міської забудови від шуму можна робити як при проектуванні ОМЗ, так і при їх реконструкції. Але якщо інфраструктура території вже сформована, то найбільш ефективним засобом боротьби з шумом є встановлення шумозахисних екранів. Конструктивне рішення і геометричні параметри шумозахисних екранів вибираються в кожному конкретному випадку індивідуально. При їх виборі одним з визначальних критеріїв є раціональне співвідношення «вартість – ефективність». Створений алгоритм проектування і впровадження шумозахисних екранів для захисту об'єктів міської забудови від шуму дозволив спростити та пришвидшити встановлення шумозахисного екрана.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Осипов Г. Л. Защита от транспортного шума в городах и населенных пунктах. *Обеспечение экологической безопасности : материалы научно-технического симпозиума-семинара*. Севастополь, 2002. С. 78–80.

2. Самойлюк Е. П. Основы градостроительной акустики. Днепропетровск : ПГАСА, 1999. 438 с.
3. Сериков Я. А., Кинжалова Н. А., Сериков С. Я. Безопасность жизнедеятельности : учебн. пособ. Харьков : ХНАГХ, 2010. 347 с.
4. Черненко Т. В., Кулябко В. В., Черненко А. В. Аналіз конструктивних заходів для захисту об'єктів міської забудови від шуму. *Містобудування та територіальне планування : науково-технічний збірник*. К : КНУБА, 2016. № 62. С. 319–326.
5. Буторина М. В., Иванов Н. И., Мишина Н. Н. Проблема снижения уровня шума, воздействующего на население. *Защита населения от повышенного шумового воздействия : материалы II Всероссийской научно-практической конференции с международным участием*. М., 2007. С. 36–67.
6. Цигичко С. П. Екологія в архітектурі і містобудуванні : навч. посіб. Х. : ХНАМГ, 2012. 146 с.
7. Осипов Г. Л. Защита зданий от шума. М. : Стройиздат, 1972. 216 с.
8. Иванов Н. И. Инженерная акустика. Теория и практика борьбы с шумом : учебник. М. : Университетская книга, Логос, 2008. 424 с.
9. Пospelov П. И. Борьба с шумом на автомобильных дорогах. М. : Транспорт, 1981. 88 с.
10. Самойлюк Е. П., Денисенко В. И., Пилипенко А. П. Борьба с шумом в населенных местах. К. : Будівельник, 1981. 144 с.
11. Самойлюк Е. П. Борьба с шумом в градостроительстве. К. : Будівельник, 1975. 128 с.
12. Факторович А. А., Постников Г. И. Защита городов от транспортного шума. К. : Будівельник, 1982. 142 с.

REFERENCES

1. Osipov, G. L. (2002). *Zashchita ot transportnogo shuma v gorodakh i naselennykh punktakh. Obespechenie ekologicheskoi bezopasnosti : materialy nauchno-tekhnicheskogo simpoziuma-seminara*. Sevastopol, 78–80.
2. Samoiliuk, E. P. (1999). *Osnovy gradostroitelnoi akustiki*. Dnepropetrovsk : PGASA.
3. Serikov, Ia. A., Kinzhalova, N. A. & Serikov, S. Ia. (2010). *Bezopasnost zhiznedeiatel'nosti : uchebn. posob.* Kharkiv : KhNAGKh.
4. Chernenko, T. V., Kuliabko, V. V., & Chernenko, A. V. (2016). Analiz konstruktyvnykh zakhodiv dlia zakhystu ob'ektiv miskoi zabudovy vid shumu. *Mistobuduvannia ta terytorialne planuvannia : naukovo-tekhnichniy zbirnyk*. Kyiv : KNUBA, 62, 319–326.
5. Butorina, M. V., Ivanov, N. I. & Mishi, N. N. (2007). Problema snizheniia urovnia shuma, vozdeistvuiushchego na naselenie. *Zashchita naseleniia ot povyshennogo shumovogo vozdeistviia : materialy II Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem*. Moskva, 36–67.
6. Tsyhychko, S. P. (2012). *Ekolohiia v arkhitekturi i mistobuduvanni : navch. posib.* Kharkiv : KhNAMH.
7. Osipov, G. L. (1972). *Zashchita zdaniy ot shuma*. Moskva : Stroiiizdat.
8. Ivanov, N. I. (2008). *Inzhenernaia akustika. Teoriia i praktika borby s shumom*: uchebnik. Moskva : Universitetskaia kniga, Logos.
9. Pospelov, P. I. (1981). *Borba s shumom na avtomobilnykh dorogakh*. Moskva : Transport.
10. Samoiliuk, E. P., Denisenko, V. I. & Pilipenko A. P. (1981). *Borba s shumom v naselennykh mestakh*. Kyiv : Budivelnik.
11. Samoiliuk, E. P. (1975). *Borba s shumom v gradostroitelstve*. Kyiv : Budivelnik.
12. Faktorovich, A. A. & Postniko, G. I. (1982). *Zashchita gorodov ot transportnogo shuma*. Kyiv : Budivelnik.

Чейлітко А. А., Ильин С. В., Черненко А. В. Иванисова А. П. РАЗРАБОТКА КОНСТРУКТИВНЫХ МЕР ДЛЯ ЗАЩИТЫ ОБЪЕКТОВ ГОРОДСКОЙ ЗАСТРОЙКИ ОТ ШУМА

В статье рассмотрено негативное влияние городского шума на человека и шумозащитные экраны, как наиболее эффективные строительно-акустические средства снижения шума. Рассмотрены виды шумозащитных экранов в зависимости от конструкции и правила их установки с учетом требований безопасности движения, эксплуатации дороги и транспортных средств и эксплуатации экрана. Был разработан универсальный алгоритм проектирования и внедрения шумозащитных экранов для защиты объектов городской застройки от шума как при их проектировании, так и при реконструкции. Для упрощения восприятия алгоритма он был представлен в виде блок-схемы. Созданный алгоритм проектирования и внедрения шумозащитных экранов для защиты объектов городской застройки от шума позволил упростить и ускорить установление шумозащитного экрана для каждого конкретного случая.

Ключевые слова: шум, акустический комфорт, техногенные источники шума, шумозащитные экраны, алгоритм.

Cheilytko A. A., Ilin S. V., Chernenko A. V. Ivanisova A. P. DEVELOPMENT OF STRUCTURAL MEASURES FOR PROTECTION OF URBAN FACILITIES FROM NOISE

The article analyzes the negative impact of urban noise on humans and considers noise shields as the most efficient protection mean for noise reduction.

The tasks of creating environmentally safe living conditions in the urban areas of the city by noise protection measures were solved on the basis of a systematic approach.

The types of noise shields are considered depending on their design and instructions for installation, taking into account the requirements of traffic safety, roads and vehicles operation and shield operation. The universal design and implementation algorithm for the noise shields has been developed in order to protect urban facilities from noise during both engineering, procurement and construction as well as during rebuilding operations. To simplify the perception of the algorithm, it has been introduced in a block diagram format. The design and implementation of noise shields algorithm designed to protect urban facilities from noise, made it possible to simplify and speed up the installation of a noise shield for each specific case. Development of structural protection for the protection of urban objects from noise can be done both during the design of the OMZ and during their reconstruction. But if the territory's infrastructure is already in place, the most effective way of dealing with noise is to install noise shields. The design solution and geometric parameters of noise shielding screens are selected individually in each case. When choosing one of the determining criteria is a rational value-for-money ratio. The created algorithm for designing and implementing noise shields to protect the objects of urban development from noise made it possible to simplify and accelerate the installation of the noise shield.

Keywords: noise, acoustic comfort, technogenic noise sources, noise shields, algorithm.

© Чейлітко А. О., Ільїн С. В., Черненко А. В., Іванісова А. П.

Статтю прийнято
до редакції 21.03.19

***АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ
ТЕХНОЛОГІЇ***

ОЦІНКА ЕКОЛОГІЧНОЇ НЕБЕЗПЕКИ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ УРБООКОСИСТЕМИ ЗА СТАНОМ ДЕПОНУЮЧОГО СЕРЕДОВИЩА

Барабаш О. В., к.біол.н., доцент Національного транспортного університету, м. Київ, e-mail: el_barabash@ukr.net, ORCID: 0000-0001-5206-2922

Діяльність промислових підприємств та викиди автомобільного транспорту є основними джерелами забруднення урбоекосистем і становлять суттєву загрозу здоров'ю населення міст в результаті емісії пилу в атмосферу. Висока кумулятивна здатність токсичних металів, зокрема пльомбуму призводить до його надходження в атмосферне повітря, ґрунти та підземні води, а в кінцевому підсумку – до накопичення в тканинах та органах рослинних організмах. Існує залежність між вмістом токсичних металів в атмосферному повітрі й випадінням їх в межах санітарно-захисної зони промислових та автотранспортних підприємств і поширенням по всій території урбоекосистеми. Сніговий покрив депонує забруднення, тому досить часто використовується для проведення оцінки стану атмосферного повітря. Пошаровий відбір проб снігового покриву дозволяє встановити динаміку забруднення та вплив виробничих потужностей підприємств на стан урбоекосистеми. Застосування методів біотестування за допомогою рослинних організмів, які використовуються в якості тест-об'єктів, засноване на їх чутливості до екзогенного хімічного впливу і відображується в реакції-відповіді рослин на забруднювальні речовини. Визначення фізико-хімічних показників снігового покриву та розрахунок фітотоксичного ефекту на основі методів фітотестування дозволяє виявити не лише присутність у сніговому покриві токсичних металів, але й отримати достовірну інформацію про їх розподіл в атмосферному повітрі міст. За результатами проведених досліджень отримано показники довжини пагонів *Lepidium sativum*. Тест-об'єкт був пророщений у пробах снігового покриву, відібраного на відстані 5–50 м поблизу підприємства АЗС «WOG». Отримані дані порівнювались із значеннями довжини пагонів тест-об'єктів, пророщених у пробах снігу, з території паркової зони. Встановлено, що рівень забруднення атмосферного повітря токсичними металами на відстані 50 м від АЗС «WOG» є найвищим. Фізико-хімічні показники снігового покриву та фітотоксичний ефект вказують на високу ймовірність потрапляння токсичних металів в атмосферне повітря за межі санітарно-захисної зони АЗС «WOG».

Ключові слова: фітоіндикація, тест-об'єкт, сніговий покрив, фітотоксичний ефект, крес-салат (*Lepidium sativum*), урбоекосистема.

DOI: 10.33815/2313-4763.2019.1.20.071-078

Вступ. За результатами геохімічних та гігієнічних досліджень багато науковців відзначають залежність між вмістом токсичних металів в атмосферному повітрі й випадінням їх на території міст, що фіксується у вигляді аномалій у сніговому покриві як природному середовищі [1]. При утворенні й випадінні снігу в результаті процесів сухого та вологого вимивання концентрація забруднювальних речовин у ньому виявляється зазвичай у 2–3 рази вища, ніж в атмосферному повітрі, оскільки сніговий покрив депонує забруднення, дозволяючи проводити оцінку стану атмосферного повітря [2]. Пошаровий відбір проб снігового покриву надає перспективи в отриманні даних з динаміки забруднення атмосферного повітря міст за зимовий період, а відбір проб по всій площі снігового покриву – можливість одержати дані про забруднення в період від утворення стійкого снігового покриву до моменту відбору проби. Вміст токсичних речовин у сніговому покриві визначають досить простими методами й з високим ступенем надійності, тим більше, що в умовах великих міст зі складною промислово-селітебною забудовою спостерігається обмежена кількість стаціонарних постів, що не дозволяє отримати достовірну інформацію щодо просторового розподілу забруднювальних речовин по всій території [1]. Використання біоіндикаційних методів моніторингу, зокрема фітотестування за допомогою чутливого тест-об'єкта крес-салату (*Lepidium sativum*) дозволять досить дешево і просто у виконанні проводити контроль якості середовища на присутність токсичних речовин у сніговому покриві в безперервному режимі та без попередньої ідентифікації конкретних хімічних сполук або фізичних впливів [3].

Аналіз досліджень. З геологічної позиції до досліджень снігу першим підійшов П. Н. Чирвінський, який розглядав сніговий покрив як невід'ємну частину системи: атмосфера – ґрунтовий покрив – водоносний горизонт [4]. Питання моніторингу

забруднення снігового покриву розкриваються у наукових роботах В. Н. Василенка, І. М. Назарова [5]; В. М. Артемова та ін. [6]. На думку Є. І. Єгорової [7] виключно методами біотестування можна оцінити кумулятивний ефект різноманіття впливів. Біотестування як вступ до більш детального й усебічного аналізу хімічного складу атмосферного повітря, ґрунтів чи води, розглядає у своїй праці І. Н. Тарасенко [8]. Контроль за станом та оцінка фітотоксичного потенціалу компонентів біосфери висвітлена у багатьох наукових працях вітчизняних і зарубіжних авторів [9–14].

Матеріали та методика дослідження. Проби снігового покриву отримували враховуючи межі санітарно-захисної зони АЗС [15]. Щільність відбору складала 1–5 проб на км², що пов'язано з можливістю виявлення епіцентру забруднення. Проби відбирали на всю потужність снігоприймача та фіксували площу шурфу й снігодоби. Розміри шурфу заміряли по довжині і ширині для розрахунку площі, на яку проєктується випадіння з атмосфери. Вага проб досягала 6 кг, що дозволило отримати масу випадінь, достатню для проведення аналізу. Дату відбору чітко фіксували для визначення часу накопичення в сніговому покриві атмосферних опадів. Відібрані проби розтоплювали й центрифугували для видалення твердої фракції опадів. Органолептичний показник (запах) проб снігу оцінювали за 5-бальною шкалою. Хімічні методи використовували для визначення водневого показника (рН) [15, 16].

Фітотестування снігового покриву за допомогою тест-об'єкта проводили протягом 10 днів. Партію насіння крес-салату, призначену для дослідів, перевіряли на проростання. За норму приймали 90–95 % пророслих від числа посіяних насінин [3].

Після проведення вимірювань для кожного з досліджуваних варіантів обчислювали середню довжину надземної і кореневої частин $x \pm m$, де m – помилка середнього арифметичного, яку визначали:

$$m = \sqrt{\frac{\sigma^2}{N}}, \quad (1)$$

де N – кількість результатів; σ^2 – дисперсія, яку визначають за виразом:

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (x - \bar{x})^2}{N}. \quad (2)$$

Достовірність різниці середніх арифметичних t розраховували за критерієм Стьюдента-Фішера:

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\sqrt{m_1^2 + m_2^2}}, \quad (3)$$

де x_1 – середнє арифметичне значення показника в контрольному досліді; x_2 – середнє арифметичне значення показника у досліджуваному варіанті; m_1 – помилка середнього арифметичного в контрольному досліді; m_2 – те ж у досліджуваному варіанті.

Фітотоксичний ефект визначали у відсотках за одним біопараметром – довжиною пагона й розраховували за формулою:

$$\Phi E = \frac{M_0 - M_x}{M_0} * 100\%, \quad (4)$$

де M_0 – значення біопараметра (маса рослин, висота паростків, довжина корінців та ін.) у посуді з контрольним субстратом; M_x – значення аналогічного біопараметра у посуді з досліджуваним субстратом.

Основні результати дослідження. Шевченківський район – один із центральних районів м. Києва і займає площу 2,7 тисяч гектарів, населенням якого складає 233,5 тис. чоловік. Шевченківський район поєднує в собі високопродуктивну промисловість (табл. 1) і будівництво, поліграфічне виробництво й розгалужену торгівлю, охорону здоров'я і сферу побутового обслуговування, широку мережу навчальних закладів та закладів культури.

Таблиця 1 – Підприємства Шевченківського району м. Києва

<i>Кількість підприємств, які звітували за формою №1П у 2018 році – 59 підприємств</i>	
<i>Галузева структура промисловості по видах економічної діяльності</i>	<i>Питома вага, %</i>
Промисловість	100,0
<i>Переробна промисловість:</i>	15,8
харчова промисловість та перероблення сільськогосподарських продуктів	15,8
<i>Легка промисловість:</i>	0,7
текстильна промисловість та пошиття одягу	0,7
виробництво шкіри та шкіряного взуття	
Виробництво деревини та виготовлення виробів з неї	0,3
Целюлозно-паперова, поліграфічна промисловість та видавнича справа	24,7
<i>Хімічна і нафтохімічна промисловість:</i>	22,5
хімічне виробництво	22,3
виробництво гумових та пластмасових виробів	0,2
Виробництво інших неметалевих мінеральних виробів (будматеріалів та скловиробів)	
Металургія та оброблення металу	2,7
<i>Машинобудування, ремонт та монтаж машин і устаткування</i>	33,3
виробництво машин і устаткування	2,5
виробництво електричного та електронного устаткування	5,8
виробництво транспортного устаткування	25,0

Отже, промисловість району складають різногалузеві підприємства м. Києва, зокрема ДАХК «Артем», ПрАТ КЗБН «Росинка», ВАТ «НВК Київський завод автоматики ім. Г. І. Петровського», ВАТ КЕЗ «Трансигнал», ДП «Дослідний завод зварювальних матеріалів ім. Є. О. Патона», ДП Поліграфкомбінат «Україна», ДП Видавництво «Преса України», ДП ВАТ «Київхліб» «Булочно-кондитерський комбінат», ДП ВАТ «Київхліб» «Дослідний хлібозавод», АТ «Київмедпрепарат» [17].

Загрозлива ситуація в районі створюється через стрімке збільшення автотранспортних потоків. Найбільше потерпають мешканці, що проживають у безпосередній близькості до розв'язок та перехресть з недостатніми пропускними можливостями. Відповідно до результатів спостережень Центральної геофізичної обсерваторії в Шевченківському районі великою екологічною небезпекою характеризуються проспект Перемоги, площа Перемоги та Бессарабська площа. Бессарабська площа є найбільш забрудненим місцем у Києві, де інтегральний показник забруднення атмосфери постійно характеризується як високий. Рівні важких речовин, фенолу, діоксиду нітрогену та формальдегіду перевищують гранично допустимі концентрації мінімум удвічі.

Загальний рівень забруднення повітря за індексом забруднення атмосфери (ІЗА) у Шевченківському районі м. Києва оцінюється як високий [17]. Загалом по району відзначається перевищення середньодобових гранично допустимих концентрацій (ГДКс.д.) діоксиду нітрогену, формальдегіду, оксиду нітрогену та фенолу. Це речовини 2 і 3 класів небезпеки, які що протягом усього року найбільшою мірою забруднюють повітря досліджуваного району. Вміст діоксиду нітрогену за середньорічними та максимальними концентраціями перевищує рівень відповідних ГДК на всіх постах Шевченківського району. Вміст важких металів у 2018 р. був нижче рівня допустимих норм, а середньорічні концентрації кадмію, заліза, мангану, купруму, нікелю, плюмбуму, хрому та цинку на всіх постах були на рівні 0,0–0,1 ГДКс.д [17].

Перевищення ГДК за діоксином нітрогену, оксидом вуглецю, формальдегідом пилом установлені на всіх автомагістралях району. Найбільші перевищення виявлені на вул. Січових Стрільців, вул. О.Теліги, просп. Перемоги, вул. Б. Хмельницького, бульв. Т. Шевченка. В зоні впливу промислових підприємств Шевченківського району за вмістом діоксиду нітрогену перевищення спостерігаються: ПАТ «Київобленерго» вул. Стеценка, 1; ДАХК «Артем» вул. Мельникова, 2/10; ПП Фірма «КІМС»

вул. Дмитрівська, 18–24; АЗС «WOG» просп. Перемоги, 11-Б; АЗС «АМІС» вул. Дегтярівська, 53; АЗС «АМІС» вул. Табірна, 46/48; ПАТ «Пластмаш»; котельні гуртожитку МАУП.

Зважаючи на те, що склад снігового покриву змінюється залежності від його віддаленості від джерела забруднення, для отримання достовірних даних про рівень забруднення атмосферного повітря проби снігу відбирали на майданчиках розміром не менше 1 м² на відстані 5, 10, 20 та 50 м від АЗС «WOG». Контрольним зразком стала проба в районі Ботанічного саду імені академіка Олександра Фоміна. Термін контакту снігового покриву з навколишнім середовищем від часу випадіння снігу до збору проби складав у січні 10 днів, а в лютому 14 днів (табл. 2).

Таблиця 2 – Дані про відбір проб

№ проби	Час	Місце
Січень		
1	16.01.2019	АЗС «WOG» (5 м)
2	16.01.2019	АЗС «WOG» (10 м)
3	16.01.2019	АЗС «WOG» (20 м)
4	16.01.2019	АЗС «WOG» (50 м)
5	16.01.2019	Ботанічний сад імені академіка Олександра Фоміна
Лютий		
1	16.02.2019	АЗС «WOG» (5 м)
2	16.02.2019	АЗС «WOG» (10 м)
3	16.02.2019	АЗС «WOG» (20 м)
4	16.02.2019	АЗС «WOG» (50 м)
5	16.02.2019	Ботанічний сад імені академіка Олександра Фоміна

За результатами дослідження встановлено, що найбільший вміст розчинних домішок спостерігався в пробі, відібраній на відстані 5 м від АЗС у січні, тоді як у лютому найбільший вміст розчинених домішок відзначався у пробі снігу з відстані 50 м від АЗС. Найменший вміст розчинних домішок виявлено у контролі. Такі показники пов'язані не лише з діяльністю АЗС, але й з наявністю інтенсивного автомобільного руху з боку проспекту Перемоги.

Встановлюючи величину рН снігу відзначаємо, що вона може бути обумовлена наявністю в атмосфері не тільки твердих частинок, але й газоподібних забруднювальних речовин: SO₂, CO, CO₂, N₂O, NO, NO₂, які після танення снігу перейдуть у ґрунтове середовище. Чистий сніг, як і чиста дощова вода, має рН = 5,6, що пов'язано з наявністю в повітрі CO₂, який підкислює атмосферні опади [15]. Якщо в повітрі багато оксидів нітрогену, сірчистого газу, діоксиду сульфуру та інших кислотних основ, то сніг буде мати величину рН < 5,6. При рН снігу вище 5,6 є вірогідність його забруднення оксидами металів. Середній показник рН у досліджуваних пробах снігу коливався в межах від 5,25 (5–10 м від АЗС) до 5,75 (20 м від АЗС), що доводить неоднорідність розподілу забруднювальних речовин та надзвичайний вплив викидів автомобільного транспорту. Таким чином, за показником рН найбільше оксидів нітрогену, сірчистого газу, діоксиду сульфуру містять проби снігу відібрані на відстані 5 та 10 м від АЗС у січні. Лужне середовище, а відтак і забруднення оксидами металів виявлено у пробах на відстані 20 м від АЗС у січні та лютому.

За оцінкою органолептичних показників проб снігових опадів, згідно з ДСТУ ISO 7027:2003 «Якість води. Визначення каламутності» виявлено, що високим рівнем прозорості по відношенню до інших зразків відрізняється снігова вода контрольної проби

[18]. Сильна мутність спостерігається у пробах, відібраних біля АЗС на відстані 5 м та 10 м, що можливо пов'язано з наявністю неорганічних і органічних тонкодисперсних суспензій. піску, глини, неорганічних сполук (гідроксиду алюмінію, карбонатів різних металів), а також органічних домішок, окислювання сполук заліза й марганцю киснем повітря. Найбільш інтенсивний землянистий запах зафіксовано у пробах узятих у січні в районі найбільшої близькості до АЗС (5 та 10 м). У решти проб запах снігової води теж мав природне походження, що пов'язано з життєдіяльністю живих і відмерлих організмів, наявністю рослинних залишків, специфічних речовин, які виділяються деякими мікроорганізмами.

Рослини як первинні ланки трофічних ланцюгів відіграють головну роль у поглинанні різного роду речовин та є найбільш зручними індикаторами забруднення навколишнього середовища. Тому за допомогою рослин можна достатньо точно оцінити екологічну ситуацію на досліджуваній території. Сенс ростового тесту полягає в обліку змін показників проростання індикаторної культури, вирощеної на досліджуваних зразках ґрунту, води, водних витяжок ґрунтів тощо. Цей метод дозволяє оцінити не тільки пригноблювальну дію різних забруднювачів на рослини, але і стимулювальний ефект.

За методикою Т.Я. Ашихміної визначали рівень забруднення снігового покриву біля підприємства АЗС «WOG» за допомогою насіння крес-салату. Експеримент проводився протягом 10 днів після танення снігу й досягнення сніговою водою кімнатної температури. В чашки Петрі розміщували по 50 насінин крес-салату на фільтрувальний папір, змочений у досліджуваних пробах снігової води. Довжину пагонів починали вимірювати через 24 години, а потім кожного дня протягом усього часу, відведеного на експеримент. Довжину пагонів вимірювали за допомогою штангель-циркуля з точністю до 0,1 см.

Аналізуючи реакцію тест-об'єкта на вміст токсичних металів в сніговому покриві на різній відстані від АЗС встановлено, що ступінь пригніченості росту рослинних організмів складає близько 53 % у січні та більше 60 % у лютому порівняно з контролем. Зауважимо, що найбільший відсоток пригнічення відзначено у рослин, пророщених у пробах, відібраних на відстані 10 та 50 м від джерела забруднення у січні та лютому.

На основі отриманих даних був розрахований фітотоксичний ефект від дії викидів АЗС на крес-салат, який є чутливим індикатором щодо надходження у навколишнє середовище сполук токсичних металів (табл. 3).

Таблиця 3 – Фітотоксичний ефект

Параметр	АЗС «WOG» (Шевченківський район м. Києва)							
	Крес-салат (%) (січень)				Крес-салат (%) (лютий)			
	5 м	10 м	20 м	50 м	5 м	10 м	20 м	50 м
ФЕ	46,48	56,34	36,62	49,30	21,03	66,67	28,21	30,77

Таким чином, процеси пригноблення ростових процесів порівняно з контролем були найвагомішими у пробах, узятих на відстані 10 та 50 м від джерела забруднення.

Висновки. Встановлено, що рівень забруднення токсичними металами атмосферного повітря є досить високим як поблизу, так і на відстані від АЗС, розташованої в Шевченківському районі м. Києва. Отримані показники довжини пагонів, фізико-хімічні показники снігового покриву та фітотоксичний ефект від впливу діяльності АЗС «WOG» на рослинні організми порівняно з контрольним зразком указують на високу ймовірність потрапляння токсичних металів в атмосферне повітря не лише за межі санітарно-захисної зони АЗС, але й на територію селітебної зони району.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Baran A., Jasiewicz C., Antonkiewicz J. Testing toxicity of oily grounds using phytotoxkit tests . The First Joint PSE-SETAC Conference on Ecotoxicology. Book of Abstracts. Poland, 2009, poster.
2. Барабаш О. В., Солодка Ю. В. Оцінка інтенсивності забруднення снігового покриву придорожньої зони м. Києва як показник забруднення атмосферного повітря. *Вісник Національного транспортного університету*. 2011. Вип. 22. С.46–52.
3. Ашихмина Т.Я. Экологический мониторинг. М.: Академический проект, 2005. 416 с.
4. Чирвинский П. Н. Снег и снегозадержание: с приложением атласа. Ростов-на-Дону : Северный Кавказ, 1931. 240 с.
5. Мониторинг загрязнения снежного покрова / Василенко В. Н., Назаров И. М., Фридман Ш. Д. и др. Л. : Гидрометеиздат, 1985. 182 с.
6. Артемов В. М., Парцеф Д. П., Сагит Ю. Е. Анализ состояния загрязнения снегового покрова для проектирования сети станций АНКОС-А. *Методические и системотехнические вопросы контроля загрязнения окружающей среды: труды ИМПГ*. 1982. Вып. 48. С. 144–149.
7. Inês A., Pinho Daniela V., Lopes Rui C., Martins Margarida J., Quin Phytotoxicity assessment of olive mill solid wastes and the influence of phenolic compounds. *Chemosphere* 2017. Vol. 185. P 258–267
8. Tesfamichael H., Kebrom, Selamawit Woldesenbet, Haimanote K., Bayabil, Monique Garcia, Ming Gao, Peter Ampim, Ripendra Awal, Ali Fares. Evaluation of phytotoxicity of three organic amendments to collard greens using the seed germination bioassay. *Environmental Science and Pollution Research*. 2019. Vol. 26. Issue 6. P. 5454–5462.
9. Aranda E., García-Romera I., Ocampo J.A., Carbone V., Mari A., Malorni A. C. Chemical characterization and effects on *Lepidium sativum* of the native and bioremediated components of dry olive mill residue. *Chemosphere*. 2012. Vol. 69 (2). P. 229–239.
10. Manual for the evaluation of laboratories performing aquatic toxicity tests. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Research and Development. EPA/600/4-90/031. 1991, 108 p.
11. Blok, C., Persoone, G. and Wever, G. A practical and low cost microbioassay to assess the phytotoxic potential of growing media and soil. *Acta Horti*. 2008. № 779. P. 367–374
12. Биотестирование и биоиндикация окружающей среды : Учеб. пособие по курсу «Биотестирование» / Е. И. Егорова, В. И. Белолипецкая; м-во образования Рос. Федерации. Обнин. ин-т атом. энергетики. Фак. естеств. наук. Обнинск: Обнин. ин-т атом. энергетики, 2000. 78 с.
13. Тарасенко И. Н. К вопросу о биотестировании. *Экология и охрана окружающей среды*. 1999. №5. С. 56–59.
14. Буштуева К.А., Парцеф Д.П., Беккер А.А., Ревич Б.А. Выбор зон наблюдений в крупных промышленных городах для выявления влияния атмосферных загрязнений на здоровье населения. *Гигиеническая санитария*. 1964. № 1. С. 4–6.
15. Методические рекомендации по оценке степени загрязнения атмосферного воздуха населенных пунктов металлами по их содержанию в снежном покрове и почве (утв. главным государственным санитарным врачом СССР от 15.05.1990 N 5174-90). 17с.
16. Безкопильный И.Н. Некоторые методические подходы к изучению воздействия факторов окружающей среды на здоровье населения в зоне территориально-производственного комплекса. *Гигиеническая санитария*. 1984. № 11. С. 24 – 27.
17. Шевченківська районна в місті Києві державна адміністрація. URL: <https://shev.kyivcity.gov.ua/content/menyu-2.html> (дата звернення: 15.09.2019).
18. Центральна геофізична обсерваторія імені Бориса Срезневського. URL: <http://cgo-sreznevskiy.kiev.ua/> (дата звернення: 02.09.2019).

REFERENCES

1. Baran A., Jasiewicz C., Antonkiewicz J. (2009). Testing toxicity of oily grounds using phytotoxkit tests. The First Joint PSE-SETAC Conference on Ecotoxicology. Book of Abstracts. Poland, poster.
2. Barabash O. V., Solodka Yu. V. (2011). Otsinka intensyvnosti zabrudnennya snihovoho pokryvu prydorozhn'oyi zony m. Kyyeva yak pokaznyk zabrudnennya atmosferного povitrya. *Visnyk Natsional'noho transportnoho universytetu*. 22, 46–52.
3. Ashykhmyna T.YA. (2005). *Ékologhycheskyy monytorynh*. M.: Akademycheskyy Proekt.
4. Chyrvynskyy P.N. (1931). *Sneh y snehozaderzhanye: s prylozhenyem atlasa*. Rostov-na-Donu: Sevvernyy Kavkaz.
5. Vasylenko V.N., Nazarov Y.M., Frydman Sh. D. (1985). *Monytorynh zahryaznenyya snezhnoho pokrova*. L.: Hydrometeoyzdat.
6. Artemov V.M., Partsef D.P., Saet Yu.E. (1982). *Analyz sostoyannya zahryaznenyya snehovoho pokrova dlya proektyrovanyya sety stantsyy ANKOS-A*. V kn.: *Metodycheskye y systemotekhnicheskye voprosy kontrolya zahryaznenyya okruzhayushchey sredy*. Trudy YMPH.
7. Inês A.PinhoDaniela V.LopesRui C.MartinsMargarida J.Quin (2017). Phytotoxicity assessment of olive mill solid wastes and the influence of phenolic compounds. *Chemosphere* <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.07.002>
8. Tesfamichael H. Kebrom, Selamawit Woldesenbet, Haimanote K. Bayabil, Monique Garcia, Ming Gao, Peter Ampim, Ripendra Awal, Ali Fares. (2019). Evaluation of phytotoxicity of three organic amendments to collard greens using the seed germination bioassay. *Environmental Science and Pollution Research*. 26, 6, 5454–5462.
9. Aranda E., García-Romera I., Ocampo J.A., Carbone V., Mari A., Malorni A. C (2012). Chemical characterization and effects on *Lepidium sativum* of the native and bioremediated components of dry olive mill residue. *Chemosphere*. 69 (2), .229–239.
10. Manual for the evaluation of laboratories performing aquatic toxicity tests (1991). U.S. Environmental Protection Agency, Office of Research and Development. EPA/600/4-90/031. – Cincinnati.
11. Blok, C., Persoone, G. and Wever, G. (2008). A practical and low cost microbiotest to assess the phytotoxic potential of growing media and soil. *Acta Horti*. 779, 367–374.
12. Yegorova Ye.I., Belolipetskaya V.I. (2000). *Biotestirovaniye i bioindikatsiya okruzhayushchey sredy : Ucheb. posobiye po kursu «Biotestirovaniye»*. Obninsk : Obnin. in-atom. Energetiki.
13. Tarasenko I.N. (1999). *K voprosu o biotestirovanii*. *Ekologiya i okhrana okruzhayushchey sredy*, 5, 56–59.
14. Bushtuyeva K.A., Partsef D.P., Bekker A.A., Revich B.A. (1964). *Vybor zon nablyudeniy v krupnykh promyshlennykh gorodakh dlya vyyavleniya vliyaniya atmosferynykh zagryazneniy na zdorov'ye naseleniya*. *Gig. Sanitariya*, 1, 4–6.
15. Metodicheskiye rekomendatsii po otsenke stepeni zagryazneniya atmosferного vozdukha naselennykh punktov metallami po ikh sodержaniyu v snezhnom pokrove i pochve (utv. glavnym gosudarstvennym sanitarnym vrachom SSSR ot 15.05.1990 N 5174-90).
16. Bezkopyl'nyy I.N. (1984). *Nekotoryye metodicheskiye podkhody k izucheniyu vozdeystviya faktorov okruzhayushchey sredy na zdorov'ye naseleniya v zone territorial'no-proizvodstvennogo kompleksa*, 11, 24–27.
17. Shevchenkivs'ka rayonna v misti Kyyevi derzhavna administratsiya (2019). Retrieved from <https://shev.kyivcity.gov.ua/content/menyu-2.html>.
18. Tsentral'na heofizychna observatoriya imeni Borysa Sreznevs'koho (2019). Retrieved from <http://cgo-sreznevskiy.kiev.ua/>.

Барабаш Е. В. ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА УРБООКОСИСТЕМЫ ПО СОСТОЯНИЮ ДЕПОНИРУЮЩЕЙ СРЕДЫ

Деятельность промышленных предприятий и выбросы автомобильного транспорта являются основными источниками загрязнения урбоекосистем и составляют существенную угрозу здоровью населения городов в результате эмиссии пыли в атмосферу. Высокая кумулятивная способность токсичных металлов, в частности свинца, приводит к его поступлению в атмосферный воздух, почвы и подземные воды, а в итоге – к накоплению в тканях и органах растительных организмах. Существует зависимость между содержанием токсичных металлов в атмосферном воздухе и выпадением их в пределах санитарно-защитной зоны промышленных и автотранспортных предприятий, а также их распространением по всей территории урбоекосистемы. Снежный покров депонирует загрязнения, поэтому довольно часто используется для проведения оценки состояния атмосферного воздуха. Послойный отбор проб снежного покрова позволяет установить динамику загрязнения и влияние производственных мощностей предприятий на состояние урбоекосистемы. Применение методов биотестирования с помощью растительных организмов, используемых в качестве тест-объектов, основано на их чувствительности к экзогенному химическому воздействию и отображается в виде реакций-ответов растений на загрязняющие вещества. Определение физико-химических показателей снежного покрова и расчет фитотоксического эффекта на основе методов фитотестирования позволяет выявить не только наличие в снежном покрове токсичных металлов, но и получить достоверную информацию об их распределении в атмосферном воздухе городов. По результатам проведенных исследований получены показатели длины побегов *Lepidium sativum*. Тест-объект был пророщен в снежном покрове отобранном на расстоянии от 5 до 50 м у предприятия АЗС «WOG». Полученные данные сравнивались со значениями длины побегов тест-объектов, пророщенных в пробах снега, с территории парковой зоны. Установлено, что уровень загрязнения атмосферного воздуха токсичными металлами на расстоянии 50 м от АЗС «WOG» является самым высоким. Физико-химические показатели снежного покрова и фитотоксический эффект указывают на высокую вероятность попадания токсичных металлов за пределы санитарно-защитной зоны АЗС «WOG».

Ключевые слова: фитоиндикация, тест-объект, снежный покров, фитотоксический эффект, кресс-салат (*Lepidium sativum*), урбоекосистема

Barabash O. V. ECOLOGICAL HAZARD ASSESSMENT OF THE ATMOSPHERIC AIR AT THE URBAN ECOSYSTEM BY THE STATE OF THE DEPOSIT ENVIRONMENT

Industrial activity and emissions of road transport are considered to be the major sources of pollution in urban ecosystems and pose a significant threat to the health of urban population due to dust emissions into the atmosphere. The high cumulative capacity of toxic metals, in particular the plumbum, leads to its entry into the atmospheric air, soil and groundwater, and ultimately to accumulation in the tissues and organs of plant organisms. There is a correlation between the content of toxic metals in the atmospheric air and their fallout within the sanitary protection zone of industrial and motor transport enterprises and distribution throughout the urban ecosystem. Snow cover stores pollution, thus, it is often used to assess the state of the air. The layer-by-layer sampling of the snow cover allows to determine the pollution dynamics and the influence of the production capacities of enterprises on the state of the urban ecosystem. The bioassay methods using plant organisms as test objects are based on their sensitivity to exogenous chemical effects and are reflected in the response of plants to pollutants. Determination of physico-chemical parameters of the snow cover and calculation of phytotoxic effect based on the phytotesting methods allows to detect not only the presence of toxic metals in the snow cover, but also to obtain reliable information about their distribution in the atmospheric air of cities. According to the researches results, the indexes for the lengths of *Lepidium sativum* shoots have been obtained. The test object has been germinated in a snow cover sampled at a distance of 5 to 50 m near the VOG filling station enterprise. The data obtained has been compared with the values of the shoots length of test objects germinated in snow samples from the territory of the park area. It has been established that the level of atmospheric air pollution with toxic metals was the highest at a distance of 50 m from VOG filling station. The physico-chemical parameters of the snow cover and the phytotoxic effect indicate a high probability of toxic metals entry into the atmospheric air beyond the limits of the sanitary protection zone of VOG filling station and into the residential areas.

Keywords: phytoindication, test object, snow cover, phytotoxic effect, garden cress (*Lepidium sativum*), urban ecosystem.

© Барабаш О. В.

Статтю прийнято
до редакції 03.03.19

ІНФОРМАЦІЙНА СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ МАГНІТНО-ІМПУЛЬСНОЮ ОБРОБКОЮ ДЕТАЛЕЙ СУДНОВИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК

Врублевський Р. Є., к.т.н, доцент кафедри експлуатації суднових енергетичних установок Херсонської державної морської академії, e-mail: amor-vr@ukr.net, ORCID: 0000-0001-8686-3488

Складність управління процесом МІО полягає у тому, що необхідно одночасно здійснювати управління декількома параметрами (напруженістю магнітного поля, числом імпульсів у серії, часом імпульсу в серії, інтервалами між імпульсами в серії, числом серій імпульсів). На даний момент фактично відсутні чіткі формальні моделі, що описують процес дії імпульсного магнітного поля на виріб. Метою роботи є підвищення ефективності процесу МІО металевих виробів завдяки розробці інформаційної системи управління. У статті викладено метод побудови бази нечітких правил на основі чисельних даних для інтелектуальної системи управління вибором режимів магнітно-імпульсної обробки на основі мережі ANFIS. Даний метод дозволить знизити час побудови бази правил модуля управління процесом. Розроблено програмне й апаратне забезпечення інформаційної системи управління МІО, що дозволяє здійснити практичну реалізацію створеної інформаційної технології управління процесом обробки металевих виробів.

Визначено основні критерії оцінки ефективності застосування запропонованої інформаційної технології, яка дозволяє реалізувати варіанти управління процесом МІО, що забезпечують поліпшення економічних і часових показників такої обробки порівняно з існуючими підходами на 25–30 %.

Ключові слова: база нечітких правил, інтелектуальна система управління, магнітно-імпульсна обробка.

DOI: 10.33815/2313-4763.2019.1.20.079-086

Вступ. На сьогодні спостерігається інтенсивний розвиток методів і засобів магнітно-імпульсної обробки (МІО) [1, 2], у зв'язку з чим особливий інтерес викликає проблема математичного моделювання МІО з метою оптимального управління її основними параметрами. Складність управління процесом МІО полягає у тому, що необхідно одночасно здійснювати управління декількома параметрами (напруженістю магнітного поля, числом імпульсів у серії, часом імпульсу в серії, інтервалами між імпульсами в серії, числом серій імпульсів). На даний момент фактично відсутні чіткі формальні моделі, що описують процес дії імпульсного магнітного поля на виріб. Управління МІО доводиться здійснювати на підставі емпіричних залежностей і дослідних даних, на які істотно впливають матеріал і форма виробу [3–10]. У ситуації, що склалася, виникає нагальна необхідність створення інформаційної технології управління МІО, що дозволяє оптимізувати режими обробки для конкретних типів і матеріалів оброблюваних виробів.

Об'єктом дослідження є процес управління МІО виробів в умовах адаптації до параметрів обробки.

Предметом дослідження є моделі і методи управління МІО металевих виробів, що забезпечують підвищення ефективності та якості цього процесу.

В основу досліджень покладено: методи теорії систем та функціонального моделювання для проектування інформаційної технології управління магнітно-імпульсною обробкою металевих виробів; методи штучного інтелекту, а саме: генетичні алгоритми та нечіткі нейронні мережі для завдань оптимізації режимів обробки та завдань прогнозування результатів обробки [11–12].

Метою роботи є підвищення ефективності процесу МІО металевих виробів за вдяки розробці інформаційної системи управління.

Основна частина. Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно сформулювати та вирішити наступні завдання:

– зробити порівняльний аналіз наявних моделей і методів, які використовуються для створення інформаційних систем управління в машинобудуванні;

- здійснити вибір математичного апарату для побудови моделі управління процесом МІО;
- розробити інформаційну технологію управління МІО металевих виробів, що забезпечує адаптивне управління процесом їх обробки та враховує фізико-хімічні особливості і геометричну форму конкретного виробу;
- розробити методи й алгоритми розв'язання оптимізаційної задачі управління МІО з використанням нечітких нейромережових моделей і еволюційних алгоритмів;
- розробити програмне та апаратне забезпечення інформаційної системи управління МІО металевих виробів;
- визначити основні критерії оцінки ефективності застосування запропонованої інформаційної технології.

Враховуючи сутність процесу МІО, можна сформулювати ряд особливостей, що характеризують процес функціонування цієї системи управління:

1. Наявність невизначеностей початкових даних про структуру, фізико-хімічні властивості матеріалу конкретної деталі.
2. Необхідність обробки складнопрофільних деталей.
3. Необхідність швидкого переналаштування на обробку різних за видом і матеріалом деталей.
4. Необхідність обробки деталі за мінімальний час і з максимальною якістю.
5. Необхідність здійснювати обробку з мінімальними витратами електроенергії.
6. Необхідність дотримання мінімальних витрат на трудомісткість обробки деталі.

Враховуючи функціональні особливості роботи системи управління, що розробляється, можна представити ряд основних і додаткових вимог до неї:

До основних вимог можна віднести наступні:

1. Налаштування параметрів режимів МІО під конкретну оброблювану деталь. Параметри режимів обробки повинні уточнюватися і корегуватися системою у процесі обробки залежно від матеріалу та геометрії оброблюваного виробу. Також система управління повинна використовувати базу даних про режими з попередніх обробок різних деталей.

2. При заданих показниках якості оброблюваного виробу необхідно забезпечити максимум ефективності роботи. Система повинна швидко і точно визначити параметри режимів МІО для забезпечення необхідної міцності і зносостійкості оброблюваного виробу.

3. Зміна параметрів елементів СУ. Під час МІО умови протікання процесу постійно змінюються. Наприклад, неоднорідність матеріалу, забруднення поверхні оброблюваної деталі. Необхідно оцінювати ці умови для постійного контролю максимально можливої для них продуктивності.

До додаткових вимог відносяться:

1. Реалізація апаратної частини ІСУ на базі мікроконтролерів.
2. Ефективність ІСУ МІО.
3. Забезпечення стійкості ІСУ МІО.

Враховуючи функціональні особливості роботи системи управління, що розробляється, можна зробити висновок, що найбільш доцільне застосування спеціального програмованого мікроконтролера. Цей мікроконтролер управлятиме виконавчими елементами (соленоїдами) установки МІО. У мікроконтролер заносяться режими МІО, заздалегідь визначені у спеціалізованому комп'ютері, сполученим з ним інтерфейсом.

Ефективність системи управління МІО визначається за сукупністю критеріїв:

- час на обробку (оцінка системою поставлених перед нею цілей, досягнення необхідної твердості та зносостійкості оброблюваної деталі за максимально короткий час);
- витрати на електроенергію (оцінка використання (економії) системою необхідних ресурсів (електроенергії));
- трудомісткість обробки деталі (співвідношення між рівнями продуктивності та витратами для їх досягнення).

Стійкість системи – здатність системи протистояти процесу руйнування та підтримувати впродовж певного часу вибраний режим функціонування. Стійкість системи управління МІО в загальному вигляді можна розкрити через наступні характеристики: висока життєздатність, гнучкість, адаптивність до умов обробки. Розроблена система повинна швидко реагувати на випадкові зміни вхідних змінних та не повинна виходити за межі робочих режимів її роботи. Наприклад, коли на обмотку облаштування МІО буде подано дуже високу напругу, це призведе до аварії. Якщо різко змінити параметри режимів, це призведе до виникнення потужних імпульсів магнітного поля, здатних зруйнувати виріб та елементи облаштування МІО. Якщо система буде враховувати випадковість вимірюваних величин, це підвищить її стійкість та ефективність.

Враховуючи функціональні вимоги та порівняльний аналіз методів управління МІО, можна зробити висновок, що управління процесом МІО повинно здійснюватися за допомогою інформаційної системи управління, що базується на основі математичного апарату: генетичних алгоритмах і нечітких нейронних мереж. Генетичні алгоритми використовуються для оптимізації режимів МІО, а нечіткі нейронні мережі – для прогнозування результатів МІО.

Система повинна містити базу знань відносно проведених раніше обробок виробів, на підставі яких можливе здійснення прогнозів результатів обробки деталей, що мають схожу конструкцію.

Також, у базі знань повинні міститися діапазони параметрів режимів МІО, які були напрацьовані дослідним шляхом. З огляду на це, у системі потрібно передбачити вибір оптимальних значень із діапазону параметрів режимів МІО. Оскільки процес МІО досить трудомісткий (і для отримання результату потрібна велика кількість часу і ресурсів) система повинна прогнозувати результат обробки і налаштовувати режими за необхідності, якщо результат МІО не відповідатиме вимогам. У той же час необхідно враховувати, що матеріал оброблюваних деталей може мати відхилення за фізико-хімічним складом і це вимагає індивідуального підбору режимів у процесі обробки.

Управління МІО є багатокритеріальною задачею, яка повинна вирішуватися з позиції оптимізації за двома основними контурами управління процесом. Перший контур здійснює управління згідно з критеріями ефективності: часом, витратеним на обробку, витратами на електроенергію, трудомісткістю обробки деталі. Другий контур здійснює управління згідно з критеріями якості обробки: стійкістю, ресурсом, надійністю.

Враховуючи вимоги до системи управління і контурів управління, ми можемо визначити їх узагальнену структуру (рис. 1).

Залежно від отриманого результату порівняння початкових даних система може працювати по одному з двох контурів:

1) Якщо система за вихідними даними у базі даних знаходить ідентичні початкові дані, як і в оброблюваній деталі, то отримані параметри режимів обробки подаються через «модуль прогнозування результатів МІО» і «модуль прийняття рішення щодо вибору режимів МІО» на «модуль МІО». У «модулі МІО» відбувається МІО даної деталі.

2) Якщо у базі даних ідентичні початкові дані не знаходяться, система вибирає параметри режиму МІО, схожі за видом і матеріалом деталей, що оброблювалися раніше. Відібраний діапазон параметрів режимів подається на «модуль оптимізації параметрів режимів МІО». У «модулі оптимізації параметрів режимів МІО» визначаються оптимальні режими за допомогою генетичного алгоритму, який розв'язує цю задачу шляхом випадкового підбору, комбінування і варіації знайдених параметрів режимів з використанням механізмів природної еволюції, таких, як спадкоємність, мутація, відбір, кросингвер. Згенеровані в «модулі оптимізації параметрів режимів МІО» оптимальні параметри режимів подаються через «модуль прогнозування результатів МІО» і «модуль ухвалення рішення по вибору режимів МІО» на «модуль МІО». У «модулі МІО» відбувається МІО цієї деталі.

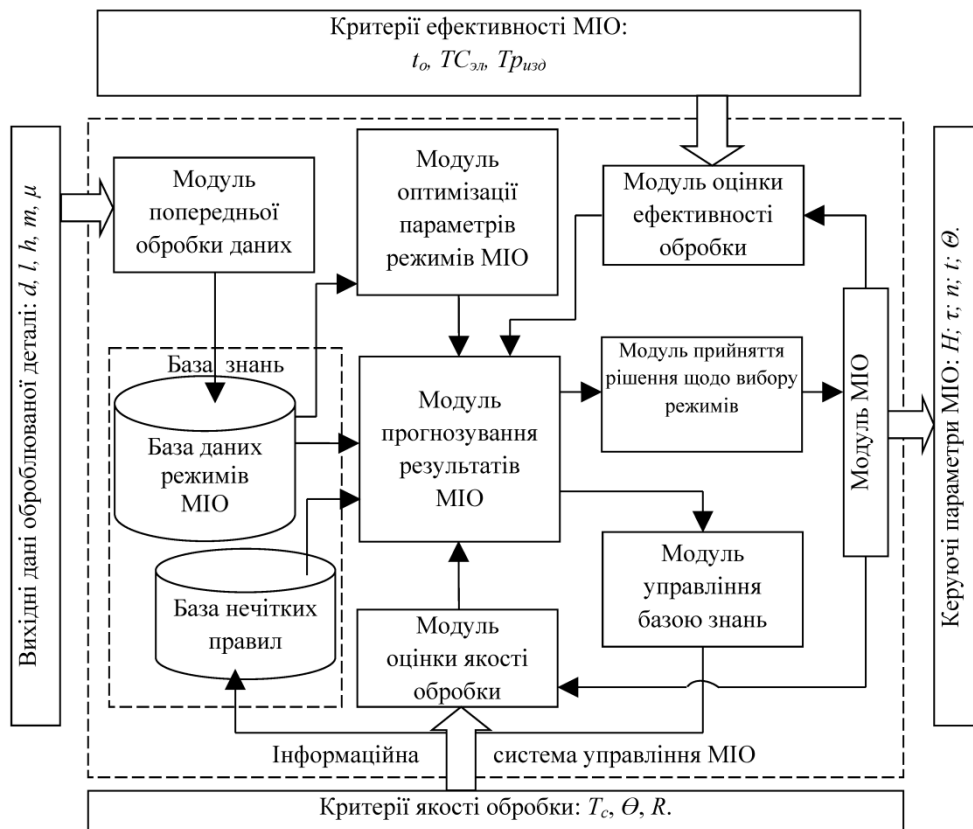


Рисунок 1 – Структура інформаційної системи управління МІО

Після МІО деталі за режимами, отриманими по одному з двох контурів роботи системи, результат обробки (стійкість деталі) оцінюється у двох основних модулях оцінки:

– у «модулі оцінки якості обробки» згідно з критеріями якості обробки: стійкістю, ресурсом, надійністю;

– у «модулі оцінки ефективності обробки» за критеріями ефективності: часом, витраченим на обробку, витратами на електроенергію, трудомісткістю обробки деталі.

Після оцінювання системою результату обробки вносяться корективи в параметри режимів МІО, в «модулі прогнозування результатів МІО» за допомогою алгоритму зворотного поширення помилки, який налаштовує параметри антецедентів правил, тобто функцій приналежності. Кожна ітерація процедури налаштування виконується у два етапи. На першому етапі на входи подається навчальна вибірка, і по нев'язці між бажаною і дійсною поведінкою мережі ітераційним методом найменших квадратів знаходяться оптимальні параметри вузлів четвертого шару. На другому етапі залишкова нев'язка передається з виходу мережі на входи, і методом зворотного поширення помилки модифікуються параметри вузлів першого шару. При цьому, знайдені на першому етапі коефіцієнти висновків правил не змінюються. Під час прямого проходу визначаються параметри виводу методом найменших квадратів. Під час зворотного проходу оновлюються параметри передумов за допомогою методу зниження градієнта. Ітераційна процедура налаштування триває, доки нев'язка перевищує заздалегідь встановлене значення стійкості деталі.

Аналіз сучасних програмних засобів показав, що найбільш оптимальним програмним рішенням для реалізації ІСУ МІО є використання пакета MATLAB [11–13].

Для вирішення поставленого завдання реалізації ІСУ МІО нами були використані (рис. 2):

1. Комп'ютер з програмою MATLAB. Використовувалися блоки:

– блок генетичних алгоритмів для оптимізації режимів МІО, що реалізується за допомогою пакета Genetic Algorithm and Direct Search Toolbox;

– блок прогнозування результату на основі нечітких нейронних мереж управління МІО реалізовуємо за допомогою пакета Fuzzy Logic Toolbox.

2. Розроблено модуль управління соленоїдом на базі мікропроцесора STM32L-DISCOVERY, який переводить дані режимів обробки з комп'ютера на елементи установки МІО, які нею керують.

3. Установка МІО.

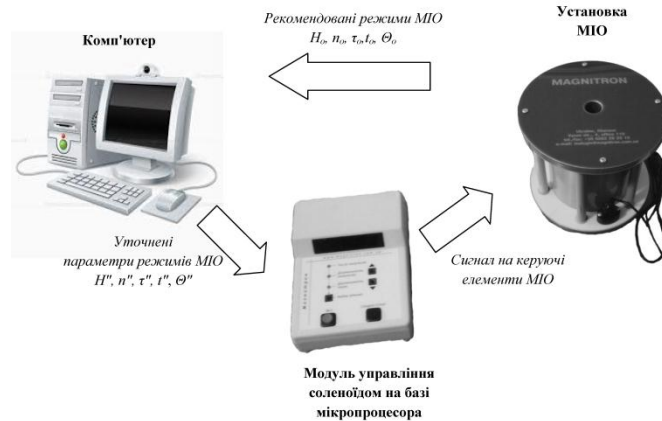


Рисунок 2 – Схема реалізації інформаційної системи управління МІО

У роботі був проведений експеримент дослідження впливу МІО на знос різального інструменту. Експеримент проведений на апараті «Магнітрон» в ході якого було оброблено 250 свердел (сталь Р6М5, діаметр – 4 мм) різними наборами параметрів режимів МІО.

Випробування на знос оброблених МІО свердел були проведені на свердлувальному верстаті 2М112. Виконувалося свердління сталевієї плити зі сталі 40Х, завтовшки 15 мм. Стійкість визначається за кількістю просвердлених отворів випробовуваним свердлом. Оцінювалася стійкість у відсотках, за 100 відсотків бралася стійкість необробленого МІО свердла. Отримані в наслідок експерименту дані – 250 наборів параметрів режимів МІО і отриманої стійкості свердел для кожного набору параметрів, були узяті для повчальної вибірки та записані у блок прогнозування результату на основі нечіткої нейронної мережі.

За результатом експерименту встановлені залежності впливу параметрів режимів МІО на стійкість оброблюваного інструменту до зносу. За допомогою пакета застосованих програм для вирішення завдань технічних обчислень MATLAB були проаналізовані результати досліджень і побудовані відповідні графіки залежності режимів обробки МІО від отриманої стійкості оброблюваного інструменту.

У ході експерименту було встановлено, що для забезпечення зворотного зв'язку в системі управління МІО вихідною величиною стійкість оброблюваного інструменту прийняти неможливо, оскільки для вимірювання стійкості після МІО треба витратити дуже багато часу і технічних засобів, що не забезпечує зворотний зв'язок у системі управління. У ході досліджень було виявлено, що стійкість деталі, яка пройшла магнітну обробку, залежить від величини залишкової намагніченості (сприйнятливості матеріалу). Намагніченість (магнітна сприйнятливість) деталі досить точно визначається за допомогою магнітометрів, тесламетрів або інших приладів, що використовують датчики Хола. У нашому експерименті залишкову намагніченість 250 досліджуваних свердел було виміряно тесламетром НТ20 та побудований графік залежності стійкості від залишкової намагніченості обробленого інструменту.

Тому прогнозування очікуваної стійкості конкретної деталі велося з урахуванням величини залишкового намагнічування. Це дозволило враховувати розсіювання (диспергування) магнітної енергії у виробі конкретної маси і габаритів, а також вносити корективи на перенапруги у зв'язку з перемагнічуванням.

За результатами проведеного експерименту була отримана найбільша стійкість оброблювального свердла при залишковій намагніченості рівній 61,0175 мТл та режимах обробки:

- 1) напруженість магнітного поля – 160 Н;
- 2) час імпульсу в серії – 1,2 с;
- 3) число імпульсів у серії – 1;
- 4) інтервал між імпульсами в серії – 1,6 с;
- 5) число серій імпульсів – 4;

Висновки. У роботі вирішено важливе науково-прикладне завдання підвищення ефективності управління процесом магнітно-імпульсної обробки металевих виробів в умовах застосування інформаційних технологій, що базуються на принципах функціонування нечітких нейронних мереж і генетичних алгоритмів.

Виконано аналіз застосування існуючих інформаційних технологій для вирішення завдань управління процесами магнітно-імпульсної обробки металевих виробів. Визначено необхідність розробки нового і вдосконалення існуючого математичного і програмного забезпечення інформаційних систем управління процесами МІО металевих виробів.

Запропоновано концепцію побудови інформаційної системи управління процесом МІО металевих виробів, що забезпечує адаптивне управління таким процесом в умовах неповноти початкових даних відносно фізико-механічних властивостей конкретного виробу, що дозволяє істотно спростити процес вибору параметрів МІО для схожих за геометричною формою виробів.

Розроблено інформаційну технологію управління МІО металевих виробів, що дозволяє управляти процесами їх обробки з урахуванням властивостей матеріалу і форми виробу і забезпечує швидке переналагодження технологічного устаткування на обробку виробів різного типу.

Розроблено програмне і апаратне забезпечення інформаційної системи управління МІО, що дозволяє здійснити практичну реалізацію створеної інформаційної технології управління процесом обробки металевих виробів.

Визначено основні критерії оцінки ефективності застосування запропонованої інформаційної технології, що дозволяє реалізувати варіанти управління процесом МІО, що забезпечують поліпшення економічних і часових показників такої обробки порівняно з існуючими підходами на 25–30 %.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Малыгин Б. В. Бень А. П. Магнитное упрочнение изделий. (Теория и практика) : монография. Херсон : Издательство Херсонского государственного морского института, 2009. 352 с.
2. Козлюк А. Ю., Овчаренко А. Г. Конкурентоспособность магнитно-импульсной обра-ботки в машиностроении. *Управление качеством образования, продукции и окружающей среды : матер. Всероссийской науч.-практ. конф.* Бийск: АлтГТУ, 2006. С. 208–211.
3. Бабак В. Ф., Рыженко И. Н. Аспекты проектирования информационных систем. *Тезисы конференции посвященной 200-ю со дня рождения Пушкина.* Бишкек-КРСУ, 1999.
4. Барков М. Б. Системы искусственного интеллекта в машиностроении : учеб. пособие. Саратов : Саратов. гос. техн. ун-т, 2004. 119 с.
5. Казаков П. В. Оптимизация многоэкстремальных функций на основе кластерной модификации генетического алгоритма. *Одиннадцатая национальная конференция по искусственному интеллекту КИИ-08 : труды конференции.* Т. 3. М. : Ленанд, 2008. С. 26–32.
6. Минаев Ю. Н., Филимонова О. Ю., Бенамеур Лиес. Методы и алгоритмы решения задач идентификации и прогнозирования в условиях неопределенности в нейросетевом логическом базисе. М. : Горячая линия – Телеком, 2003. 205 с.

7. Атанов С. К. Алгоритмы нечеткой логики в системах с микроконтроллерным управлением. *Dspace software copyright*. 2012.
8. Галушкин А. И. Нейронные сети. Основы теории. М. : Горячая линия – Телеком, 2010.
9. Гончарова С. Г. Интеллектуальная система управления процессом механообработки с оперативным использованием нечеткой нейросетевой модели знаний. *Научная библиотека диссертаций и авторефератов disserCat*, 2001. 207 с.
10. Зориктуев В. Ц., Шангареев Р. Р. Система автоматического управления режимами резания на основе нечеткой логики. Уфа : УГАТУ, 2010. Т. 14. № 2 (37). С. 163–169.
11. Кочура А. В. Генетические алгоритмы в MathLab : методические указания по выполнению лабораторной работы по дисциплине «Современные научные проблемы проектирования и технологии электронных средств». Курск, 2010. 19 с.
12. Леоненков А. В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. СПб : БХВ-Петербург, 2005. 736 с.

REFERENCES

1. Malihgin, B. V. & Benj, A. P. (2009). *Magnitnoe uprochnenie izdeliyj. (Teoriya i praktika)* : monograf. Kherson : Izdatel'stvo Khersonskogo gosudarstvennogo morskogo instituta.
2. Kozlyuk, A. Yu. & Ovcharenko, A. G. (2006). Konkurentosposobnostj magnitno-impul'snoj obra-botki v mashinostroenii. *Upravlenie kachestvom obrazovaniya, produkcii i okruzhayuthey sredih : mater. vsrossijskoj nauch.-prakt. konf.* Biyjsk: AltGTU, 208–211.
3. Babak, V. F. & Rihzhenko, I. N. (1999). Aspektih proektirovaniya informacionnihk sistem. *Tezish konferencii posvyathennoj 200-yu so dnya rozhdeniya Pushkina.* Bishkek-KRSU.
4. Barkov, M. B. (2004). *Sistemih iskusstvennogo intellekta v mashinostroenii* : ucheb. posobie. Saratov : Sarat. gos. tekhn. un-t.
5. Kazakov, P. V. (2008). Optimizaciya mnogoehkstremaljnihih funkcij na osnove klasternoj modifikacii geneticheskogo algoritma. *Odinnadcataya nacionaljnaya konferenciya po iskusstvennomu intellektu KII-08 : trudih konferencii.* Т. 3. Moskva : Lenand, 26–32.
6. Minaev, Yu. N., Filimonova, O. Yu., Benameur Lies. (2003). *Metodih i algoritmih resheniya zadach identifikacii i prognozirovaniya v usloviyakh neopredelennosti v neyvrosetevom logicheskom bazise.* Moskva : Goryachaya liniya – Telekom.
7. Atanov, S. K. (2012). Algoritmih nechetkoj logiki v sistemakh s mikrokontrollernim upravleniem. *Dspace software copyright*.
8. Galushkin, A. I. (2010). Neyjronnihe seti. Osnovih teorii. Moskva : Goryachaya liniya – Telekom.
9. Goncharova, S. G. (2001). Intellektualjnaya sistema upravleniya processom mekhanoobrabotki s operativnim ispoljzovaniem nechetkoj neyvrosetevoj modeli znaniyj. *Nauchnaya biblioteka dissertacij i avtoreferatov disserCat*.
10. Zoriktuev, V. C., & Shangareev, R. R. (2010). Sistema avtomaticheskogo upravleniya rezhimami rezaniya na osnove nechetkoj logiki. Ufa : UGATU. Т. 14. № 2 (37), 163–169.
11. Kochura, A. V. (2010). *Geneticheskie algoritmih v MathLab* : metodicheskie ukazaniya po vihpolneniyu laboratornoj rabotih po discipline «Sovremennihe nauchnihe problemih proektirovaniya i tekhnologii ehlektronnihk sredstv». Kursk.
12. Leonenkov, A. V. (2005). Nechetkoe modelirovanie v srede MATLAB i fuzzyTECH. Sanct-Peterburg : BKhV-Peterburg.

Врублевский Р. Е. ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКОЙ ДЕТАЛЕЙ СУДОВЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Сложность управления процессом МИО заключается в том, что необходимо одновременно осуществлять управление несколькими параметрами (напряженностью магнитного поля, числом импульсов в серии, тем импульса в серии, интервалами между импульсами в серии, числом серий импульсов). На данный момент времени фактически отсутствуют четкие формальные модели.

описывающие процесс действия импульсного магнитного поля на изделие. Целью работы является повышение эффективности процесса МИО металлических изделий по время благодаря разработке информационной системы управления. В статье изложен метод построения базы нечетких правил на основе многочисленных данных для интеллектуальной системы управления выбором режимов магнитно-импульсной обработки на основе сети ANFIS. Данный метод позволит снизить время построения базы правил модуля управления процессом. Разработано программное и аппаратное обеспечение информационной системы управления МИО, что позволяет осуществить практическую реализацию созданной информационной технологии управления процессом обработки металлических изделий.

Определены основные критерии оценки эффективности применения предлагаемой информационной технологии, позволяющей реализовать варианты управления процессом МИО, обеспечивающих улучшение экономических и временных показателей такой обработки по сравнению с существующими подходами на 25-30%.

Ключевые слова: база нечетких правил, интеллектуальная система управления, магнитно-импульсная обработка.

Vryblevskiy R. Ye. INFORMATION SYSTEM FOR CONTROL OF MAGNETIC-PULSE PROCESSING OF DETAILS OF SHIP POWER PLANTS

The complexity of controlling the M&E process is that it is necessary to simultaneously control several parameters (magnetic field strength, number of pulses in series, pulse time in series, intervals between pulses in series, number of pulse series). At this point in time, there are in fact no clear formal models describing the process of action of a pulsed magnetic field on a product. The purpose of the work is to increase the efficiency of the M&E process of metal products by developing an information management system. The article describes the method of constructing a fuzzy rule base based on numerical data for an intelligent control system for the selection of magnetic pulse processing modes based on the ANFIS network. This method will reduce the time to build a rule base of the process control module. The important scientific-applied problem of increasing the efficiency of control of the process of magnetic-pulse processing of metal products in the conditions of application of information technologies based on the principles of functioning of fuzzy neural networks and genetic algorithms is solved in the work.

The analysis of the use of existing information technologies for solving the problems of control of the processes of magnetic-pulse processing of metal products is performed. The necessity of development of new and improvement of existing mathematical and software of information systems of process control of MIO of metal products is determined.

The concept of construction of an information system for process control of MIO of metal products is offered, which provides adaptive control of such process in the conditions of incompleteness of the initial data with respect to the physical and mechanical properties of a specific product, which allows to simplify significantly the process of choosing the parameters of MIO for similar geometric products.

The information technology of control of M&E of metal products is developed, which allows to control the processes of their processing taking into account the properties of the material and the shape of the product and provides a quick adjustment of technological equipment for processing of products of different type.

The software and hardware of the MIO control information system have been developed, which enables the practical implementation of the created information technology of metalworking process control.

The main criteria for evaluating the efficiency of the application of the proposed information technology, which allows to implement options for managing the process of M&E, which provide an improvement in the economic and temporal indicators of such processing, compared with existing approaches by 25-30%.

Keywords: fuzzy rule base, intelligent control system, magnetic pulse processing.

© Врублевський Р. Є.

Статтю прийнято
до редакції 3.05.19

АНАЛІЗ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ЧАСТОТИ З ЕЛЕКТРИЧНИМ ТА МАГНІТНИМ ПІДСУМОВУВАННЯМ ВИХІДНИХ НАПРУГ І МАГНІТНИХ ПОТОКІВ

Ищенко І. М., к.т.н., професор кафедри експлуатації суднового електрообладнання та засобів автоматики Херсонської державної морської академії;

Голощанов С. С., к.т.н., доцент кафедри експлуатації суднового електрообладнання та засобів автоматики Херсонської державної морської академії, e-mail: goloscharov46@gmail.com

В більшості систем випрямляч і інвертор зібрані на основі тиристорних і транзисторних модулів. Управління випрямлячем і інвертором здійснюється відповідними схемами, а одержання синусоїдальної напруги здійснюється за допомогою синхронного компенсатора, фільтрів, або забезпеченням широтно-імпульсної модуляції напруги на виході інвертора. Достатньо широке розповсюдження получили схеми, які забезпечують отримання близького до синусоїдального ступінчатого напруження за рахунок електричного підсумовування вихідних напруг декількох інверторів. У роботі поставлено за мету виконати математичний аналіз напівпровідникових перетворювачів частоти з електричним та магнітним підсумовуванням вихідних напруг і магнітних потоків. У роботі доведено, що в перетворювачах з багатофазними інверторами і ТОМП (5–7 фазними) значно спрощуються системи управління і регулювання, а також системи охолодження, що вказує на необхідність проведення порівняних досліджень таких перетворювачів з багаторівневими інверторами. Дослідження показало, що системи охолодження перетворювачів можуть бути виконані на основі примусових повітряних, що значно спрощує виробництво та експлуатацію перетворювачів частоти різного призначення

Ключові слова: асинхронний двигун, інвертор, обмотувальний коефіцієнт.

DOI: 10.33815/2313-4763.2019.1.20.087-096

Вступ. У сучасних автономних системах електропостачання й електроприводів широко використовуються напівпровідникові перетворювачі електроенергії [1, 4, 7, 8]. Це обумовлено як засвоєнням виробництва силових транзисторів і конденсаторів великої потужності, так і рядом суттєвих недоліків властивих тиристорних перетворювачів [5]. До основних з таких недоліків відносяться складність систем управління і труднощі отримання синусоїдальної напруги. У транзисторних перетворювачах суттєво спрощуються системи управління, однак одержування синусоїдальної напруги залишилося актуальним [2, 5].

Актуальність досліджень. У більшості систем випрямляч та інвертор зібрані на основі тиристорних і транзисторних модулів [5]. Управління випрямлячем та інвертором здійснюється за відповідними схемами, а одержання синусоїдальної напруги здійснюється за допомогою синхронного компенсатора, фільтрів, або забезпеченням широтно-імпульсної модуляції напруги на виході інвертора [10].

Достатньо широке розповсюдження одержали схеми, які забезпечують отримання близького до синусоїдального ступінчатого напруження за рахунок електричного підсумовування вихідних напруг декількох інверторів [8].

Ефективним засобом зниження вмісту вищих гармонік і отримання синусоїдальної напруги є багаторазова комутація силових елементів інвертора за половину періода вихідної напруги при модуляції ширини, що заповнює основну хвилю імпульсів по синусоїдальному або наближеному до синусоїдального закону. При цьому можна добитися зниження більшості гармонік [10].

Недоліком цього засобу являються складність пристроїв управління і підвищені динамічні втрати в силових напівпровідникових елементах.

Крім електричного підсумування вихідних напруг інверторів і отримання синусоїдальної напруги використовується метод магнітного підсумування потоків. Найбільш просто цей спосіб здійснюється за допомогою трансформатора з обертаючим магнітним полем (ТОМП) [3, 11].

Мета дослідження – виконати математичний аналіз напівпровідникових перетворювачів частоти з електричним та магнітним підсумовуванням вихідних напруг і магнітних потоків.

Матеріали досліджень. Одним із складних завдань при розробці та дослідженні СЕЕС є узгодження параметрів і характеристик первинних джерел електроенергії і напівпровідникових перетворювачів. У зв'язку з цим проведемо аналіз і визначимо складові потужностей і параметрів перетворювачів.

Основною особливістю роботи джерел змінного струму на напівпровідникові перетворювачі (випрямлячі, інвертори і т.п.) є безперервні повторювані несиметричні перехідні процеси, внаслідок яких джерела змінного струму знаходяться у деякому квазісталому режимі [7].

Безперервно повторювані короткі замикання фаз під час комутації чергуються несиметричним навантаженням у міжкомутаційному інтервалі. При цьому величина напруги на затискачах джерела (генератора) не залишається незмінною. У зв'язку з цим збільшується розрахункова електромагнітна потужність джерела, яка може бути представлена сумою чотирьох складових:

$$S_3 = \sqrt{P_3^2 + Q_3^2 + T_3^2 + H_3^2},$$

де активна потужність трифазного навантаження:

$$P_3 = \frac{U_{AB}}{\sqrt{3}} \sum_{s=A,B,C} I_{sl} \cos \varphi_{sl};$$

- реактивна потужність:

$$Q_3 = \frac{U_{AB}}{\sqrt{3}} \sum_{s=A,B,C} I_{sl} \sin \varphi_{sl};$$

- потужність спотворення трифазного навантаження:

$$T_3 = U_{AB} \sqrt{\sum_{s=A,B,C} \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq l}}^{\infty} I_{sk}^2};$$

- потужність несиметрії трифазного навантаження:

$$H_3 = \frac{U_{AB}}{\sqrt{3}} \sqrt{2 \sum_{s=A,B,C} I_{sl}^2 - \sum_{\substack{p,q=A,B,C \\ p \neq q}} I_{pl} I_{ql} \cos(\varphi_{pl} - \varphi_{ql})}.$$

Кут φ_{sl} у виразах активної і реактивної потужностей є зрушення фаз між лінійним струмом і фазною напругою еквівалентного симетричного джерела, з'єднаного у зірку.

Потужність спотворення в свою чергу визначається сумою низькочастотної і високочастотної складових:

$$T_{3H} = U_{AB} \sqrt{\sum_{s=A,B,C} \sum_{k=1}^{l-1} I_{sk}^2};$$

$$T_{3B} = U_{AB} \sqrt{\sum_{s=A,B} \sum_{k=l+1}^{\infty} I_{sk}^2}$$

Розглянемо кожну з складових повної потужності окремо.

Активна потужність (P) визначає кількість електричної енергії, необоротно утворюється за секунду в теплоту або інші форми енергії, і в загальному випадку включає в себе корисну потужність і потужність втрат. Під активною потужністю перетворювача розуміють його активну потужність на виході мережі змінного струму, яка в випрямному режимі дорівнює потужності постійного струму плюс втрати, а в інвертному режимі дорівнює потужності постійного струму мінус втрати в установці.

Для однієї фази ця потужність визначається виразом:

$$= \frac{1}{T} \int_0^T u_{AO} i_A dt,$$

яке при синусоїдальній живлячій напрузі приводить до виду:

$$P = U_{AO} I_{Al} \cos \varphi_{Al},$$

де I_{Al} – діюче значення основної гармоніки струму мережі, а φ_{Al} – фазовий кут цієї гармоніки.

Для трифазного ланцюга при симетричному навантаженні активна потужність визначається наступним виразом:

$$P_3 = \sqrt{3} U_{AB} I_{Al} \cos \varphi_{Al}.$$

Активна потужність, яка споживається складною системою дорівнює сумі активних потужностей окремих елементів системи.

Реактивна потужність Q обумовлена певними властивостями електричного кола, що викликають зсув по фазі кривих струмів і напруг. У напівпровідникових перетворювачах при синусоїдальних напругах джерела ця складова повної потужності обумовлена зміщенням гармоніки струму щодо напруги при збільшенні кута управління елементами перетворювача. Для однієї фази реактивна потужність визначається інтегральним виразом при частоті приведення, яка дорівнює частоті джерела ω_l :

$$Q = -\frac{1}{\omega_l T} \int_0^T i \frac{du}{dt} dt,$$

Яке при синусоїдальній нарузі приводиться до вигляду:

$$Q = U_{AO} I_{Al} \sin \varphi_{Al}.$$

Для трифазного кола при симетричному навантаженні фаз реактивна потужність визначається виразом:

$$Q_3 = \sqrt{3} U_{AB} I_{Al} \sin \varphi_{Al}.$$

Потужність спотворення T – це складова повної потужності, обумовлена наявністю у кривій струму вищих та нижчих гармонік, які відсутні у кривій напруги мережі. У перетворювачах вона створюється струмами вищих і нижчих гармонік, викликаними вентильною дією силових елементів перетворювачів.

Потужність спотворення всієї системи не можна визначити алгебраїчним підсумовуванням потужностей спотворення окремих елементів, оскільки вона обумовлена протіканням струмів різних частот [9].

Потужність несиметрії H – це складова повної потужності, яка виникає тільки в багатофазному колі та обумовлена несиметрією навантаження фаз [7].

При симетричному навантаженні фаз потужність несиметрії дорівнює нулю, і повна потужність дорівнює сумі трьох складових: активної, реактивної і спотворення:

$$S_3 = \sqrt{P_3^2 + Q_3^2 + T_3^2}.$$

Розрахункові значення потужностей перетворювачів дозволяють визначити їх енергетичні коефіцієнти: коефіцієнт потужності, коефіцієнт зсуву, коефіцієнт спотворення і коефіцієнт несиметрії.

Коефіцієнт потужності визначає ступінь використання повної потужності, яка відбирається із мережі і може бути виражений через інші енергетичні коефіцієнти $k_{M3} = k_{c3} k_{i3} k_{H3}$.

Коефіцієнт зсуву k_c характеризує співвідношення між активною і реактивною потужностями. Для трифазних перетворювачів визначається рівністю:

$$k_{c3} = \sqrt{\frac{P_3^2}{P_3^2 + Q_3^2}}.$$

У симетричних трифазних перетворювачах цей коефіцієнт дорівнює косинусу кута зсуву основної гармоніки струму щодо синусоїдальної напруги живлення.

Коефіцієнт спотворення трифазного перетворювача визначається рівністю:

$$k_{из} = \frac{\sqrt{P_3^2 + Q_3^2}}{\sqrt{P_3^2 + Q_3^2 + T_3^2}}$$

Коефіцієнт несиметрії трифазного перетворювача характеризує ступінь несиметрії навантаження фаз і визначається із рівності:

$$k_{нз} = \sqrt{\frac{P_3^2 + Q_3^2 + T_3^2}{S_3^2}}$$

Отримані енергетичні співвідношення і коефіцієнти дозволяють визначити потужність і параметри джерела живлення перетворювачів, їх основні параметри і характеристики. При цьому потужність і параметри первинних джерел електроенергії, в основному синхронних генераторів, необхідно визначати і розраховувати з урахуванням особливостей роботи напівпровідникових перетворювачів. У цьому випадку спрощується вирішення питання забезпечення необхідної якості електроенергії.

Живлення і управління гребних електродвигунів з електрорухом в даний час в більшості випадків забезпечується з допомогою ПЧ, виконуваних, як вже наголошувалося, на сучасних напівпровідникових елементах. При цьому в якості ПЧ застосовуються перетворювачі, виконані за схемами представленим на рисунку 1 [3].

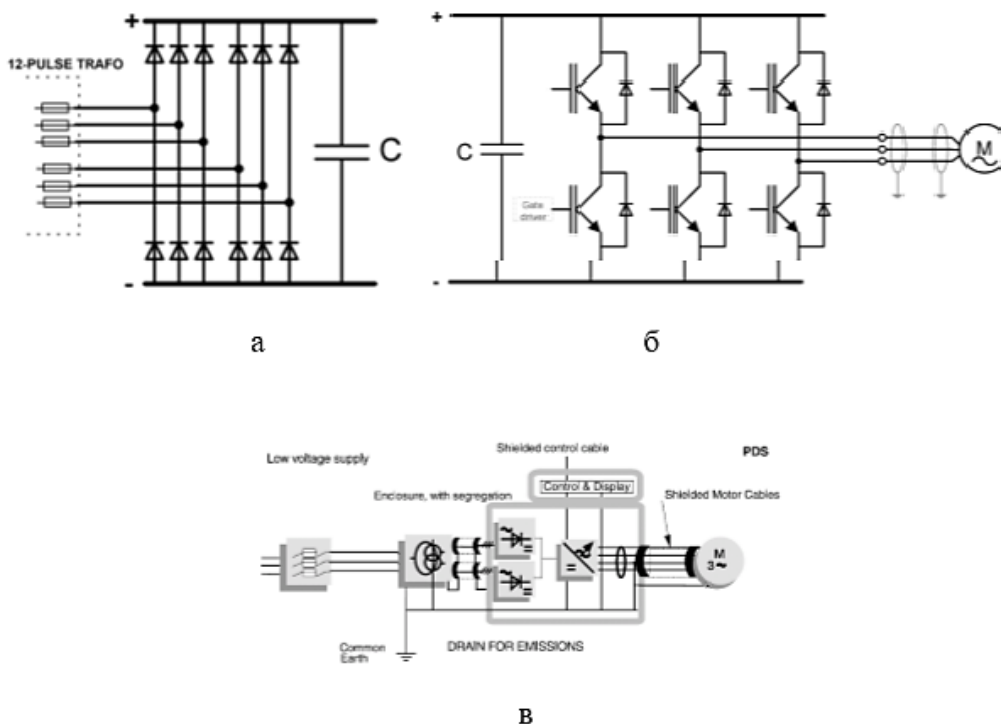


Рисунок 1 – Перетворювач частоти:

а – випрямляч; б – інвертор; в – загальний вид перетворювача частоти

Істотним недоліком розглянутих високовольтних електроприводів є їх велика вартість. Зниження вартості досягається вживанням двохтрансформаторної схеми, в якій подвійна трансформація напруги здійснюється за допомогою того, що знижує і підвищує високовольтних трансформаторів, що дозволяє використовувати для регулювання частоти відносно дешевий низьковольтний перетворювач.

Такі двотрансформаторні перетворювачі відрізняють відносною дешевизною і простотою практичної реалізації, тому вони часто застосовуються для управління високовольтними електродвигунами в діапазоні потужностей до 1,5 МВт. Основними недоліками двохтрансформаторних перетворювачів є високі масогабаритні характеристики, а також менші в порівнянні з іншими схемами ККД (93–96 %) і надійність.

Багаторівневі перетворювачі частоти відрізняються від розглянутих схем тим, що в них велике число послідовно включених вентилів в плечі використовується для формування вихідної напруги із зменшеними кроками по напрузі.

Це забезпечує кращу форму кривої вихідної напруги, а також зменшує кидки напруги, що покращує режим роботи навантаження і знижує рівень електромагнітних перешкод, що випромінюються перетворювачем. Такі перетворювачі частоти будуються за схемою автономного інвертора напруги (АІН) на IGBT транзисторах.

Найкращі показники мають так звані каскадні багаторівневі перетворювачі частоти (КМПЧ), використовувани без додаткових фільтрів. При напрузі 6 кВ КМПЧ мають 6 однофазних автономних інверторів напруги (АІН) з ізолюваними джерелами постійного струму (ПІТ) на фазу. Вихідна напруга фази КМПЧ має $N=13$ рівнів. Основний недолік таких КМПЧ – висока складність силових і інформаційних ланцюгів перетворювача і, як наслідок, висока вартість [8].

На рис. 2 представлена математична модель однієї фази спрощеного (без схем випрямлення) перетворювача частоти з 6-однофазними АІН на фазу. Схема досить складна, для формування імпульсів, що управляють, в схемі використана так звана мультиплексорна ШИМ.

На рисунках 3 і 4 представлені вихідні напруги перетворювача.

Такі складні багаторівневі схеми перетворювачів використовують переважно для високовольтного обладнання.

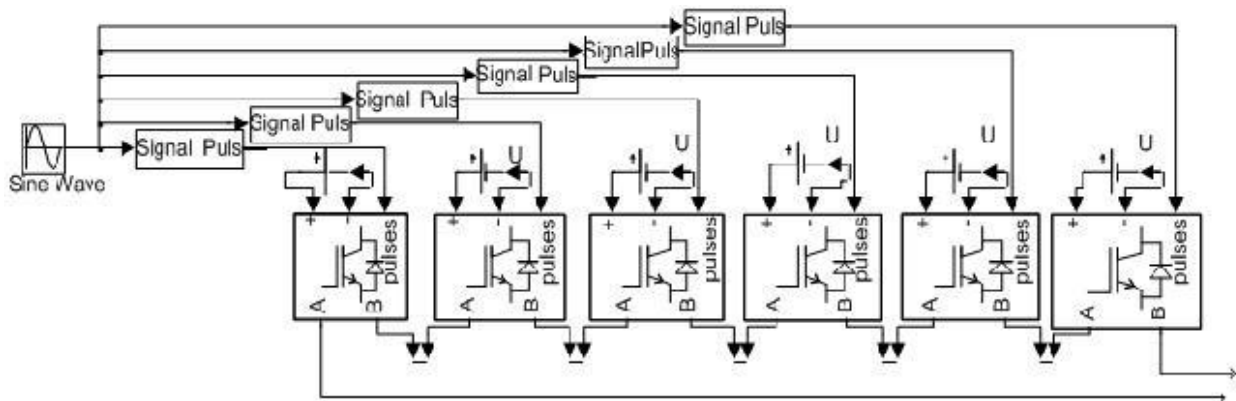


Рисунок 2 – Математична модель однієї фази КМПЧ з шістьма АІН на фазу

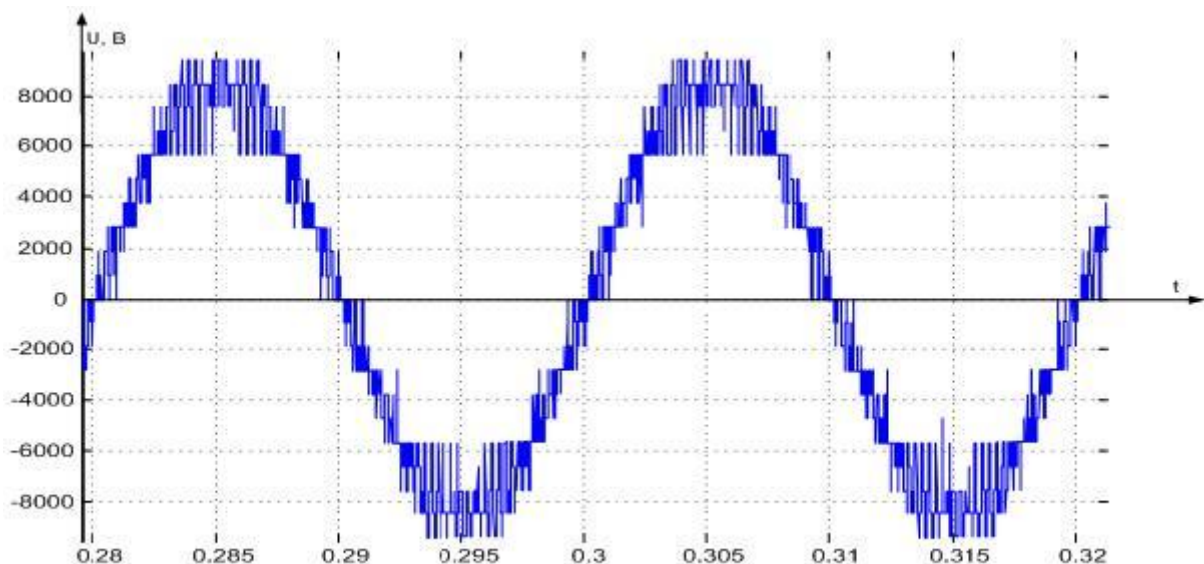


Рисунок 3 – Вихідна напруга однієї фази КМПЧ

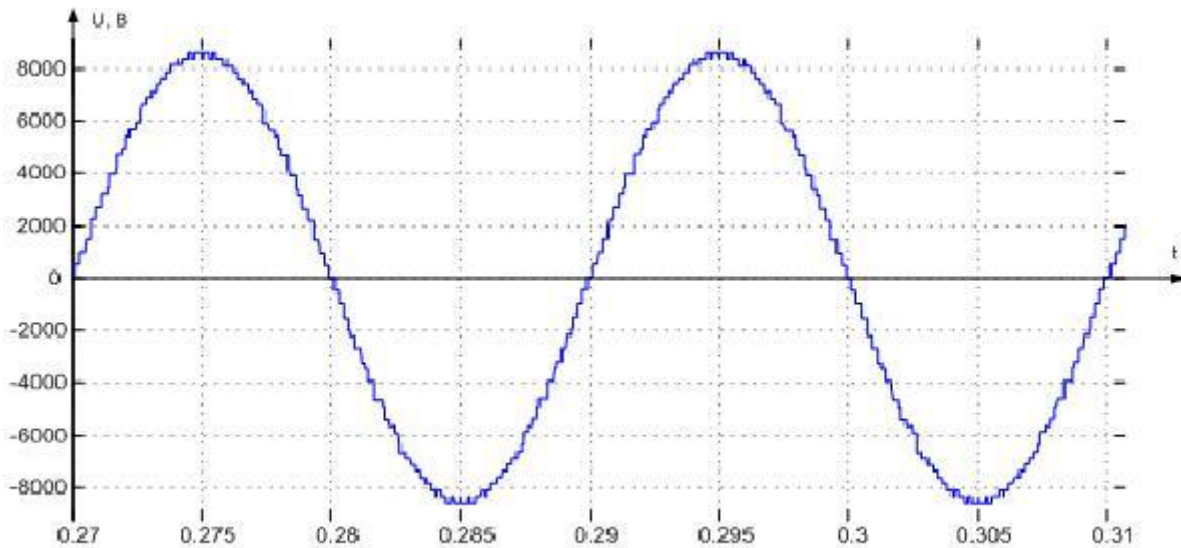


Рисунок 4 – Вихідна напруга однієї фази НКМПЧ

Значне спрощення силової схеми ПЧ (замість 24 повністю керованих ключів в одній фазі) досягається використанням 12 ключів у фазі. Схема трансформатора для живлення вказаних ключів приведена на рис. 5.

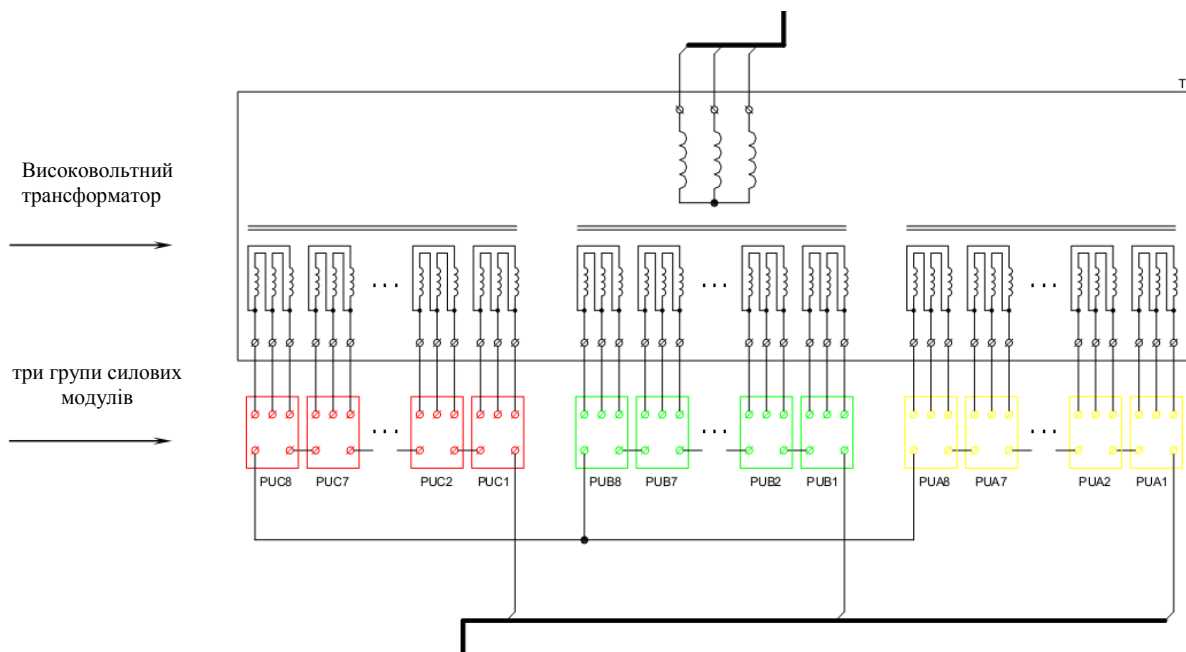


Рисунок 5 – Схема трансформатора для живлення ключів інвертора

Слід зазначити, що одному із складних завдань при створенні що розглядаються ПЧ є забезпечення охолодження напівпровідникових елементів. Тому в більшості випадків охолодження таких ПЧ забезпечується вживанням систем рідинного примусового охолодження. Як рідина зазвичай використовується вода, що дистилує.

Крім електричного підсумування вихідних напруг інверторів і отримання синусоїдальної напруги використовується метод магнітного підсумування потоків. Найбільш просто цей спосіб здійснюється за допомогою трансформатора з обертаючим магнітним полем (ТОМП). Конструктивно ТОМП може бути виконаний на базі асинхронної машини з нерухомим ротором. При цьому ТОМП може бути використаним для перетворення числа фаз [3, 11].

Для зменшення намагнічуючого струму зазор між статором і ротором не передбачається, а зовнішній магнітопровід наприсовується на внутрішній. Взаємо нерухомі первинні і вторинна обмотки розміщують в пазах одного з магнітопроводів, а другий виконується без пазів у вигляді гладкого кільця.

Обмотки ТОМП нічим не відрізняються від обмотки статора асинхронної машини і можуть бути виконані з різним числом фаз первинної та вторинної обмотки.

У таких трансформаторах забезпечується магнітне сумування магніторушійних сил, струмів інвертора, що може спростити рішення питань отримання синусоїдальної напруги. Крім того, обмотки трансформаторів можуть виконуватись з укороченим шагом, з дрібним числом пазів на полюс та фазу і т.п., що також може сприяти спрощенню отримання синусоїдальної напруги. У зв'язку з цим проведемо аналіз гармонічних складових вихідних струмів перетворювача та магніторушійної сили ТОМП [11].

Вихідна напруга інвертора має прямокутну форму. Як показує аналіз та експериментальні дослідження його, струм з достатньою для практики точністю можна прийняти також прямокутним.

Приймаємо, що первинна обмотка трансформатора живиться струмом трифазного інвертора (рис. 1) прямокутно-ступінчастої форми, тривалістю напівперіоду $\frac{2\pi}{3}$. При цьому рівняння МДС первинної обмотки при виборі начала координат по осі фази А може бути представлена системою наступних рівнянь:

$$\begin{aligned} F_A &= F_{\phi \max} \sin \omega t \cdot \cos \nu a ; \\ F_B &= F_{\phi \max} \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \cos \nu\left(a - \frac{2\pi}{3}\right) ; \\ F_C &= F_{\phi \max} \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) \cos \nu\left(a - \frac{4\pi}{3}\right), \end{aligned}$$

де $\omega t = \frac{2\pi}{T} \cdot t$, $a = \frac{2\pi}{T_n} \cdot x$, a – просторова координата, T і T_n – часовий і просторовий періоди хвилі відповідно, ν – номер гармоніки.

Результуюча МДС в магнітопроводі для кожної гармоніки має наступні значення:

$$\begin{aligned} &F_{m1,1} \cos(a - \omega t) ; \\ &F_{m5,1} \cos(5a + \omega t) ; \\ &F_{m7,1} \cos(7a - \omega t) ; \\ &F_{m1,5} \cos(a + 5\omega t) ; \\ &F_{m5,5} \cos(5a - 5\omega t) ; \\ &F_{m7,5} \cos(7a + 5\omega t) ; \\ &F_{m1,7} \cos(a - 7\omega t) ; \\ &F_{m5,7} \cos(5a + 7\omega t) ; \\ &F_{m7,7} \cos(7a - 7\omega t). \end{aligned}$$

Як бачимо з приведених значень, МДС в магнітопроводі (крім першої) має п'яту, сьому й інші просторові та часові гармоніки.

При п'ятифазному інверторі (рис. 6) первинна обмотка трансформатора живиться струмом прямокутно-ступінчастої форми тривалістю напівперіоду $\frac{2\pi}{5}$ [3].

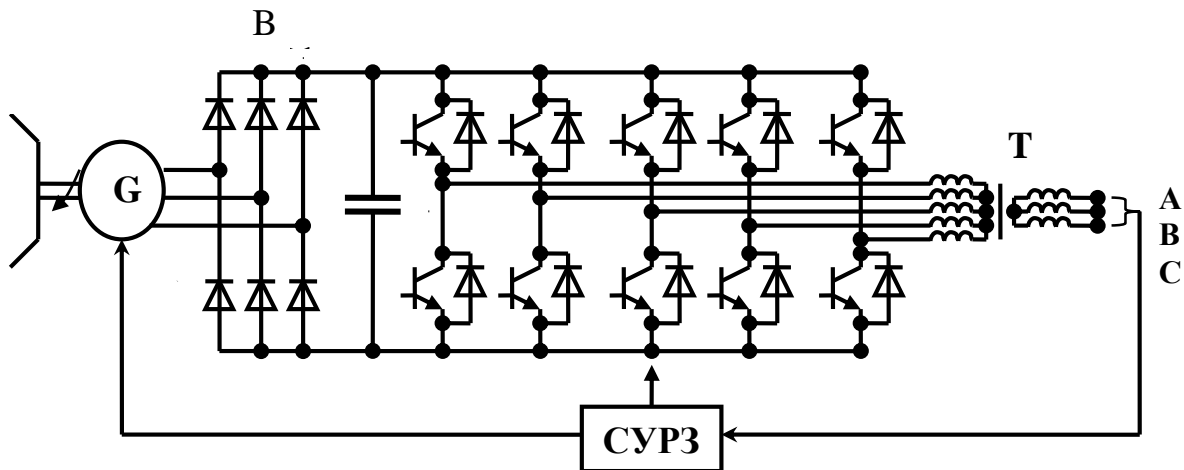


Рисунок 6 – Перетворювач з п'ятифазним трансформатором

Рівняння МДС первинної обмотки на початку координат по осі фази A :

$$F_A = F_{\Phi \max} \sin \omega t \cdot \cos \nu a ;$$

$$F_B = F_{\Phi \max} \sin(\omega t - 72^\circ) \cos \nu(a - 72^\circ) ;$$

$$F_C = F_{\Phi \max} \sin(\omega t - 144^\circ) \cos \nu(a - 144^\circ) ;$$

$$F_D = F_{\Phi \max} \sin(\omega t - 216^\circ) \cos \nu(a - 216^\circ) ;$$

$$F_E = F_{\Phi \max} \sin(\omega t - 288^\circ) \cos \nu(a - 288^\circ).$$

У результаті розв'язання даної системи отримаємо наступні значення МРС в магнітопроводі для кожної гармоніки:

$$F_{m1,1} \cos(a - \omega t) ;$$

$$F_{m3,3} \cos(3a - 3\omega t) ;$$

$$F_{m7,3} \cos(7a + 3\omega t) ;$$

$$F_{m3,7} \cos(3a - 7\omega t) ;$$

$$F_{m7,7} \cos(7a - 7\omega t).$$

Як бачимо МРС в магнітопроводі має тільки третю, сьому та їм кратні просторові та часові гармоніки.

Трансформатор з обертаючим магнітним полем може виконуватися з шихтованим або витим магнітопроводом. Вибір типу магнітопроводу залежить від потужності перетворювача. У трансформаторах із шихтованим магнітопроводом, як уже згадувалось, обмотки можуть виконуватися з вкороченим шагом, що спрощує одержання синусоїдальної напруги. ТОМП з вказаними магнітопроводами можуть виконуватись з регулюванням вихідної напруги. Охолодження таких трансформаторів може забезпечуватись продувом повітря.

При використанні ТОМП для одержання синусоїдальної напруги можна використовувати оптимальне число пазів на полюс і фазу, а також виконувати обмотки зі скороченим шагом. Для усування сьомої гармоніки вибирають шаг $(6/7)\tau$, одинадцятої – $(10/11)\tau$ і т. д.

Висновки

1. Проведений аналіз перетворювачів частоти з широтно-імпульсною модуляцією, а також з багаторівнійними схемами одержання вихідних напруг показує, що вони мають наступні основні недоліки:

- велика кількість елементів управління, моніторингу, сигналізації;

- складність пошуку несправностей комплексу;
- потреба в високо кваліфікаційному персоналі для ремонту, обслуговування;
- складність заміни пошкоджених силових елементів;
- постійний контроль за тиском в деіонізованій системі охолодження;
- висока вартість запасних частин;
- дуже великий вплив програмного забезпечення на роботу гребного комплексу.

2. У перетворювачах з багатофазними інверторами і ТОМП (5–7 фазними) значно спрощуються системи управління і регулювання, а також системи охолодження, що вказує на необхідність проведення порівняних досліджень таких перетворювачів з багаторівневими інверторами.

3. Системи охолодження перетворювачів можуть бути виконані на основі примусових повітряних, що значно спрощує виробництво та експлуатацію перетворювачів частоти різного призначення.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Михайлов В. А. Автоматизированные электроэнергетические системы судов. Л. : Судостроение, 1977. 510 с.
2. Фрейдзон И. Р. Судовые автоматизированные электроприводы и системы. Л. : Судостроение, 1988. 468 с.
3. Плавнорегулируемые трансформаторы, асинхронные и бесконтактные синхронные машины. / Красношарпа М. М. и др. М. : Радио и связь, 1992. 184 с.
4. Захарченко В. Н. Электрооборудование судов : электрические станции. Одесса : ОНМА, 2003. 120 с.
5. Электрооборудование, электронная аппаратура и системы управления / Пипченко А.Н. и др. Одесса : ОНМА, 2005. 370 с.
6. Судовые энергетические установки / Артемов и др. Г. А. Л. : Судостроение, 1987. 480 с.
7. Размадзе Ш. М. Преобразовательные схемы и системы. М. : Высшая школа, 1987. 527с .
8. Тиристорные преобразователи частоты в электроприводе / под ред. Р. С. Сарбатова. М. : Энергия, 1980. 328 с.
9. Чекунов К. А. Теория судового электропривода. Л. : Судостроение, 1982. 336 с.
10. Ефремов И. С. Теория и расчет тягового привода электромобилей. М. : Высш. школа, 1984. 983 с.
11. Иванов-Смоленский А. В. Электрические машины. М. : Энергия, 1980. 928 с.
12. Пахомов Ю. А. Судовые энергетические установки с двигателями внутреннего сгорания. М. : Транслит, 2007. 528 с.

REFERENCES

1. Mikhayjlov, V. A. (1977). *Avtomatizirovannihe ehlektroehnergeticheskie sistemih sudov*. Leningrad : Sudostroenie.
2. Freyjdzon, I. R. (1988). *Sudovihe avtomatizirovannihe ehlektroprivodih i sistemih*. «Leningrad : Sudostroenie.
3. Krasnoshapka M. M. et al. (Ed.) (1992). *Plavnoreguliruemihe transformatorih, asinkhronnihe i beskontaktnihe sinkhronnihe mashinih*. Moskva : Radio i svyazj.
4. Zakharchenko, V. N. (2003). *Ehlektrooborudovanie sudov : ehlektricheskie stancii*. Odessa : ONMA.
5. Pipchenko, A. N. et al. (Ed.) (2005). *Ehlektrooborudovanie, ehlektronnaya apparatura i sistemih upravleniya*. Odessa : ONMA.
6. Artemov, G. A. et al. (Ed.) (1987). *Sudovihe ehnergeticheskie ustanovki*. Leningrad : Sudostroenie.

7. Razmadze, Sh. M. (1987). *Preobrazovateljnihe skhemih i sistemih*. Moskva :Vihsshaya shkola.
8. Sarbatova, R. S. (Ed.) (1980). *Tiristornihe preobrazovateli chastotih v ehlektroprivode*. Moskva : Ehnergiya.
9. Chekunov, K. A. (1982). *Teoriya sudovogo ehlektroprivoda*. Leningrad : Sudostroenie.
10. Efremov I. S. (1984). *Teoriya i raschet tyagovogo privoda ehlektromobileyj*. Moskva : Vihssh. shkola.
11. Ivanov-Smolenskiyj, A. V. (1980). *Ehlektricheskie mashinih*. Moskva : Ehnergiya.
12. Pakhomov, Yu. A. (2007). *Sudovihe ehnergeticheskie ustanovki s dvigatelyami vnutrennego sgoraniya*. Moskva : TransLit.

Ищенко И. М., Голощачов С. С. АНАЛИЗ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЧАСТОТЫ С ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ И МАГНИТНЫМ СУММИРОВАНИЕМ ВЫХОДНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ И МАГНИТНЫХ ПОТОКОВ

В большинстве систем выпрямитель и инвертор собраны на основе тиристорных и транзисторных модулей. Управление выпрямителем и инвертором осуществляется соответствующими схемами, а получение синусоидальной напряженности осуществляется с помощью синхронного компенсатора, фильтров, или обеспечением широтно-импульсной модуляции напряженности на выходе инвертора. Достаточно широкое распространение получили схемы, которые обеспечивают получение близкого к синусоидальному ступенчатого напряжения за счет электрического суммирования выходных напряжений нескольких инверторов. Целью исследования поставлено выполнение математического анализа полупроводниковых преобразователей частоты с электрическим и магнитным суммированием выходных напряжений и магнитных потоков. В работе доказано, что в преобразователях с многофазными инверторами и Томпе (5-7 фазными) значительно упрощаются системы управления и регулирования, а также системы охлаждения, указывает на необходимость проведения сопоставимых исследований таких преобразователей с многоуровневыми инверторами. Исследование показало, что системы охлаждения преобразователей могут быть выполнены на основе принудительных воздушных, значительно упрощает производство и эксплуатацию преобразователей частоты различного назначения

Ключевые слова: асинхронный двигатель, инвертор, обмоточный коэффициент.

Ischenko I. M., Goloshchapov S. S. ANALYSIS OF SEMICONDUCTOR FREQUENCY CONVERTERS WITH ELECTRICAL AND MAGNETIC SUMMATION OF OUTPUT VOLTAGES AND MAGNETIC FLUXES

In most systems, the rectifier and inverter are assembled based on thyristor and transistor modules. Control of the rectifier and inverter is carried out by the appropriate circuits, and sinusoidal voltage is obtained by means of synchronous compensator, filters, or by providing pulse-width modulation of the voltage at the output of the inverter. Circuits providing a close to sinusoidal stepped voltage due to the electrical summation of the output voltages of several inverters have become widespread. The aim of this paper is to perform mathematical analysis of semiconductor frequency converters with electrical and magnetic summation of output voltages and magnetic fluxes. A transformer with a rotating magnetic field can be performed with a mixed or twisted magnetic circuit. The choice of type of magnetic conductor depends on the power of the converter. In transformers with a charge magnetic circuit, as already noted, the windings can be performed in a short step, which simplifies the sine wave voltage. TOMPs with these magnetic conductors can be controlled by adjusting the output voltage. The cooling of such transformers can be provided by air purging. When using TOMP to obtain a sinusoidal voltage, the optimum number of grooves per pole and phase can be used, as well as winding with a short step. In the paper it is proved that in converters with multiphase inverters and TOMP (5-7 phase) significantly simplify the control and regulation systems, as well as the cooling system, which indicates the need for comparative studies of such converters with multilevel inverters. The study showed that the cooling systems of the converters can be made on the basis of forced air, which greatly simplifies the production and operation of frequency converters of various purposes.

Keywords: asynchronous motor, inverter, winding factor.

© Ищенко И. М., Голощачов С. С.

Статтю прийнято
до редакції 09.04.19

CONTROL METHODS OF VESSEL'S THRUSTER AT CHANGING OPERATING CONDITIONS

Nahovskyi D. A., Ph.D., Associate Professor Department of Operation vessel electrical equipment and Automation, Kherson State Maritime Academy, e-mail: dymon.ksu@gmail.com, ORCID: 0000-0001-6920-0324

Doschenko G. G., Ph.D., Associate Professor, Department of Operation vessel electrical equipment and Automation, Kherson State Maritime Academy, e-mail: hersongala@gmail.com

It has been substantiated that in order to improve the operational characteristics of the vessel thrusters, it is necessary to use the torque and power control. It has been shown that torque and power control are feasible solutions for high-performance thruster control only if special precautions are taken during extreme environmental conditions, when the propeller may be subject to ventilation and in-and-out-of water effects. Therefore, an anti-spin thruster controller has been designed.

The results have showed that the torque and power controllers with anti-spin have comparable performance to that of a well-tuned shaft speed PI controller during ventilation, without compromising the superior performance of torque and power control in normal conditions.

Keywords: anti-spin controller, control, thruster, torque, model, power, ventilation effect.

DOI: 10.33815/2313-4763.2019.1.20.097-108

Introduction. The power plant on ships consists of several gas turbines or diesel engines driving electrical generators. In order to ensure the safe operation, there must, in all load conditions, be enough spinning reserves providing sufficient available power for unpredictable variations in load in order to prevent a blackout.

The blackout prevention, by means of reducing the load on heavy consumers, must typically respond faster than 500 ms to be effective. With torque and power control, the propeller load is less sensitive to ambient variations, which produces less power disturbances and improves voltage and frequency quality. Additionally, the maximum power consumption may easily be limited to available power in both schemes, since the power limitation is explicit in the torque and power control algorithm. This, in contrast to controlled speed and pitch propellers, where the actual power load must be measured as a feedback signal with an inherent time lag, which declines the blackout prevention response time. The accurate and fast control of power and power limitation in torque and power control gives less unpredictable load changes and less available power demand. Consequently, there will be a reduced probability of blackout due to overload, since unintentional power peaks will be suppressed. In conventional speed controlled drives, the excess of controlled torque/power may occur up to 5%. If this occurs for several thrusters simultaneously, significantly more power is being consumed than requested by the positioning system.

In this context, in order to reduce this dependence, it is required to find out new laws of thruster control.

Aim of work – to define thruster control methods when changing operational conditions.

Results and discussion. Ventilation, cavitation, loss of effective disc area, and the Wagner effect are all closely related physical phenomena. Let Q_m denote the torque generated by the propeller drive. A torque balance for the propeller shaft is written [1]:

$$I_s \omega = Q_m - Q_a - Q_f(\omega), \quad (1)$$

where I_s is the moment of shaft, propeller, and drive inertia, $\omega = 2\pi n$ is the angular shaft speed, and $Q_f(\omega)$ is the shaft friction, Q_a – is the shaft torque.

In commonly, the friction may be considered as a sum of static friction (or starting torque) Q_s and a linear component:

$$Q_f(\omega) = \tanh(\omega/\varepsilon)Q_s + K_\omega \omega, \quad (2)$$

where $\varepsilon > 0$ is an appropriately chosen small constant, and K_ω is a linear friction coefficient. On request, more complex friction models may be used, including e.g. nonlinear elements, Stribeck friction, and hysteresis effects.

As detailed in [1], the load torque assessment may be used for valuation multiples calculation of torque loss β_Q

From (1) the following control unit model of the thruster dynamics is proposed:

$$\begin{aligned} I_s \dot{\omega} &= Q_m - Q_a - Q_{ff0}(n_r) - Q_{f1\omega} + \delta_f, \\ Q_a &= \omega_q, \end{aligned} \tag{3}$$

Q_a is here assumed to be a bias term due to an external bounded disturbance ω_q . It is required to capture the fast transients during ventilation. The static friction compensation term $Q_{ff0}(n_r)$ from [1] is used instead of a static friction model based on ω in order to avoid oscillations in this term about $\omega \approx 0$. δ_f allows for errors in the friction model. With the measurement $y = \omega + v$ being contaminated with a bounded disturbance v , and $\hat{y} = \omega$, the propeller load torque observer copying the control unit model [1] is:

$$\begin{aligned} \hat{\omega} &= 1/I_s [Q_m - \hat{Q}_a - Q_{ff0}(n_r) - Q_{f1}\hat{\omega}] + k_a(y - \hat{y}), \\ \hat{Q}_a &= k_b(y - \hat{y}), \end{aligned} \tag{4}$$

where k_a and k_b are the observer gains. In [2] it is shown that with a constant load torque Q_a implied by $\omega_q = 0$, zero measurement disturbance $v = 0$, and advanced friction knowledge such that $\delta_f = 0$, the equilibrium point of the observer estimation error is globally exponentially stable (GES) if the observer gains are chosen as $k_a > -Q_{f1}/I_s$ and $k_b < 0$.

For DP operation, the expected nominal propeller load torque \hat{Q}_n may be calculated by feedback from the propeller shaft speed n . The estimated torque loss factor $\hat{\beta}_Q$ is calculated [2] from \hat{Q}_a and \hat{Q}_n as:

$$\hat{\beta}_Q = \frac{\hat{Q}_a}{\hat{Q}_n} = \frac{\hat{Q}_a}{K_{QC} \rho D^5 n |n|}, \quad n \neq 0, \tag{5}$$

where the control coefficient K_{QC} is used to calculate \hat{Q}_n .

Thruster normal operation suggests minimum ventilation effects. The ventilation detection algorithm is implemented by defining limits for the onset and termination of ventilation $\beta_{v,on}$ and $\beta_{v,off}$, and generating a detection signal by monitoring the thrust loss factor β_Q . An additional criterion for detection is that the magnitude of the thruster torque Q_m doesn't increase. The ventilation incident will then show the following evolution of the detection signal ξ , with time instants $t_1 < t_2 < t_3$:

$$\begin{aligned} t_1: \quad \hat{\beta}_Q &> \beta_{v,on} && \Rightarrow \xi = 0, \\ t_2: \quad \hat{\beta}_Q &< \beta_{v,on} \cap \text{sign}(Q_m)\dot{Q}_m \leq 0 && \Rightarrow \xi = 1, \\ t_3: \quad \hat{\beta}_Q &\geq \beta_{v,off} && \Rightarrow \xi = 0. \end{aligned} \tag{6}$$

To avoid switching and chattering of the detection signal due to measurement noise and transients, an algorithm implementing a detection delay is added, such that once ventilation has been detected, it cannot be reset until after a set time interval T_{vent} . The detection delay can be seen as an implementation of the switching delay time proposed in [3, 6]. This ventilation detection scheme has shown good performance in both simulations and experiments.

The torque and power controllers, although advantageous for normal operating conditions, will show unacceptable behavior when subject to large thrust losses. The nature of this problem is in many ways similar to that of a car wheel losing traction on a slippery surface during acceleration or braking. The work on anti-spin thruster control has therefore been motivated by similar control

strategies in car anti-spin and ABS braking systems. For normal operating conditions, the proposed anti-spin control scheme is divided into two:

1. Primary anti-spin action: override the core controller and take control of the shaft speed.
2. Secondary anti-spin action: lower the setpoint of the controller to reduce the shaft speed.

Since both the structures of the physical systems and the control objectives are similar, the development of the thruster anti-spin control system has been motivated by similar hybrid control strategies in car anti-spin and ABS systems, see, for example [4] or [5, 7] with such model as:

$$\begin{aligned} I_\omega \dot{\omega}_\omega &= -rF_x + Q_\omega, \\ \frac{F_x}{F_z} &= \mu(\lambda), \\ m\dot{v} &= F_x, \end{aligned} \quad (7)$$

where I_ω is the wheel rotational inertia, ω_ω is the wheel angular velocity, r is the wheel radius, F_x is the tire friction force, Q_ω is the braking or accelerating input torque to the wheel from brakes and motor, F_z is the vertical force between tire and road, μ is the tire friction coefficient, λ is the wheel slip, m is the mass of a car, and v is the car speed.

When comparing the two models for propulsion and car anti-spin, many similarities may be noticed. The rotational dynamics of the propeller and the wheel are identical, with inertial terms $I_s\omega$ and $I_\omega\omega_\omega$, motor input terms Q_m and Q_m , and load torque terms $Q_a = f_Q(\Theta, \zeta)$ and $rF_x = rF_z\mu(\lambda)$ respectively.

In both cases, the aim of the anti-spin control is to optimize the load torque through control of the motor input. For car anti-spin, too high input torque will lead to loss of friction through spin (acceleration) or wheel lock (braking), and hence reduced acceleration or stopping force. For thruster anti-spin, too high load on a propeller operating close to the free surface will lead to loss of torque through ventilation, and hence loss of thrust. In addition, the propeller load torque and tire friction force depend on many other parameters, most of which are unknown to the controller.

So, if a ventilation incident is detected by the detection algorithm in (6), the desired primary anti-spin control action is to take control of the shaft speed until the ventilation has terminated. This can be done by modifying the core controller output Q_{ci} [2] with a torque scaling factor γ :

$$Q_{cas} = \gamma Q_{ci}, \quad (8)$$

where Q_{cas} is the anti-spin commanded torque, and γ is proposed as:

$$\gamma = \begin{cases} 1 & \text{for } \zeta = 0 \text{ (not ventilated),} \\ \hat{\beta}_Q & \text{for } \zeta = 1 \text{ (ventilated).} \end{cases} \quad (9)$$

That the anti-spin control law will give a bounded shaft speed during ventilation.

To optimize the thrust and reduce the wear and tear due to dynamic propeller loading during ventilation, it may desirable to reduce the propeller shaft speed. This can be done by modifying the thrust reference during ventilation since the primary anti-spin control action assures that the shaft speed is kept close to its reference. The desired shaft speed during ventilation, n_{as} , will be a thruster specific parameter, and must be chosen as a trade-off between thrust production, wear and tear, and response time. The nominal shaft speed reference n_r should not be changed to n_{as} instantaneously, as this will lead to undesired transients. It is therefore proposed to add a low-pass filter with time constant τ_n and a rate limiting algorithm to the change from n_r to n_{as} at ventilation detection, and from n_{as} to n_r at ventilation termination. The filtered and rate limited shaft speed reference is termed n_{ras} , i.e. $n_{fall} < n_{ras} < n_{rise}$, where n_{fall} and n_{rise} are the rate limits. The thrust reference corresponding to n_{ras} is termed T_{ras} :

$$T_{ras} = \text{sign}(n_{ras}) K_{TC} \rho D^4 n_{ras}^2, \quad (10)$$

where K_{TC} is strictly positive thrust control coefficient.

Perfect shaft speed control during ventilation would be possible if the ventilation incident could be foreseen, and $\beta(t, \omega)$ was known. However, since the propeller torque is not available as a measurement, and the ventilation incidents are random processes caused by wave elevation and vessel motion, this is not possible. An implementable solution is to use the torque loss estimation and ventilation detection schemes. The deviation of the shaft speed from the steady-state solution will then depend on the deviation of the torque modification factor γ from the actual torque loss factor $\beta(t, \omega)$ during ventilation.

To achieve the best possible control over the shaft speed during ventilation, γ should be switched from 1 to $\hat{\beta}_Q$ immediately when ventilation is detected. However, in order to avoid transients in the control input, the transition of γ from 1 to $\hat{\beta}_Q$ at ventilation detection, and from $\hat{\beta}_Q$ to 1 at ventilation termination, should be rate limited, i.e. $\gamma_{fall} < \gamma < \gamma_{rise}$. The rate limits γ_{rise} and γ_{fall} would typically be of magnitude 1. Furthermore, to avoid using the potentially noisy estimate $\hat{\beta}_Q$ directly in the control law, it may be beneficial to filter γ by a properly chosen low-pass filter with time constant τ_γ .

A block diagram of the resulting thruster controller with anti-spin is shown in fig. 1.

In order to analyze the performance and the robustness of the control laws given above we will demonstrate the sensitivity subject to thrust losses. In order to compare the different control schemes a simplified sensitivity analysis is carried out to address the most significant properties of speed control, torque control and power control. Pitch control is not studied, but is expected in general to have the same behavior as speed control.

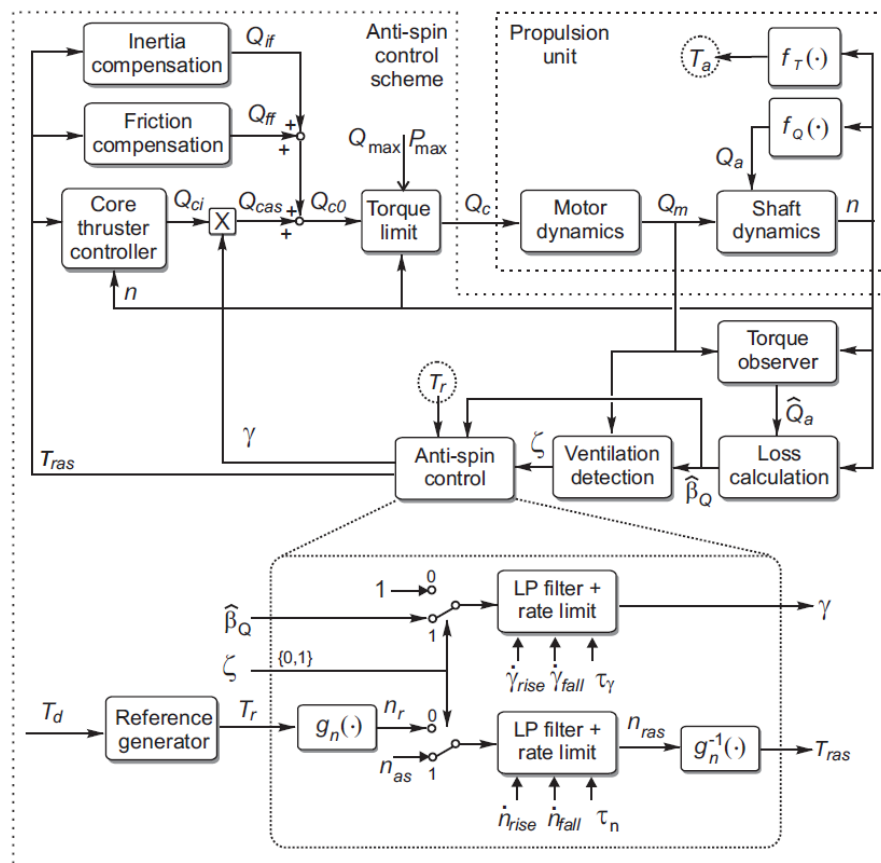


Figure1 – The anti-spin control scheme, including core controller, torque observer, loss calculation, ventilation detection, and anti-spin control actions

The experiments were conducted at basin 60m long, 9.5 m wide, and 1.5 m deep, and were equipped with a towing carriage and a wave-maker system. Two types of setups were used during

the various tests. The tested propeller was of conventional design with 4 blades, pitch ratio at 70 % of the propeller radius $P/D = 1.0$, and expanded blade area ratio $EAR = 0.55$.

The propeller was tested both with and without duct. For the results presented here a duct was used for the anti-spin tests only. The propeller was attached to a shaft equipped with thrust and torque sensors inside an underwater housing, and driven by an electric motor via shafts and gears with gear ratio 1:1. The rig with motor, gears, underwater housing, shaft and propeller were fixed to the towing carriage on a vertical slide, which was used to control the submergence of the propeller relative to the free surface. Ventilation incidents could hence be generated by moving the propeller vertically with a calm free surface. The motor torque was controlled from a PC onboard the carriage, using feedback from the propeller shaft speed and the motor torque. The control code was generated by rapid prototyping using Opal RT-Lab and source code in Matlab/Simulink [8].

A sketch of the experimental setup is given in fig.2. The main characteristics of the ducted propeller and drive system are summarized in table 1. The nominal thrust and torque coefficients for the propeller without duct were found to be $K_{T0} = 0.570$ and $K_{Q0} = 0.0750$. The nominal thrust and torque coefficients for reversed thrust were found to be $K_{T0r} = 0.395$ and $K_{Q0r} = 0.0665$.

Table 1 – Main propeller data

D (m)	K_{T0}	K_{Q0}	I_s (kgm ²)	Q_s (Nm)	K_ω (Nms)
0.25	0.513	0.0444	0.05	1.0	0.01

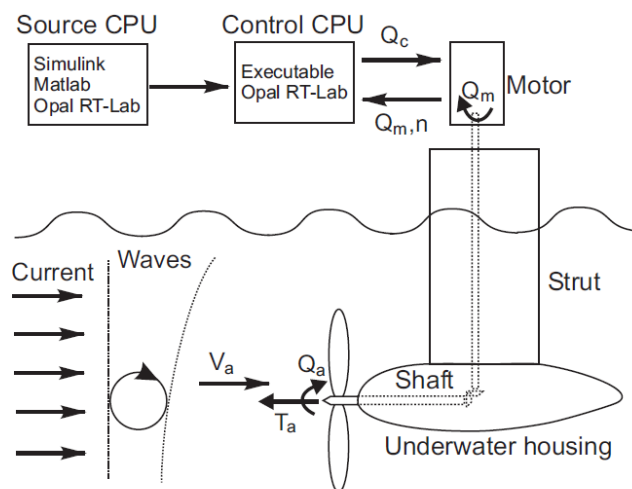


Figure 2 – Sketch of the experimental setup

The shaft friction turned out to affect the performance of the torque and power controllers. Over the course of the experiments, the friction compensation coefficients were found to be in the range $Q_{f0} \in [0.8, 1.0]$ and $Q_{f1} \in [0.009, 0.011]$.

The friction compensation was chosen with $Q_{f0} = 1.0$ Nm and $Q_{f1} = 0.01$ Nm. The inertia compensation was not needed for the small model-scale propeller. The control coefficients were chosen as $K_{TC} = K_{T0} = 0.513$ and $K_{QC} = K_{Q0} = 0.0444$. For the combined controller (266) the weighting function parameters were chosen as $[r, p, k] = [4, 0.5, 1]$. This gave a pure torque controller for $n < 0.5$ rps and a pure power controller for $n > 3$ rps. The shaft speed PI controller parameters were chosen as $K_p = 0.2$ and $T_i = 0.05$ s.

In the load torque observer, the gains were chosen as $k_a = 15$ and $k_b = -25$. In the ventilation detection scheme, the parameters were chosen as $\beta_{v,on} = 0.6$ and $\beta_{v,off} = 0.9$, and the detection delay was set to $T_{vent.} = 1$ s. For the proposed anti-spin controller, the settings for the primary anti-spin action were $\gamma_{rise.} = 1s^{-1}$, $\gamma_{fall} = -1s^{-1}$, and unless otherwise stated $\tau_\gamma = 0.3$ s. For the secondary anti-spin action, the filter time constant was chosen as $\tau_n = 0.05$ s, and the rate limits were chosen as $n_{rise} = 3s^{-2}$ and $n_{fall} = -3s^{-2}$. The desired shaft speed during ventilation was set to $n_{as} = 9$ rps. The

latter choice was motivated by observations during the tests, where it seemed that the most violent dynamic loading disappeared below 10rps. A maximum shaft speed of $n_{max} = 25$ rps was enforced.

The anti-spin control scheme appears to be robust to parameter tuning. In order to avoid detection chattering, however, it is important not to choose $\beta_{v,on}$ too large. In addition, if the rate limits are chosen too low or the filter time constants too large, the anti-spin controller response will become slow, and the shaft speed will be allowed to increase more during ventilation.

A total of 36 tests were run with zero advance velocity and varying motor setpoints. Each setpoint was run for approximately 60 seconds in order to get good statistical values. The nominal thrust and torque coefficients K_{T0} and K_{Q0} for varying propeller shaft speed n and $V_a = 0$ are shown in Fig.4, where also the mean values used in the rest of the work are shown. The resulting mean values were $K_{T0} = 0.5359$ and $K_{Q0} = 0.0832$. The shaft friction for the tested propeller was found as the steady-state difference between the motor torque Q_m and the propeller torque Q_a , and is plotted versus n fig. 3.

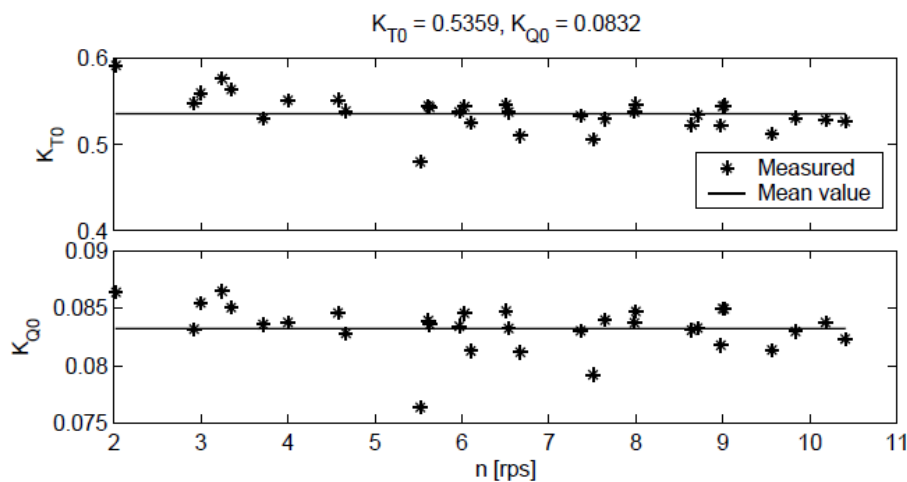


Figure 3 – Nominal thrust coefficient K_{T0} and nominal torque coefficient K_{Q0} measurements for varying shaft speed n

In the sensitivity tests the thrust reference was kept constant at $T_{ref} = 100$ N, the advance velocities were $V_a = \{-1, -0.5, 0, 0.5, 1, 1.5\}$ m/s. and the speed, torque and power controllers were used. Each combination was run 3 times, giving a total of 54 runs. The performance of the three controllers are summed up in Fig.4, where the propeller thrust T_a , propeller torque Q_a , shaft speed n , motor torque Q_m and motor power P_m are shown for varying advance speeds. The friction compensation is not included in the plots of motor torque and power. It is clear that the three controllers obtain their objectives: the shaft speed controller keeps the shaft speed constant, the torque controller keeps the motor torque constant, and the power controller keeps the motor power constant. As the advance speed increases, the effective angle of attack of the propeller blades is decreased, and the propeller loading decreases for a constant shaft speed. This can be seen in terms of reduced propeller thrust and torque at increasing advance velocities for the shaft speed controller: at $V_a = 1.5$ m/s the propeller thrust is reduced from 100N to 18N. The torque and power controllers have much better performance, since they will increase the shaft speed as the propeller loading decreases: $V_a = 1.5$ m/s the propeller thrust is reduced from 100N to 65N and 50N respectively. The reason for the propeller torque not remaining constant for increasing advance velocities are inaccuracies in the friction model.

The sensitivity to variations in advance velocity V_a can be studied by representing K_T and K_Q as functions of V_a and ignoring all other loss effects. The experimentally determined sensitivity functions for varying advance velocity are shown in Fig.7 This confirms that the shaft speed controller is the most sensitive and the torque controller the least sensitive to variations in advance velocity.

To validate the dynamic performance of the controllers when subject to rapidly changing inflow to the propeller a total of 34 tests in regular and irregular waves were performed. The thrust reference was $T_d = 100\text{N}$ and the carriage was kept stationary. A comparison of the controller performance in regular waves with wave height 8cm and period 1s is shown in fig. 4. DP functionality has been simulated, such that all controllers gave the same mean thrust. The results are summarized in the following:

- the shaft speed controller keeps the shaft speed constant, and has to vary the motor torque and power in order to achieve this. The resulting propeller thrust and torque have the largest variance;
- the torque controller keeps the motor torque constant, and as a result the shaft speed varies with the loading. The resulting propeller thrust and torque have the smallest variance;
- the power controller keeps the motor power constant, and as a result both the shaft speed and motor torque varies with the loading. The resulting propeller thrust and torque lie between the shaft speed and torque controller values.

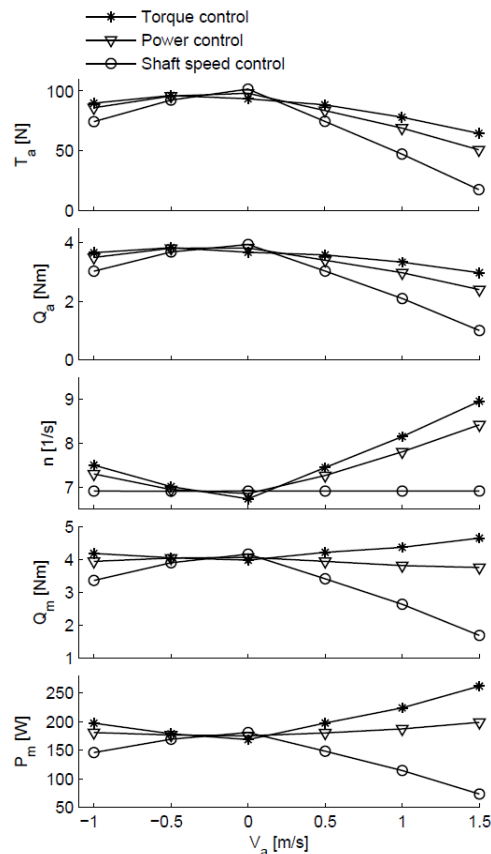


Figure 4 – Comparison of propeller thrust T_a , propeller torque Q_a , shaft speed n , motor torque Q_m and motor power P_m for the shaft speed, torque and power controllers in varying advance velocities V_a

The anti-spin control scheme was tested in a variety of operating conditions: for constant and time-varying thrust references, in waves, with a calm free surface and forced vertical motion of varying amplitude A_v , period T_v , and mean submergence h_0 , and in combinations of waves and vertical motion. In the results presented here, the thrust reference was kept constant during forced vertical motion with a calm free surface. This improved repeatability and enabled comparison of the various controllers, since the time series could be synchronized by comparing the relative vertical motion of the propeller. Because of the chaotic nature of ventilation, the actual operational conditions for the propeller vary from one test run to another. However, the repeatability is in general good. The results presented below are for $h_0 = 15\text{cm}$, $A_v = 15\text{cm}$, and $T_v = 5\text{s}$.

Fig. 5 shows comparisons of the thrust T_a , propeller torque Q_a , shaft speed n , motor torque Q_m and motor power P_m for four different thruster controllers during a ventilation incident with $T_r = 200\text{N}$. The ventilation incident starts at $t \approx 11.2\text{s}$, and terminates at $t \approx 14.5\text{s}$. The compared

controllers are shaft speed PI control, torque control, power control, and the proposed anti-spin controller based on combined torque/power control. With anti-spin activated, both the primary (8) and the secondary (10) anti-spin actions were used. The time series show that the torque controller and the power controller both lead to propeller racing. The shaft speed controller and the anti-spin controller limit the shaft speed as intended, with the secondary anti-spin action giving a slightly reduced shaft speed during ventilation. The resulting thrust during ventilation is about the same for all controllers. That is, the anti-spin controller, which reduces the shaft speed to 9rps during ventilation, produces the same thrust as the torque controller, which races to the imposed limit of 25rps. The power consumption of the torque controller is unacceptably high, whereas the power controller keeps the power consumption limited. The shaft speed and anti-spin controllers give a lower power consumption during ventilation, but this is not considered to be a problem.

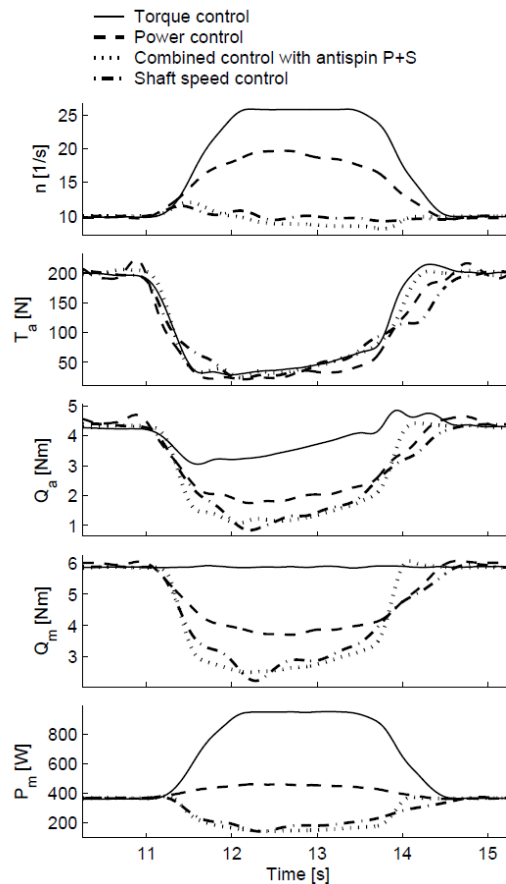


Figure 5 – Comparison of four controllers during a ventilation incident at $T_r = 200\text{N}$

Fig.6 shows details from the anti-spin controller during a ventilation incident: propeller torque Q_a versus estimated propeller torque \hat{Q}_a , estimated torque loss factor $\hat{\beta}_Q$ and ventilation detection signal ζ , torque modification factor γ , deviation of γ from the measured β_Q , and the desired shaft speed n_{ras} . The time series show that the anti-spin controller, including torque observer and ventilation detection, performs as intended.

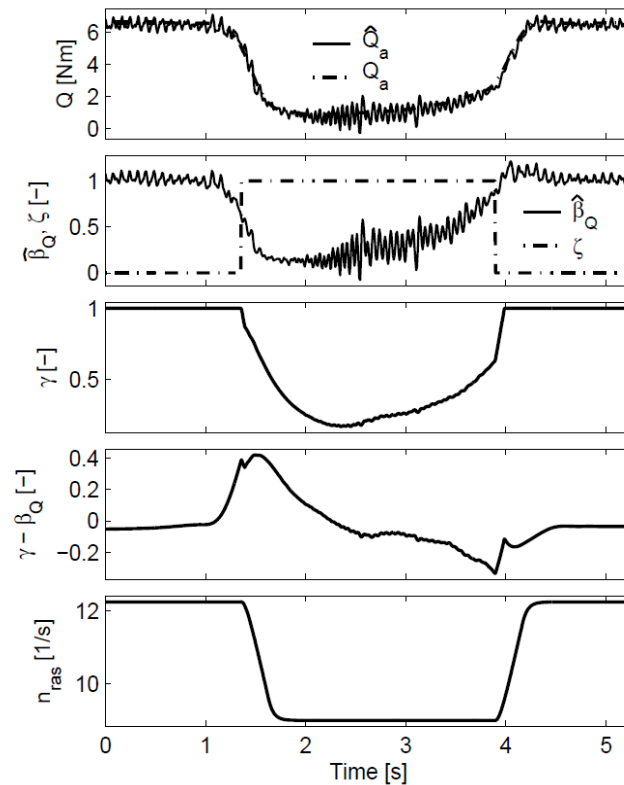


Figure 6 – Time series of the main parameters in the anti-spin control law with primary and secondary control actions during a ventilation incident at $T_r = 300\text{N}$

Conclusions. Low-level controllers based on shaft speed, torque, and power control for electrically driven thrusters on vessels in normal operating conditions have been investigated, and evaluated according to three main performance criteria. The conventional shaft speed controller gave the thrust, torque, and power with the largest variance, and it was the least robust to disturbances in the in-line flow velocity. The torque controller produced the thrust and torque with the smallest variance, and was superior with respect to compensating for thrust losses due to disturbances in the inflow. The power controller gave the least oscillations in the power, with the resulting propeller thrust and torque in-between the shaft speed and torque controller values. The combined torque and power controller gave the overall best improvement in the performance from low to high loadings. Steady-state sensitivity functions describing the performance of the various controllers in terms of resulting thrust, shaft speed, torque, and power when subject to thrust losses were presented. Experiments illustrated the difference in performance and robustness of the different controllers.

It has been shown that torque and power control is a feasible solution for high-performance thruster control only if special precautions are taken during extreme environmental conditions, when the propeller may be subject to ventilation and in-and-out-of water effects. To solve this problem, an anti-spin thruster controller has been designed. The thruster performance was monitored by a load torque observer, and the anti-spin controller was triggered by a ventilation detection scheme. The anti-spin controller took control of and lowered the shaft speed. Experiments with a model scale propeller were presented. The results showed that the torque and power controllers with anti-spin had comparable performance to that of a well-tuned shaft speed PI controller during ventilation, without compromising the superior performance of torque and power control in normal conditions.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Smogeli, O. N. Control of Marine Propellers – From Normal to Extreme Conditions. PhD Thesis 2006:187, Department of Marine Technology. *Faculty of Engineering Science & Technology*, NTNU, Norway, 2006.
2. Smogeli, O. N. and A. J. Sørensen. Antispin Thruster Control for Ships. *IEEE Transaction on Control System Technology*. 2009. Vol. 17, No. 6. P. 1362-1375.
3. Hespanha J. P. Tutorial on Supervisory Control, Lecture Notes for the Workshop Control using Logic and Switching for the Conference on Decision and Control, Orlando, Florida, US, 2001.
4. Haskara, I., Ü. Özgüner, J. Winkelmann. Wheel slip control for antispin acceleration via dynamic spark advance. *Control Engineering Practice*. 2000. 8.
5. Johansen, T. A., J. Kalkkuhl and I. Petersen. Hybrid Control Strategies in ABS. *In. Proc. of American Control Conference (ACC'01)*. Arlington, VA, USA, 2001.
6. Doschenko G. G. Microcontroller ship system of energy saving Energy Saving System. *Adaptation of Science, Education and Business to World Innovative Megatrends : International collective monograph*. Science and Innovation Center, Ltd. St. Louis. Missouri, Thessaloniki. 2018. P. 129–134. DOI:10.6084/m9.figshare.7814393.v1
7. Nahovskyi D. A. Construction features and necessity of pre-testing DP-systems. *Adaptation of Science, Education and Business to World Innovative Megatrends : International collective monograph*. Science and Innovation Center, Ltd. St. Louis. Missouri, Thessaloniki. 2018. P. 124–129. DOI:10.6084/m9.figshare.7814393.v1
8. Stephens, R. I., K. J. Burnham and P. J. Reeve. A practical Approach to the Design of Fuzzy Controllers with Application to Dynamic Ship Positioning. *In Proc. of IFAC Conference on Control Applications in Marine Systems*, Trondheim, Norway, 1995.
9. Tannuri, E. A., A.C. Agostinho, H.M. Morishita, L. and Moratelli Jr. Dynamic Positioning Systems: An Experimental Analysis of Sliding Mode Control. *Control Engineering Practice*, CEP 18-10, 2010. P. 1121–1132.
10. Sorensen, A. J. and O. N. Smogeli. Torque and Power Control of Electrically Driven Marine Propellers. *Control Engineering Practice*, CEP 17-9, 2009. P. 1053-1064.
11. Perez, T. and A. Donaire. Constrained Control Design for Dynamic Positioning of Marine Vehicles with Control Allocation Modelling Identification and Control, MIC 30- 2, 2009. P. 57–70.
12. Черных И. В. SimPowerSystems: Моделирование электротехнических устройств и систем в Simulink : веб-сайт. URL : <https://docs.exponenta.ru/physmod/sps/index.html>.
13. Тимченко В. Л., Ухин О. А. Робастно-оптимальная стабилизация морских подвижных объектов в режиме динамического позиционирования. *Электротехнические и компьютерные системы*. К. : Техника. 2014. № 13 (89). С. 19–26.
14. Григорьев А. В., Васин И. М., Хомяк В. А. Комплексный подход при создании судовых энергетических систем и установок. *Судостроение*. 2008. № 2. С.30–31.
15. Григорьев А. В., Глеклер Е. А. Перспективная судовая единая электроэнергетическая установка. *Эксплуатация морского транспорта : ежекварт. сб. науч. ст.* СПб. : Феникс, 2008. Вып. № 3 (53). С.68–70.

REFERENCES

1. Smogeli, O. N. (2006). Control of Marine Propellers – From Normal to Extreme Conditions. *Candidate's thesis*. NTNU, Norway : Department of Marine Technology, Faculty of Engineering Science & Technology.
2. Smogeli, O. N. & A. J. Sørensen. (2009). Antispin Thruster Control for Ships. *IEEE Transaction on Control System Technology*, Vol. 17, No. 6, 1362–1375.

3. Hespanha, J. P. (2001). Tutorial on Supervisory Control. *Lecture Notes for the Workshop Control using Logic and Switching for the Conference on Decision and Control*, Orlando, Florida, US.
4. Haskara, I., Özgüner, Ü. & Winkelmann, J. (2000). Wheel slip control for antispin acceleration via dynamic spark advance. *Control Engineering Practice*, 8.
5. Johansen, T. A., Kalkkuhl, J. & Petersen, I. (2001). Hybrid Control Strategies in ABS. *In. Proc. of American Control Conference (ACC'01)*. Arlington, VA, USA.
6. Doschenko G.G. (2018). Microcontroller ship system of energy saving Energy Saving. *Adaptation of Science, Education and Business to World Innovative Megatrends : International collective monograph*. Science and Innovation Center, Ltd. St. Louis. Missouri, Thessaloniki. 129–134. DOI:10.6084/m9.figshare.7814393.v1.
7. Nahovskyi D. A. (2018). Construction features and necessity of pre-testing DP-systems. *Adaptation of Science, Education and Business to World Innovative Megatrends : International collective monograph*. Science and Innovation Center, Ltd. St. Louis. Missouri, Thessaloniki. 124–129. DOI:10.6084/m9.figshare.7814393.v1.
8. Stephens, R. I., Burnham, K. J. & Reeve, P. J. (1995). A practical Approach to the Design of Fuzzy Controllers with Application to Dynamic Ship Positioning. *In Proc. of IFAC Conference on Control Applications in Marine Systems*, Trondheim, Norway.
9. Tannuri, E. A., Agostinho, A. C., Morishita H. M. & Moratelli Jr. (2010). Dynamic Positioning Systems: An Experimental Analysis of Sliding Mode Control. *Control Engineering Practice, CEP 18-10*, 1121–1132.
10. Sorensen, A. J. & Smogeli O. N. (2009). Torque and Power Control of Electrically Driven Marine Propellers. *Control Engineering Practice, CEP 17-9*, 1053–1064.
11. Perez, T. & Donaire, A. (2009). Constrained Control Design for Dynamic Positioning of Marine Vehicles with Control Allocation Modelling Identification and Control, *MIC 30-2*, 57–70.
12. Chernikh I. V. SimPowerSystems: Modelirovanie ehlektrotekhnicheskikh ustrojstv i sistem v Simulink. Retrieved from: <https://docs.exponenta.ru/physmod/sps/index.html>.
13. Timchenko, V. L. & Ukhin O. A. (2014). Robastno-optimal'naya stabilizaciya morskikh podvizhnykh objektiv v rezhime dinamicheskogo pozicionirovaniya. *Ehlektrotekhnicheskie i komp'yuterniye sistemih*, 13 (89). Kyev : Tekhnika. 19–26.
14. Grigorjev, A.V., Vasin I. M. & Khomyak V. A. (2008). Kompl'eksnij podkhod pri sozdanii sudnovykh ehnergeticheskikh sistem i ustanovok. *Sudostroenie*, 2, 30–31.
15. Grigorjev, A. V. & Glekler E. A. (2008). Perspektivnaya sudovaya edinaya ehlektroehnergeticheskaya ustanovka. *Ehkspluatatsiya morskogo transporta: ezhekvert. sb. nauch. st.*, 3 (53). Sanct-Peterburg : Feniks. 68–70.

Наговский Д. А., Дощенко Г. Г. МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОПУЛЬСИВНЫМИ ДВИЖЕТЕЛЯМИ СУДНА В ИЗМЕНЯЮЩИХСЯ УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Обосновано, что для повышения эксплуатационных характеристик движителей судна необходимо использовать управление по моменту и мощности. Показано, что управление по крутящему моменту и мощности является возможным решением для высокоэффективного управления двигателем только в том случае, если предпринимаются особые меры предосторожности в экстремальных условиях окружающей среды, когда винт может подвергаться воздействию турбулентности и выхода из воды. Разработан контроллер свободного вращения винта.

Показаны результаты того, что регуляторы по крутящему моменту и мощности с контроллером свободного вращения имеют производительность, сопоставимую с хорошо настроенным PI-регулятором скорости вала во время эффекта вентиляции, без ущерба для характеристик управления крутящим моментом и мощностью в нормальных условиях.

Ключевые слова: контроллер свободного вращения винта, управление, движитель судна, крутящий момент, модель, мощность, эффект вентиляции.

Наговський Д. А., Дощенко Г. Г. МЕТОДИ УПРАВЛІННЯ ПРОПУЛЬСИВНИМИ РУШІЯМИ СУДНА В ЗМІННИХ УМОВАХ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

Обґрунтовано, що для підвищення експлуатаційних характеристик рушія судна необхідно використовувати закон управління, який використовує показники моменту та потужності на гвинті рушія. Показано, що управління, в якому критерієм оптимізації є крутний момент і потужність на гвинті рушія судна, є можливим рішенням для високоефективного управління двигуном тільки в тому випадку, якщо застосовуються особливі запобіжні заходи в екстремальних умовах навколишнього середовища, коли гвинт пропульсивного рушія може піддаватися впливу турбулентності та виходити із води. Розроблено контролер вільного обертання гвинта. Контролер використовує в своїй роботі показники динаміки гвинта пропульсивного рушія, приводного електродвигуна, розрахункові показники компенсації інерції гвинта. Поведінка системи при зміні куту нахилу лез гвинта не досліджувалась і буде внесена в закон управління в подальшій роботі. При проведенні досліджень використовувався кут нахилу лез гвинта в розмірі 70%. В результаті використання такого контролера гвинт пропульсивного рушія судна обмежується в швидкості обертання при ефекті вентиляції, тобто за умови виходу гвинта з води. Для перевірки виконаних досліджень та розрахунків поставлено 34 досліді на фізичній моделі об'єкта управління. Досліді враховували окрему та групову фіксацію параметрів потужності, швидкості обертання та моменту гвинта пропульсивного рушія фізичної моделі.

Показані отримані результати того, що регулятори, які використовують в своєму законі управління критерій оптимізації по крутному моменту та потужності на гвинті пропульсивного рушія з контролером вільного обертання мають продуктивність, яку можна порівняти з добре налагодженим PI-регулятором швидкості обертання валу під час ефекту вентиляції, без шкоди для характеристик управління крутним моментом і потужністю гвинта пропульсивного рушія в нормальних умовах. Це дозволяє замінити стандартні методи управління пропульсивними рушіями, які не враховують ефекту вільного обертання валу рушія без навантаження, тим самим створюючи проблеми при управлінні судном та в експлуатації електрообладнання пропульсивного рушія судна.

Ключові слова: контролер вільного обертання гвинта, управління, рушія судна, крутний момент, швидкість обертання, модель, потужність, ефект вентиляції.

© Наговський Д. А., Дощенко Г. Г.

Статтю прийнято
до редакції 25.04.19

ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ДИНАМИЧЕСКИХ БЕЗМОТОРНЫХ ИСПЫТАНИЙ ТОПЛИВНОЙ АППАРАТУРЫ ДИЗЕЛЕЙ

Половинка Э. М., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой судовых энергетических установок Национального университета «Одесская морская академия»,
ORCID: 0000-0002-6855-1269;

Слободянюк Н. В., преподаватель кафедры корабельной энергетики и электроэнергетических систем Института Военно-Морских Сил Национального университета «Одесская морская академия», Украина, e-mail: beetle77@ukr.net,
ORCID: 0000-0003-2248-0255

В статье рассмотрены результаты экспериментального исследования топливной аппаратуры высокого давления среднеоборотного двигателя в ходе изменения положения рейки топливного насоса высокого давления на соответствующих режимах нагрузочной характеристики.

В ходе эксперимента разработана методика динамических безмоторных испытаний топливной аппаратуры, обеспечивающая совмещённое исследование динамических параметров процессов впрыскивания топлива, частичных режимов и характеристик топливной аппаратуры.

Параметры топливной аппаратуры, полученные в ходе экспериментального исследования позволяют оперативно получать нагрузочную характеристику, путем ступенчатого перемещения рейки топливного насоса высокого давления, одновременно обеспечивая исследование переходных процессов в задаваемом диапазоне перемещения рейки.

Методика динамических безмоторных испытаний обеспечивает заданный комплекс параметров при работе по различным характеристикам. Наиболее актуальными среди них являются современные нормы экологичности и экономичности.

Разработано и реализовано программно-аппаратное обеспечение, выполняющее функции управления режимами испытаний, запись, обработку данных и оформление результатов эксперимента. Измерительная часть системы укомплектована датчиками, которая была создана на кафедре Судовых энергетических установок Национального университета «Одесская морская академия».

Реализован электромеханический комплекс с компьютерным программным управлением для задания режимов испытаний.

Испытательный комплекс прошёл наладку, доводку и используется в текущей исследовательской работе кафедры Судовые энергетических установок.

Ключевые слова: экспериментальное исследование, методика безмоторных испытаний, динамические безмоторные испытания, переходные процессы, ступенчатое перемещение, рейка топливного насоса высокого давления, программно-аппаратное обеспечение.

DOI: 10.33815/2313-4763.2019.1.20.109-121

Постановка проблемы. Переменные режимы судовых дизелей являются неотъемлемой и весьма существенной частью их эксплуатационного периода [1, 2, 3, 4], а потому в значительной степени определяют эксплуатационные характеристики судовых энергетических установок в целом.

Для обеспечения принятых норм и показателей в области дизелестроения предусматриваются исследования в следующих основных направлениях [5]:

- совершенствование конструкции двигателей (оптимизация процесса топливоподачи);
- учет эксплуатационных факторов (оптимизация режимов работы двигателей);
- применение нетрадиционных топлив.

Научно исследовательские работы в области улучшения систем впрыскивания направлены на:

- повышение точности дозирования цикловой подачи топлива [6, 7];
- оптимизацию процесса сгорания на всех эксплуатационных режимах, в том числе при пуске, холостом ходе, разгоне и выбеге [8, 9];
- обеспечение оптимальной экономичности [10], экологичности [11] и эксплуатационной надежности [12, 13, 14].

Немаловажную роль в обеспечении всех характеристик дизелей, в том числе и на переменных режимах, играют процессы топливоподачи, что позволяет говорить об актуальности исследования в этой области.

Анализ последних достижений и публикаций. Анализ исследовательских экспериментальных данных ранее представленных в работе [15], что основополагающим фактором влияющим на протекание скоростной характеристики системы топливоподачи, является начальное давление. Дальнейшие исследования указывают на то, что в условиях безмоторного стенда возможно построение скоростной характеристики в условиях одного опыта. Данный результат послужил основанием для подготовки и проведения аналогичного эксперимента с целью построения нагрузочной характеристики.

При разработке систем топливоподачи дизелей выполняются требования нормативных документов [16, 17, 18] к конструктивным решениям и технико-экономическим показателям. Одновременно проводятся исследования, направленные на развитие средств и процессов топливоподачи. При этом рассматриваются как установившиеся, так и переменные эксплуатационные режимы.

Комплексный подход с учётом экономических и экологических показателей использован авторами работы [19] при решении задачи оптимизации топливной аппаратуры.

В результате выполненного аналитического обзора предлагаются следующие решения поставленной задачи:

- оптимизация управления топливной аппаратурой для каждого режима двигателя;
- применение многофазного впрыска для снижения шума, дожигания органических компонентов и обеспечения работы нейтрализатора;
- гибкое управление углом опережения впрыска в зависимости от режима работы дизеля;
- максимально возможное снижение неравномерности подачи топлива по цилиндрам;
- самодиагностика топливной системы.

При разработке средств, обеспечивающих снижение токсичности отработавших газов дизелей на переходных режимах, основное внимание уделили изменению угла опережения впрыскивания топлива (УОВТ). В работе [20] рассмотрены различные технические решения по реализации переменных значений УОВТ. Выделены три группы таких устройств:

- приставки к топливному насосу высокого давления (ТНВД) (муфты опережения впрыскивания топлива);
- элементы, встроенные в ТНВД;
- электронно-управляемые форсунки и насос-форсунки.

Представленный обзор работ по исследованию переходных режимов дизелей характеризует значительное влияние на их развитие параметров топливоподачи. Так, установлено, что существенными факторами являются угол опережения впрыскивания и начальное давление топлива.

Вместе с тем, полученные данные не содержат информации о протекании процессов и существенных параметрах впрыскивания топлива. Публикуемые в данной работе материалы представляют результаты исследований в указанном направлении.

Цель статьи. Целью исследования является создание методики динамических безмоторных испытаний топливной аппаратуры, среднеоборотного дизеля при переменном положении рейки топливного насоса высокого давления для соответствующих режимов нагрузочной характеристики.

Объектом исследования в данной работе являются гидродинамические процессы в топливной системе высокого давления судового среднеоборотного дизельного двигателя на переменных режимах.

Изложение основного материала. Для изучения процессов впрыскивания топлива на переменных и частичных режимах на кафедре судовых энергетических установок (СЭУ) Национального университета «Одесская морская академия» (НУ «ОМА») разработана методика динамических испытаний, создан аппаратно-программный комплекс с целью управления режимами работы ТА и регистрации процессов топливоподачи. Создан также электромеханический модуль в качестве исполнительного блока для пакета управления режимами нагрузочной характеристики.

Базовым оборудованием являлся безмоторный стенд, укомплектованный системой впрыскивания топлива судового среднеоборотного дизеля ЧН25/34. Привод кулачкового вала стенда осуществляется электродвигателем постоянного тока с бесступенчатым регулированием частоты вращения. Собственно приводом ТНВД является фрагмент штатного распределительного вала двигателя.

Для регистрации процессов впрыскивания в различных элементах топливной аппаратуры использованы датчики высокого, среднего давления. Датчики унифицированы и отличаются лишь размерами деформируемого элемента. Деформация воспринимается проволочными тензометрическими решётками.

Измерение линейных и угловых перемещений осуществляется с помощью индуктивных и фотодатчиков.

Все датчики разработаны и изготовлены на кафедре СЭУ.

В соответствии с характеристиками измерительных преобразователей (датчиками) разрабатывались электронные модули измерительной системы. При этом создаваемая тензостанция проектировалась совместно с программным обеспечением для персонального компьютера. Последний являлся блоком индикации, записи данных и управления работой испытательного комплекса.

Исследуемая топливная система высокого и низкого давления судового среднеоборотного дизеля 6ЧН25/34 имела традиционные характеристики:

- форсунка закрытого типа с распылителем 9x0,35 мм;
- золотниковый ТНВД, диаметр и ход плунжера, которого составляет 16 мм;
- топливный трубопровод высокого давления длиной 0,9 м с диаметром 9 мм и 3 мм (наружный и внутренний, соответственно).

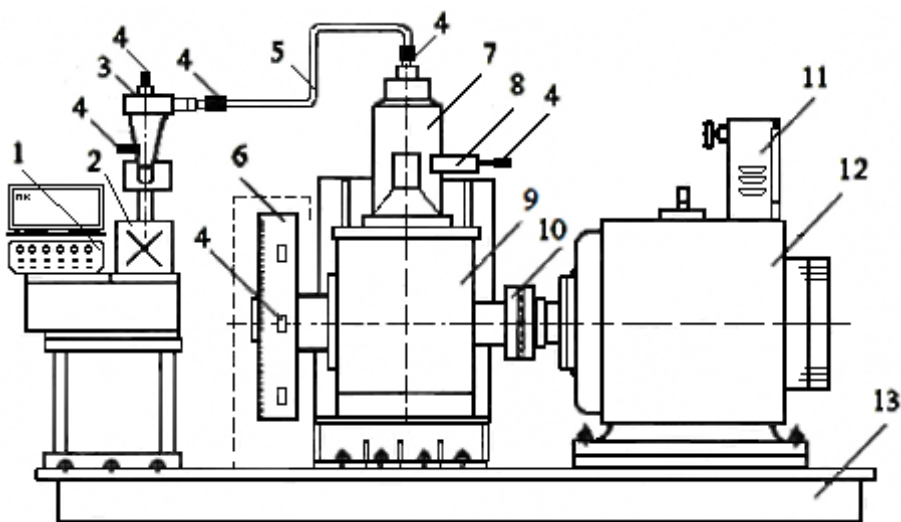


Рисунок 1 – Схема безмоторного стенда:

1 – тензостанция; 2 – емкость; 3 – форсунка; 4 – датчики давления и перемещения; 5 – топливопровод; 6 – маховик; 7 – ТНВД; 8 – привод для перемещения рейки ТНВД; 9 – привод ТНВД; 10 – соединительная муфта; 11 – станция управления электродвигателем; 12 – электродвигатель; 13 – рама безмоторного стенда

На рис. 1 представлена схема стенда [21, 22]. Стенд состоит из рамы 13 на которую установлен электродвигатель 12 со станцией управления 11. Через муфту 10

электродвигатель соединен с приводом ТНВД 9 и маховиком 6, на который устанавливается испытываемый ТНВД 7. Для перемещения рейки ТНВД установлен привод 8, который подключен к программно-аппаратному комплексу управления положением рейки ТНВД. Топливопровод 5 соединяет ТНВД и форсунку 3, впрыскиваемое в приёмник форсункой топливо сливается в емкость 2. Исследуемая топливная система высокого давления дополнительно оборудуется датчиками давления и перемещения 4. В качестве базовых датчиков рассматривались тензометрические преобразователи давления и индуктивные датчики перемещения.

Датчики подключены к тензостанции 1, которая обеспечивает их питанием, принимает и преобразует в цифровой код информацию с выводом данных на персональный компьютер (ПК) для последующей обработки и записи.

Размещение элементов системы топливоподачи и датчиков на стенде показано на рис. 2.

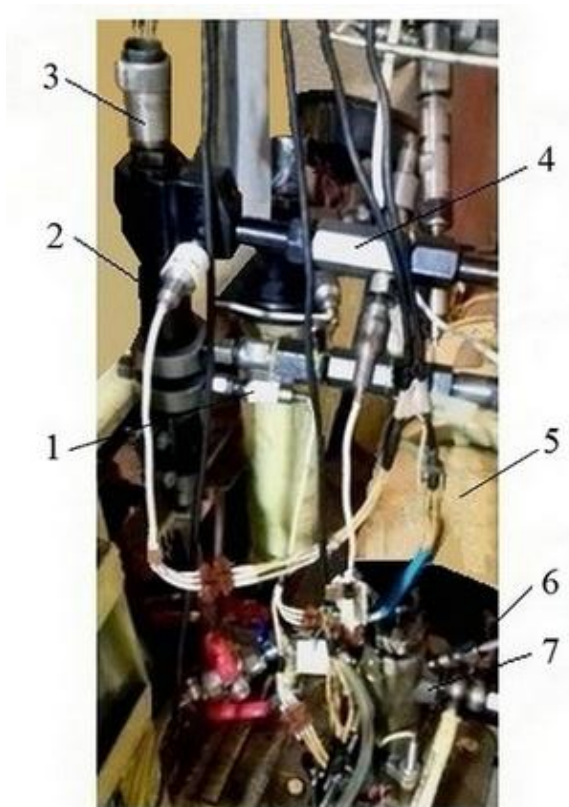


Рисунок 2 – Общий вид топливной аппаратуры дизеля 6ЧН 25/34 с датчиками на безмоторном стенде:

1 – датчик давления в канале форсунки $p_{ф.к}$; 2 – форсунка; 3 – датчик хода иглы форсунки z ; 4 – датчик давление на входе в форсунку $p_{ф.вх}$; 5 – электродвигатель; 6 – датчик давления в насосе p_n ; 7 – ТНВД

Безмоторный стенд был оборудован тензометрическими датчиками давления и индуктивными датчиками перемещения.

Указанный стенд, способен обеспечивать бесступенчатое изменение частоты вращения, а также другие режимные и регулировочные параметры, для чего был оборудован измерительной и управляющей системами в составе:

- программно-аппаратным измерительным комплексом (тензостанцией);
- программно-аппаратный и электромеханическим комплексом управления положением рейки ТНВД.

Измерительная система, объединённая общим названием «тензостанция» (ТС), включает в себя следующие функциональные блоки, представленные на рис. 3:

- персональный компьютер (ПК);

- измерительная установка типа LTR-U-1;
- блок коммутации и усилителей;
- комплект программного обеспечения.

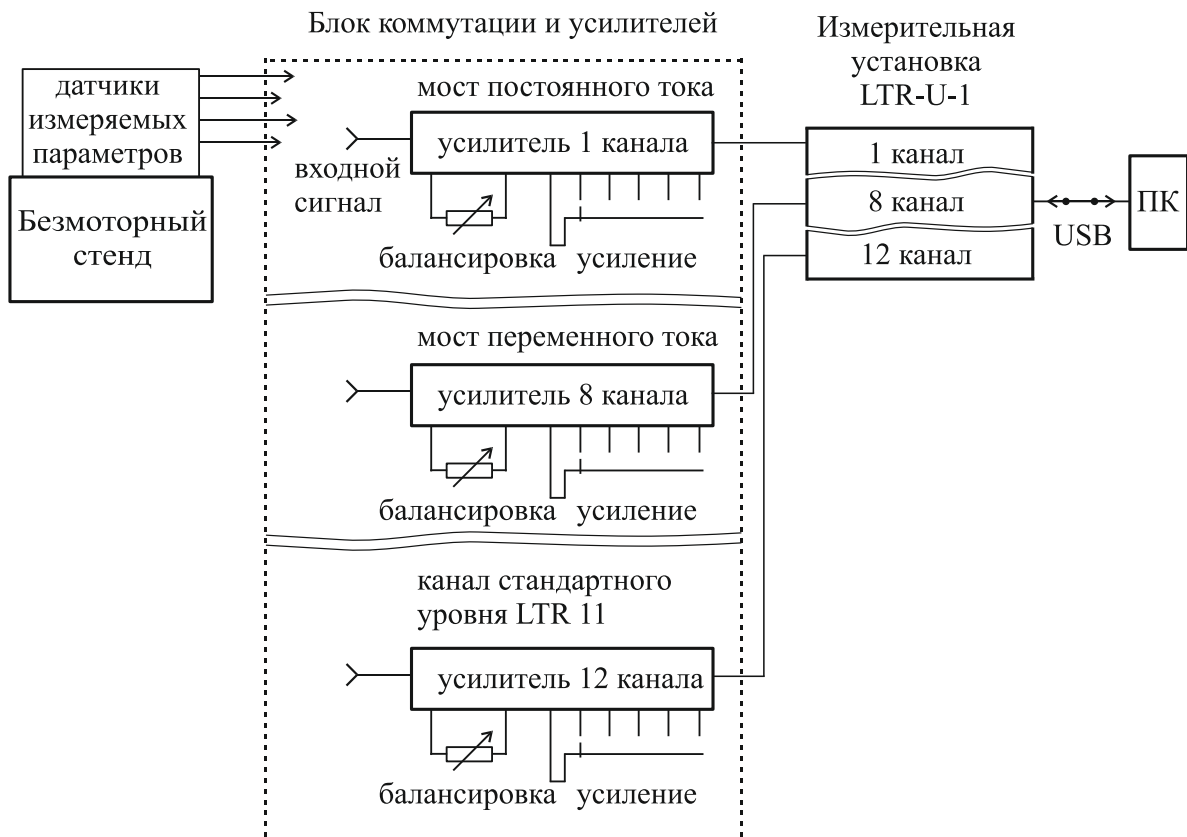


Рисунок 3 – Функциональная схема тензостанции

Для обеспечения работы измерительной установки LTR-U-1, входящей в состав тензостанции, был разработан блок коммутации и усилителей. Данный блок предназначен для обеспечения питания и усиления сигналов от тензодатчиков, включенных по полумостовой схеме и датчиков общего назначения (датчики вращения, фото датчик и т. д.).

ТС обеспечивает регистрацию следующих параметров процесса впрыскивания и рабочих устройств стенда:

- давления топлива;
- перемещения рабочих элементов и углов поворота вращающихся деталей;
- различного рода сигналов в диапазоне ± 10 В.

Управление ТС обеспечивается посредством совместной работы двух программ:

- LTRServer, организующей прием данных и передачу команд ПК к измерительной установке LTR-U-1 через интерфейс USB;
- пакета LGraph, адаптированного к условиям использования в составе ТС, позволяющего визуально настраивать некоторые параметры ТС, а также отображать на экране процессы настройки, приема и записи данных.

Кроме того для безмоторного стенда разработан программно-аппаратный комплекс управления положением рейки ТНВД. Функциональная схема комплекса приведена на рис. 4.

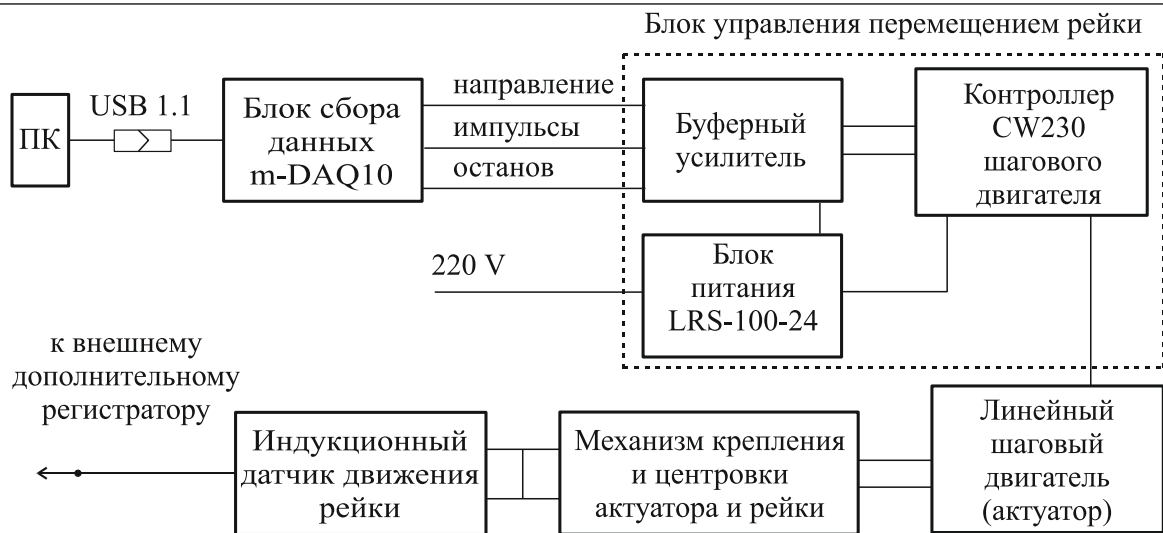


Рисунок 4 – Функциональная схема работы программно-аппаратного комплекса управления положением рейки топливного насоса высокого давления (ТНВД)

Комплекс работает под управлением программы ReikaXP2, установленной на ПК. Интерфейс программы позволяет задавать параметры циклограммы (закона движения) рейки вручную либо загрузкой из файла исходных данных, а также проверить работоспособность системы в пошаговом режиме движения рейки на малой и большой скорости.

Исполнительным устройством системы управления движения рейки является линейный шаговый двигатель (актуатор) типа SM57HT56-2804TL. Актуатор представляет собой сочетание шагового двигателя и винтовой передачи, выполненное в едином блоке. Поворот ротора двигателя на определенный угол приводит к пропорциональному линейному движению винта.

Основные характеристики актуатора:

- шаг (угол поворота) $1,8^\circ$ (в режиме полного шага);
- шаг (один оборот винта) 8 мм;
- максимальная скорость движения вала актуатора 0,4 м/с (без нагрузки).

Общий вид устройства управления рейкой ТНВД на безмоторном стенде представлен на рис. 5, измерительный комплекс на рис. 6.

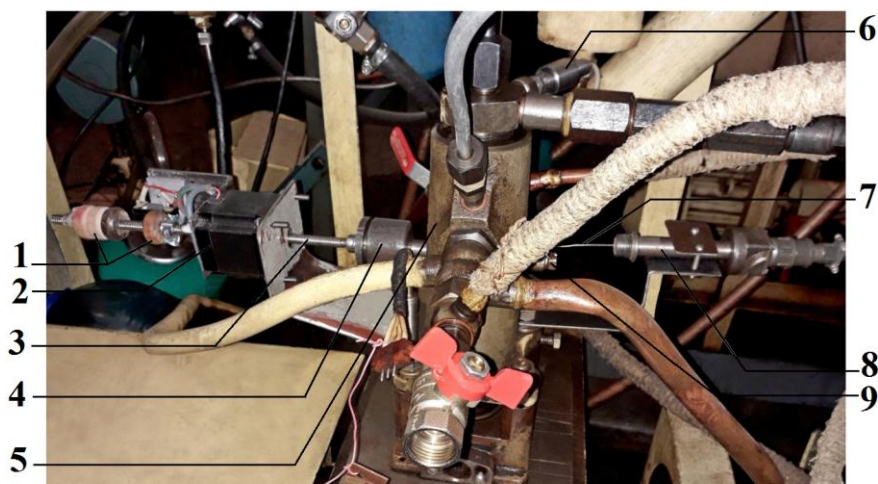


Рисунок 5 – Устройство управления рейкой топливного насоса высокого давления:

1 – диски ограничителя движения; 2 – шаговый двигатель; 3 – вал актуатора; 4 – механизм центровки; 5 – ТНВД; 6 – датчик давления в входе штуцера ТНВД; 7 – шток индуктивного датчика; 8 – индуктивный датчик движения рейки ТНВД; 9 – узел крепления штока



Рисунок 6 – Общий вид измерительного комплекса безмоторного стенда:
 1 – модуль сбора данных m-DAQ10; 2 – системный блок персонального компьютера; 3 – модуль управления перемещением рейки (актуатором); 4 – «тензостанция» система (ТС)

Модуль сбора данных m-DAQ10 с интерфейсом USB 1.1 содержит 8 каналов аналогового-цифрового преобразования, 2 канала цифро-аналогового преобразования. Один из каналов дискретного может использоваться как вход счетчика, а другой – как вход внешнего запуска аналогового-цифрового преобразователя или синхронизации. На контактах внешнего разъема присутствуют также напряжения питания +5 В и ±15 В.

Программное обеспечение к m-DAQ10 содержит драйвер динамически подключаемой библиотеки (DLL) и примеры работы с ней, расширение файлов LLB для среды графического программирования LabVIEW и ряд виртуальных приборов – «осциллограф», «анализатор спектра», «частотомер» и «вольтметр».

Движение рейки ТНВД задавалась в файле исходных данных для управляющей программы ReikaXP2.exe. После запуска ReikaXP2.exe на экране монитора появится изображение (рабочее окно). В рабочем окне выделено четыре области рис. 7:

- первая область основная – темно-серого цвета. В ней расположены три кнопки ПУСК, ВЫХОД, ПОМОЩЬ и остальные три области;
- вторая область – циклограмма движения рейки;
- третья область – рейка;
- четвертая область – информационная строка.

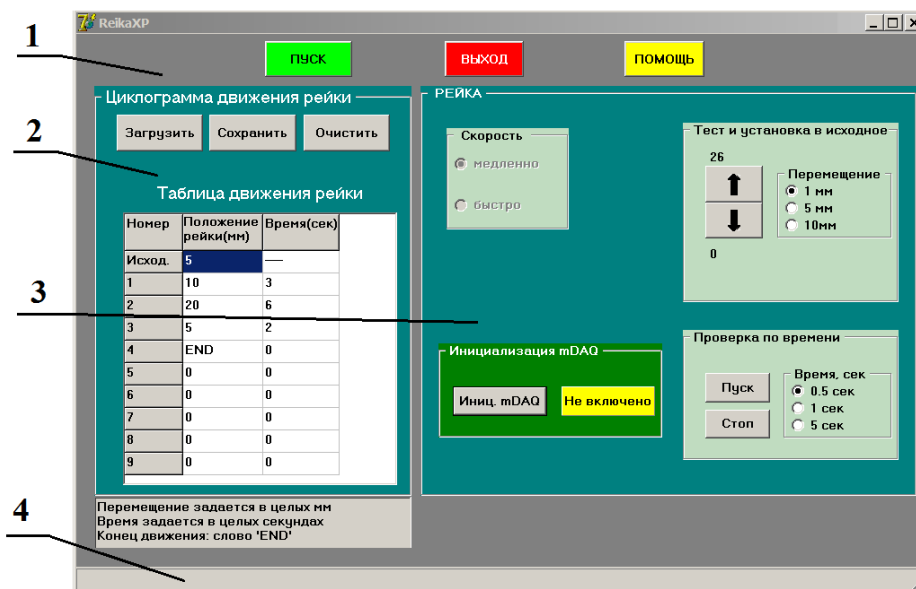


Рисунок 7 – Окно управляющей программы ReikaXP2.exe:

1 – основная область; 2 – область циклограммы движения рейки; 3 – область рейки; 4 – область информационной строки

Осциллограмма последовательных циклов проведенного экспериментального исследования представлена на рис. 8, а.

На рис. 8, б представлена нагрузочная характеристика системы топливоподачи, полученная в динамическом режиме.

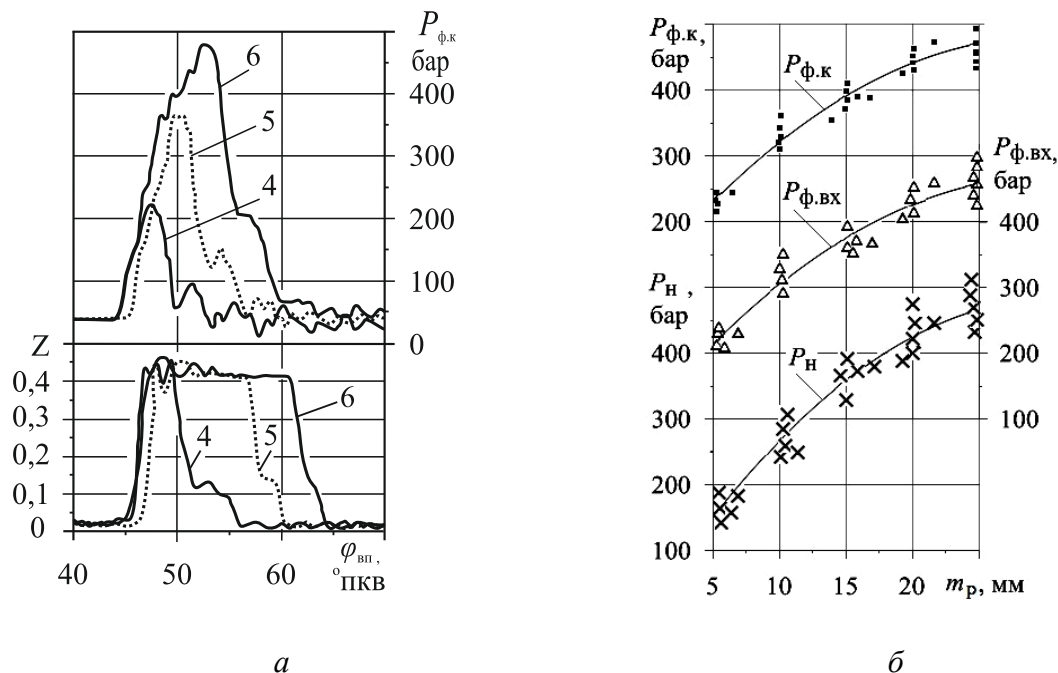


Рисунок 8 – Осциллограмма последовательных циклов и параметров топливоподачи от положения рейки ТНВД:

а – осциллограммы топливоподачи на участках нагрузочной характеристики: - - - циклы 5 – движение рейки; — циклы 4, 6 – рейка стабильна, при $m_p=5-25$ мм.

б – Зависимость параметров топливоподачи от положения рейки топливного насоса высокого давления в динамическом режиме для $p_{ф.к}$, $p_{ф.вх}$, p_n .

На рис. 8, а представлены совмещенные осциллограммы давления в канале форсунки $p_{ф.к}$ и угла впрыскивания $\varphi_{вп}$ последовательных циклов 4, 5, 6. Рейка ТНВД находится в исходном положении, выдвинута на отметку 5 мм, частота вращения распределительного вала n_p номинальная 255 об/мин. Давление форсунки канала $p_{ф.к}$ последнего четвертого цикла впрыскивания установившегося режима перед страгиванием рейки составило 216 бар, а угол впрыскивания $\varphi_{вп}=10,0$ ПРВ.

Переходной режим на первом участке движения характеризуется следующими параметрами: рейка смещена на отметку 25 мм, при этом пройдено расстояние 20 мм за 0,44 с со скоростью 45,5 мм/с.

На время движения приходится 5 цикл впрыскивания. Его параметры: давление $p_{ф.к}=364$ бар, $\varphi_{вп}=14,0$ ПРВ. Первое же после остановки рейки впрыскивание (6 по общей нумерации циклов) имело сразу параметры установившегося режима: $p_{ф.к}=474$ бар и $\varphi_{вп}=19,5$ ПРВ.

Нагрузочная характеристика системы топливоподачи, полученная в динамическом режиме, представлена на рис. 8, б.

Для $p_{ф.к}$, $p_{ф.вх}$, p_n опытные точки сгруппированы в пяти областях, соответствующих ступеням перемещения рейки (рис. 8, б).

При минимальном выходе рейки $m_p=5$ мм давление топлива $p_{ф.к}$ изменяется от 216 до 222 бар при среднем значении 219 бар. Соответствующая величина $\varphi_{вп}$ от 10 до 11°ПРВ (в среднем 10,75°ПРВ). При максимальном $m_p=25$ мм диапазон $p_{ф.к}$ составил 474–516 бар, в среднем 470 бар. Угол впрыскивания $\varphi_{вп}=19,5-22$ °ПРВ, а среднее значение–20,64°ПРВ.

Анализ распределение опытных точек на графиках рис. 8, б свидетельствует о корректном представлении существующих зависимостей аппроксимируемыми кривыми. Для статистической оценки достоверности экспериментальных данных целесообразно использовать среднеквадратические отклонения параметров в абсолютных и относительных величинах, отнесенных к аппроксимирующим значениям, представленным соответствующей кривой.

Для оценки отклонения экспериментальных значений параметров топливоподачи от аппроксимирующей кривой при различных положениях рейки ТНВД (рис. 8, б) используем формулы:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (y_{\text{экс}} - y_{\text{апр}})^2}{n}},$$

$$\delta = \frac{\sigma}{y_{\text{ср}}} \cdot 100\%,$$

где σ , δ – абсолютное и относительное среднее квадратичное отклонение; $y_{\text{экс}}$ – экспериментальные значения параметров процесса топливоподачи соответствующего участка; $y_{\text{апр}}$ – координата аппроксимирующей кривой на соответствующем участке; $y_{\text{ср}}$ – среднее значение параметров процесса на соответствующем участке; n – полный объем выборки.

В результате получены следующие величины: для $p_{\text{ф.вх}}$ $\delta=2,7\%$; для $p_{\text{ф.к}}$ $\delta=2,6\%$; для $p_{\text{н}}$ $\delta=2,9\%$; для $\varphi_{\text{вп}}$ $\delta=3\%$.

Выводы и предложения

1. Создана методика динамических безмоторных испытаний топливной аппаратуры, обеспечивающая совмещённое исследование динамических параметров процессов впрыскивания топлива, частичных режимов и характеристик топливной аппаратуры. К последним относятся традиционные зависимости параметров топливоподачи от положения рейки ТНВД и частоты вращения (нагрузочная и скоростная характеристики).

2. Разработано и реализовано программно-аппаратное обеспечение, выполняющее функции управления режимами испытаний, запись, обработку данных и оформление результатов эксперимента. Измерительная часть системы укомплектована датчиками, также созданными на кафедре СЭУ НУ“ОМА”.

3. Реализован электромеханический комплекс с компьютерным программным управлением для задания режимов испытаний.

4. Ряд решений программного и инженерного характера содержат положения, имеющие перспективу защиты авторских прав. По отдельным из них подана заявка на получения патентов [9].

5. Испытательный комплекс прошёл наладку, доводку и используется в текущей исследовательской работе кафедры СЭУ.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Половинка Э. М., Слободянюк Н. В. Процесс впрыскивания топлива в судовом среднеоборотном дизеле на переменных режимах. *Судовые энергетические установки*. 2016. № 36. С. 141–151.

2. Патрахальцев Н. Н., Пономарёв М. Н., Савастенко А. А. Влияние переходных процессов в топливной аппаратуре дизеля на его динамические качества. *Вестник РУДН. Серия Инженерные исследования*. 2003. № 1. С. 15–18.

3. Пономарев М. Н., Сеницын А. К., Соловьёв Д. Е. Переходные процессы в линиях высокого давления топливной аппаратуры дизеля. *Вестник РУДН. Серия Инженерные исследования*. 2003. – № 1. – С. 39–42.

4. Девянина А. С. Оценка влияния неравномерности подачи топлива на показатели дизеля. *Тракторы и сельхозмашины*. № 5. 2017. С. 5–10.
5. Нгуен Х. Х. Оценка эмиссии отработавших газов дизелей эксплуатирующийся судов смешанного (река-море) плавания. *Технические науки в России и за рубежом: материалы Международ. науч. конф.* Ваш полиграфический партнер, 2011. С. 103–110.
6. Свистула А. Е., Матиевский Г. Д., Некрасова М. А. Снижение расхода топлива путём оптимизации скоростного режима работы дизеля. *Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых*. Челябинск : Южно-Уральский государственный университет, 2016. № 1(4). С. 262–266.
7. Саенко М. М., Жигadlo А. П., Иванов А. Л. Влияние различных факторов на величину и равномерность подачи топлива в цилиндры дизеля. *Вестник СибАДИ*. 2013. № 4(32). С. 29–35.
8. Соломатин Н. С., Заморин А. Г., Зотов Е. М. Аппроксимация частичных скоростных характеристик двигателя внутреннего сгорания. *Известия МГТУ «МАМИ»*. 2009. № 1(7). С. 68–71.
9. Дадиллов А. С. Исследование пусковых эксплуатационных качеств и рабочего процесса судового малоразмерного дизеля с камерой сгорания в поршне : дис. ... канд. техн. наук : 05.08.05. Астрахань, 2007. 138 с.
10. Топливные системы и экономичность дизелей / Астахов И. В., Горбунов Л. Н., Трусов В. И. и др. ; под ред. В. А. Кутова. М., 1990. 288 с.
11. Annex VI – Regulations for the Prevention of Air Pollution from Ships. Chapter 3 – Requirements for control of emissions from ships. Regulation 13 – Nitrogen oxides (NO_x) / MARPOL. URL: <http://www.marpoltraining.com/MMSKOREAN/MARPOL/>
12. Надежкин А. В., Luu Quang Hieu, Голенищев А. В., Старченко М. Е. Анализ влияния физико-химических показателей дистиллятных топлив на надежность работы топливной аппаратуры. Морской государственный университет имени адмирала Г. И. Невельского. Владивосток, 2017. № 2 (2). С. 434–440.
13. Королев А. Е. Распределение отказов двигателей. *NovaUm*. Ru. 2017. № 10. С. 41–45.
14. Королев А. Е. Работоспособность топливной аппаратуры дизелей. *Дневник науки*. № 4 (28). Пермь, 2019. С. 56–72.
15. Половинка Э. М., Слободянюк Н. В. Влияние начальных условий на процесс топливоподачи среднеоборотного судового дизеля на переменных режимах. *American Scientific Journal*. 2018. № 19. P. 51–59.
16. ГОСТ 15888-90. Аппаратура дизелей топливная. Термины и определения. М. : Изд-во стандартов, 1990. 14 с.
17. ГОСТ 10578-95. Насосы топливные дизелей. Общие технические условия. [Введ.1997.07.01]. М. : Изд-во стандартов, 1995.
18. ГОСТ 10579-88 Изд-во стандартов. Форсунки дизельные. Общие технические условия. Введ. 1990.01.01. М., 1988.
19. Обозов А. А., Субботенко Д. И., Тараканов В. В. Оптимизация процессов в топливной аппаратуре дизеля с целью улучшения его экономических и экологических характеристик. *Вестник Брянского Государственного технического университета*. 2014. № 2 (42). С. 45–51.
20. Марков В. А., Полухин Е. Е. Переходные процессы дизеля с системой регулирования угла опережения впрыскивания топлива. *Известия вузов. Машиностроение*. 2008. № 5. С. 33–65.
21. Стенд для дослідження і регулювання паливної апаратури дизелів: пат. Україна : МПК (2006) F02M 65/00. № u 2018 05581 ; заява. 21.05.2018 ; опубл. 25.02.2019, Бюл. №4. : веб-сайт. URL : <http://base.uipv.org/searchINV/search.php?action/>

22 Стенд для дослідження і регулювання паливної апаратури дизелів: пат. Україна : МПК (2006) F02M 65/00. № а 2018 06815 ; заява. 15.06.2018 ; кваліфікаційна експертиза 14.01.2019. веб-сайт. URL: <http://base.uipv.org/searchInvStat/showclaimdetails/>

REFERENCES

1. Polovynka, E. M., Slobodianiuk, N. V. (2016). Protsess vpryskyvaniya toplyva v sudovom sredneoborotnom dyzele na peremennykh rezhymakh. *Sudovye enerhetycheskiye ustanovky*, 36, 141–151.
2. Patrakhaltsev, N. N., Ponomarev, M. N., Savastenko, A. A. (2003). Vliyaniye perekhodnykh protsessov v toplyvnoi apparature dyzelia na ego dynamycheskiye kachestva. *Vestnyk RUDN, ser. Ynzhenernyye yssledovaniya*, 1, 15–18.
3. Ponomarev, M. N., Synytsyn, A. K., Solovëv, D. E. (2003). Perekhodnyye protsessy v lynyakh vysokogo davleniya toplyvnoi apparatury dyzelia. *Vestnyk RUDN, ser. Ynzhenernyye yssledovaniya*, 20, 39–42.
4. Devianyna, A. C. (2017). Otsenka vliyaniya neravnomernosti podachy toplyva na pokazately dyzelia. *Traktory y selkhoz mashyny*, 5, 5–10.
5. Nhuen, Kh. Kh. (2011). Otsenka emyssyy otrabotavshykh hazov dyzelei ekspluatyruyushchysia sudov smeshannogo (reka-more) plavaniya. *Tekhnicheskiye nauky v Rossyy y za rubezhom: materyaly Mezhdunar. nauch. konf. Moskva : Vash polyhrafycheskiy partner*, 103–110.
6. Svystula, A. E., Matyevskiy, H. D., Nekrasova, M. A. (2016). Snyzhenye raskhoda toplyva putëm optymyzatsyy skorostnoho rezhyma raboty dyzelia. *Enerho - y resursoberezhnyye v teploenerhetyke y sotsyalnoi sfere: materyaly mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsyy studentov, aspyrantov, uchennykh. Yuzhno-Uralskiy gosudarstvenniy unyversytet*, 1(4), 262–266.
7. Saenko, M. M., Zhyhadlo, A. P., Yvanov, A. L. (2013). Vliyaniye razlychnykh faktorov na velychynu y ravnomernost podachy toplyva v tsylindry dyzelia. *Vestnyk SybADY*, 4(32), 29–35.
8. Solomatyn, N. S., Zamoryn, A. H., Zotov, E. M. (2009). Approksymatsiya chastychnykh skorostnykh kharakterystyk dvyhatelia vnutrenneho shoraniya. *Yzvestiya MHTU «MAMY»*, 1(7), 68–71.
9. Dadylov, A. S. (2007). Yssledovaniye puskovykh ekspluatatsyonnykh kachestv y rabocheho protsessa sudovoho malorazmernogo dyzelia s kameroi shoraniya v porshne. *Kandydatskiye tezysy*. Astrakhan.
10. Astakhov Y. V., Horbunov L. N., Trusov V. Y., Khachyan A. S., Riabkyn L. M. (1990). *Toplyvnyye systemy y ekonomychnost dyzelei*. V. A. Kutova. (Ed). Moskva.
11. Annex VI – Regulations for the Prevention of Air Pollution from Ships. Chapter 3 – Requirements for control of emissions from ships. Regulation 13 – Nitrogen oxides (NO_x). *MARPOL*. Retrieved from http://www.marpoltraining.com/MMSKOREAN/MARPOL/Annex_VI/r13.htm
12. Nadezhkyn, A. V., Luu Quang Hieu, Holenyshchev, A. V., Starchenko, M. E. (2017). Analiz vliyaniya fyzyko-khymycheskykh pokazatelei dystylliatnykh toplyv na nadezhnost raboty toplyvnoi apparatury. *Morskoj gosudarstvenniy unyversytet imeny admirala H. Y. Nevelskoh*, 2(2). 434–440.
13. Korolev, A. E. (2017). Raspredelenye otkazov dvyhatelei. *NovaUm. Ru*, 10, 41–45.
14. Korolev, A. E. (2019). Rabotosposobnost toplyvnoi apparatury dyzelei. *Dnevnyk nauky*, 4(28), 56–72.
15. Polovynka, E. M., Slobodianiuk, N. V. (2018). Vliyaniye nachalnikh uslovyi na protsess toplyvopodachy sredneoborotnoho sudovoho dyzelia na peremennykh rezhymakh. *American Scientific Journal*, 19, 51–59.
16. *Apparatura dyzelei, toplyvnaia. Termyny y opredeleniya*. (1990). *HOST 15888-90 Yzd-vo standartov*. Moscow.

17. *Nasosi toplyvnie dyzelei. Obshchye tekhnicheskoye usloviya.* (1997). *HOST 10578-95 Yzd-vo standartov.* Moscow.

18. *Forsunky dyzelnie. Obshchye tekhnicheskoye usloviya.* (1990). *HOST 10579-88 Yzd-vo standartov.* Moscow.

19. Obozov, A. A., Subbotenko, D. Y., Tarakanov, V. V. (2014). *Optymyzatsiya protsessov v toplyvnoi apparature dyzelia s tseliu uluchsheniya yego ekonomicheskikh y ekologicheskikh kharakterystyk. Vestnyk Brianskoho Hosudarstvennogo tekhnicheskoho unyversyteta, 42, 45–51.*

20. Markov, V. A., Polukhyn, E. E. (2008). *Perekhodnyye protsessy dyzelia s systemoi rehulyrovaniya uhla operezheniya vpryskivaniya toplyva. Yzvestiya vuzov Mashynostroeniye, 5, 33–65.*

21. *Stend dlia doslidzhennia i rehuliuvaniia palyvnoi aparatury dyzeliv:* pat. Ukraina : MPK (2006) F02M 65/00. № u 2018 05581 ; zaiava. 21.05.2018 ; opubl. 25.02.2019, Biul. № 4. Retrieved from <http://base.uipv.org/searchInvStat/showclaimdetails.php?IdClaim=308776&resId=1>

22. *Stend dlia doslidzhennia i rehuliuvaniia palyvnoi aparatury dyzeliv:* pat. Ukraina : MPK (2006) F02M 65/00. № a 2018 06815 ; zaiava. 15.06.2018 ; kvalifikatsiina ekspertyza 14.01.2019, Retrieved from <http://base.uipv.org/searchInvStat/showclaimdetails/>

Половинка Е.М. Слободянюк М.В. ПРОГРАМНО-АПАРАТНИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ДИНАМІЧНИХ БЕЗМОТОРНИХ ВИПРОБУВАНЬ ПАЛИВНОЇ АПАРАТУРИ ДИЗЕЛІВ

У статті розглянуто результати експериментального дослідження паливної апаратури високого тиску середньооборотного двигуна в ході зміни положення рейки паливного насоса високого тиску на відповідних режимах навантажувальної характеристики.

В ході експерименту розроблена методика динамічних випробувань паливної апаратури, що забезпечує поєднане дослідження динамічних параметрів процесів впорскування палива, часткових режимів і характеристик паливної апаратури.

Параметри паливної апаратури, отримані в ході експериментального дослідження дозволяють оперативно отримувати навантажувальну характеристику шляхом ступеневої переміщення рейки паливного насоса високого тиску, одночасно забезпечуючи дослідження перехідних процесів в заданому діапазоні переміщення рейки.

Методика динамічних безмоторних випробувань забезпечує заданий комплекс параметрів при роботі за різними характеристиками. Найактуальнішими серед них є сучасні норми екологічності та економічності.

Розроблено та реалізовано програмно-апаратне забезпечення, яке виконує функції управління режимами випробувань, запис, обробку даних і оформлення результатів експерименту. Вимірвальна частина системи укомплектована датчиками, які були створені на кафедрі суднових енергетичних установок Національного університету «Одеська морська академія».

Реалізовано електромеханічний комплекс з комп'ютерним програмним управлінням для завдання режимів випробувань.

Випробувальний комплекс пройшов наладку, доведення і використовується в поточній дослідницькій роботі кафедри Суднові енергетичних установок.

Ключові слова: експериментальне дослідження, методика безмоторних випробувань, динамічні безмоторні випробування, перехідні процеси, ступеневі переміщення, рейка паливного насоса високого тиску, програмно-апаратне забезпечення.

Polovinka E., Slobodyaniuk N. SOFTWARE AND HARDWARE COMPLEX FOR DYNAMIC MOTORLESS TESTS OF DIESEL ENGINE FUEL EQUIPMENT

The object of the study of this article is hydrodynamic processes in the high-pressure fuel system of the ship's medium-speed diesel engine in variable conditions. The aim of the study is to create a method of dynamic motorless testing of medium-speed diesel engine fuel equipment with a variable position of high-pressure fuel pump rail under corresponding modes of load characteristics. The article discusses the results of an experimental study of high-pressure fuel equipment of a medium-speed engine when repositioning the high-pressure fuel pump rail in the corresponding modes of load characteristic and studies the processes of fuel injection in variable and partial modes at the department of ship power plants. The National University "Odessa Maritime Academy" has developed a dynamic test method, created a hardware-software complex for the purpose of controlling fuel equipment operation modes and keeping of fuel supply processes records. Also, an electromechanical module has been created as an actuator for a package of control of load

characteristic modes. The basic equipment was the motorless stand equipped with a fuel injection system for a ship's medium-speed diesel engine ChN25/34. The cam shaft driving gear of the stand is carried out by a direct current motor with an infinitely adjustable speed.

The parameters of the fuel equipment obtained while conducting experimental study, allow to obtain the load characteristics quickly at stepwise movement of high-pressure fuel pump rail, while at the same time ensuring the study of transients in the specified range of the rail movement. The technique of dynamic motorless tests provides a given set of parameters when working with various characteristics. The most relevant among them are modern standards of environmental friendliness and efficiency. Designed and implemented software and hardware that performs the functions of managing test modes, recording, data processing and registration of experimental results. An electromechanical complex with computer program control for setting test modes was implemented. The test complex has been adjusted and refined and has been used in the current research work of the Department of Ship Power Plants.

Keywords: *experimental research, method of motorless testing, dynamic motorless testing, transient processes, stepwise movement, rail of high pressure fuel pump, software and hardware.*

© Половинка Е.М. Слободянюк М.В.

Статтю прийнято
до редакції 03.06.19

ФИЛЬТРАЦИЯ ПОМЕХ РОБАСТНЫМ РЕГУЛЯТОРОМ В СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ ПОТОКОСЦЕПЛЕНИЕМ РОТОРА

Хлопенко Н. Я., д.т.н, профессор кафедры судового электрооборудования и средств автоматизации Херсонской государственной морской академии, e-mail: khlopenko.n@gmail.com, ORCID: 0000-0001-7773-4721;

Рожков С. А., д.т.н, заведующий кафедры судового электрооборудования и средств автоматизации Херсонской государственной морской академии, e-mail: rozhkov_ser@mata.ua, ORCID: 0000-0002-1662-004X;

Хлопенко И. Н., аспирант Херсонской государственной морской академии

Целью работы заключается в теоретическом исследовании фильтрации помех стабилизирующим H_∞ -субоптимальным робастным регулятором в системе управления потокосцеплением ротора асинхронного электродвигателя. Для проведения исследований применялась математическая модель канала потокосцепления ротора системы векторного управления асинхронного электропривода с параметрической неопределенностью. Рассчитывалась передаточная функция H_∞ -субоптимального регулятора по методу смешанной чувствительности. Эта передаточная функция использовалась для построения структурной схемы системы управления потокосцеплением с единичной обратной связью с суммирующим устройством полезного сигнала и помехи. Проведено компьютерное моделирование передаточной функции H_∞ -субоптимального регулятора. Построена структурная схема в пакете Simulink системы робастного управления потокосцеплением ротора с единичной обратной связью с суммирующим устройством полезного сигнала и помехи. Получены кривые переходных процессов потокосцепления при различных значениях размахов помех. Проведен анализ фильтрации помех робастным регулятором. Разработана методика фильтрации помех H_∞ -субоптимальным робастным регулятором в системе управления потокосцеплением ротора асинхронного электродвигателя. Методика позволяет оценивать точность размаха отфильтрованных регулятором помех по рассчитанной кривой переходного процесса потокосцепления. Результаты моделирования переходных процессов потокосцепления ротора подтверждают высокую точность стабилизации потокосцепления и малую чувствительность системы к помехам при ограничении их размахов до допустимых значений. Использование разработанной методики позволяет проводить расчеты по уточнению допусков на фильтрацию помех H_∞ -субоптимальным робастным регулятором в системе управления потокосцеплением ротора асинхронного электродвигателя.

Ключевые слова: робастное управление, потокосцепление ротора, помехи.

DOI: 10.33815/2313-4763.2019.1.20.122-131

Постановка задачи. Обычно регулятор настраивается на номинальную модель объекта. Однако при реализации регулятор подключается не к модели, а к реальному объекту. Поэтому при эксплуатации наблюдается расхождение между сигналами управления. Эту разницу сигналов на выходе системы управления потокосцеплением в условиях структурной неопределенности и помех удобно фильтровать H_∞ -субоптимальным робастным регулятором. Расчет и проектирование такого регулятора изучались в работах [1, 2]. Однако в указанных работах задача фильтрации помех (например, шумов датчика, контактов в разъемах, электромагнитных полей, наводки с частотой питающей сети и пр.), в робастной системе управления потокосцеплением ротора асинхронного электродвигателя не рассматривалась. Ее решение имеет принципиальное значение для уточнения допусков на фильтрацию помех системой управления с робастным регулятором.

Анализ последних достижений и публикаций по данной проблеме. Помехи на выходе робастной системы управления потокосцеплением ротора асинхронного двигателя могут достигать весьма больших значений. Поэтому на стадии проектирования конструктор должен располагать информацией о способности робастного регулятора препятствовать прохождению таких сигналов в пределах допусков.

В настоящее время применяются несколько методов подавления помех в системах управления различного назначения. К ним относятся методы адаптивного и робастного управления [1, 2, 3–11], матричных неравенств [12], инвариантных множеств [13, 14],

инвариантных эллипсоидов [14, 15], скользящих режимов [16, 17], большого коэффициента усиления [18] и др.

Метод адаптивного управления [3-5] обеспечивает компенсацию неопределенностей объекта при эксплуатации за счет автоматической настройки регулятора. Однако «очистка» системы от всевозможных неопределенностей с использованием адаптивных методов является обременительной и часто невыполнимой задачей.

В отличие от метода адаптивного управления робастный метод, построенный на базе H_∞ -теории [6-11], в большинстве случаев обеспечивает заданное качество управления без компенсации неопределенностей. Он позволяет построить грубую систему управления, так как создан с учетом неполноты знаний о реальном объекте.

Метод матричных неравенств [12] используется в H_∞ -теории робастного управления для синтеза грубых стабилизирующих регуляторов по состоянию и динамических регуляторов заданного порядка по измеряемому выходу в классе ограниченных по норме вариаций их параметров. Задача разрешимости таких регуляторов является более сложной и сводится к поиску двух взаимобратных матриц, удовлетворяющих линейным матричным неравенствам.

Вопросы гарантированного оценивания, фильтрации и минимаксного управления в динамических системах изложены в трудах [13, 14]. Фундаментом для них является метод инвариантных множеств.

Метод инвариантных эллипсоидов, предложенный в [14, 15], относится к инвариантным множествам. Он обеспечивает подавление ограниченных внешних возмущений в динамических системах. Главным инструментом для него служит техника линейных матричных неравенств.

Вопросами развития теории и построения систем управления скользящим режимом в технических системах занимаются многие ученые, так как этот режим является весьма уязвимым по отношению к структурным неопределенностям. Ряд их исследований [19-22], которые представляют теоретический и практический интерес, посвящены скользящим режимам в задачах управления электроприводов. Однако изменение корней характеристического уравнения в связи с изменением отдельных структур устройств управления может привести к нарушению условия существования и устойчивости скользящего режима.

Методы на основе большого коэффициента усиления [18] обладают повышенной точностью и робастной устойчивостью по отношению к неопределенным параметрам и внешним низкочастотным возмущениям. Однако при больших коэффициентах усиления не обеспечивается робастность переходных процессов. Кроме того, не все объекты допускают реализацию большого коэффициента усиления.

Задачами подавления внешних возмущений робастным регулятором в системах управления электроприводов занимаются многие ученые [23-29]. Характерным для данных работ является создание методов расчета подавления робастным регулятором случайных воздействий широкого спектра частот. Экспериментально подтверждено, что система с робастным регулятором имеет меньшую ошибку по сравнению с системой с типовым регулятором.

В последнее время интенсивно развивается теория стохастического робастного управления [30-32] на основе выпуклой и мультигенной оптимизации.

Таким образом, из проведенного обзора работ следует, что применение H_∞ -субоптимального робастного регулятора к задаче фильтрации помех в системе управления потокосцеплением ротора асинхронного электропривода представляется наиболее целесообразным.

Цель работы заключается в теоретическом исследовании фильтрации помех стабилизирующим H_∞ -субоптимальным робастным регулятором в системе управления потокосцеплением.

Методы и результаты исследований. Рассмотрим неопределенный объект управления [1], состоящий из преобразователя частоты и обмоток статора и ротора асинхронного электродвигателя.

Представим уравнения состояния объекта [1] в нормальной операторной матричной форме (1):

$$\begin{aligned} px &= Ax + Bu; \\ y &= Cx, \end{aligned} \tag{1}$$

где

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_2} & \frac{L_{12}I_n}{T_2\Psi_n} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{T_{1eq}} & \frac{E_n}{R_{1eq}T_{1eq}I_n} \\ 0 & 0 & -\frac{1}{T_{fc}} \end{bmatrix};$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{K_{fc}U_n}{T_{fc}E_n} \end{bmatrix}^T; \quad C = [1 \ 0 \ 0];$$

p – оператор Лапласа; $x=(x_1, x_2, x_3)^T$ – фазовый вектор, причем $x_1=\Psi/\Psi_n$; $x_2=I/I_n$; $x_3=E/E_n$; Ψ – модуль вектора потокосцепления ротора; I – ток в канале потокосцепления ротора; E – ЭДС преобразователя частоты; $u=U/U_n$ – управляющее воздействие; U – напряжение на выходе регулятора; y – одномерный вектор выхода, по которому замыкается обратная связь; T_{fc} – постоянная времени преобразователя частоты; $T_{1eq}=L_{1eq}/R_{1eq}$ – электромагнитная постоянная времени обмотки статора, причем $R_{1eq}=R_1+(k_r)^2R_2$ и $L_{1eq}=\sigma L_1$ – ее эквивалентное сопротивление и индуктивность рассеяния; R_1, R_2 – активные сопротивления обмоток статора и ротора; $T_2=L_2/R_2$ – электромагнитная постоянная времени обмотки ротора; L_1, L_2 – индуктивности обмоток статора и ротора; L_{12} – взаимная индуктивность обмоток статора и ротора; $\sigma=1-(L_{12})^2/(L_1 L_2)$ – коэффициент рассеяния магнитного поля; $k_r=L_{12}/L_2$.

Соответствующую уравнениям (1) расширенную систему уравнений с неопределенными параметрами объекта $K_{fc}, R_{1eq}, R_2, L_1, L_2$ и L_{12} представим в виде (2):

$$\begin{aligned} px &= Ax + B_1w + B_2u; \\ z &= C_1x + D_{11}w + D_{12}u; \\ y &= C_2x + D_{21}w + D_{22}u, \end{aligned} \tag{2}$$

где

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{R_{2n}}{L_{2n}} & \frac{R_{2n}}{L_{2n}} & 0 \\ 0 & -\frac{R_{1eqn}}{L_{1eqn}} & \frac{R_{1eqn}}{L_{1eqn}} \\ 0 & 0 & -\frac{1}{T_{fc}} \end{bmatrix};$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \frac{p_{R_2}}{L_{2n}} & \frac{p_{L_{12}}}{L_{2n}} & -p_{L_2} & -\frac{p_{R_2}}{L_{2n}} \\ 0 & -p_{L_{1eq}} & -\frac{p_{R_{1eq}}}{L_{1eqn}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{p_{K_{fc}}}{T_{fc}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; B_2^T = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{1}{T_{fc}} \end{bmatrix};$$

$$C_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{R_{1eqn}}{L_{1eqn}} & \frac{R_{1eqn}}{L_{1eqn}} \\ 0 & R_{1eqn} & 0 \\ 0 & R_{2n} & 0 \\ 0 & R_{2n} & 0 \\ -\frac{R_{2n}}{L_{2n}} & \frac{R_{2n}}{L_{2n}} & 0 \\ R_{2n} & 0 & 0 \end{bmatrix}; D_{11} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -p_{L_{1eq}} & -\frac{p_{R_{1eq}}}{L_{1eqn}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & p_{R_2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{p_{R_2}}{L_{2n}} & \frac{p_{L_{12}}}{L_{2n}} & -p_{L_2} & -\frac{p_{R_2}}{L_{2n}} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$$C_2 = [1 \ 0 \ 0]; D_{12}^T = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]; D_{21} = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]; D_{22} = [0];$$

$z=(z_1, z_2, \dots, z_7)^T$, $w=(w_1, w_2, \dots, w_7)^T$ – соответственно входной и выходной векторы неопределенности, связанные между собою матричным выражением $w(p)=\Delta(p) \cdot z(p)$, в котором матрица неопределенности $\Delta(p)$ имеет диагональный вид.

Система уравнений (2) служила для численного определения передаточной функции H_∞ -субоптимального регулятора по методу смешанной чувствительности [11]. Эта передаточная функция имеет вид дробно-рационального выражения (3):

$$K(p) = k \frac{p^2 + b_1 p + b_2}{p^3 + a_1 p^2 + a_2 p + a_3}, \tag{3}$$

где $k, b_1, b_2, a_1, a_2, a_3$ – некоторые коэффициенты, значения которых определяются в процессе численного решения задачи.

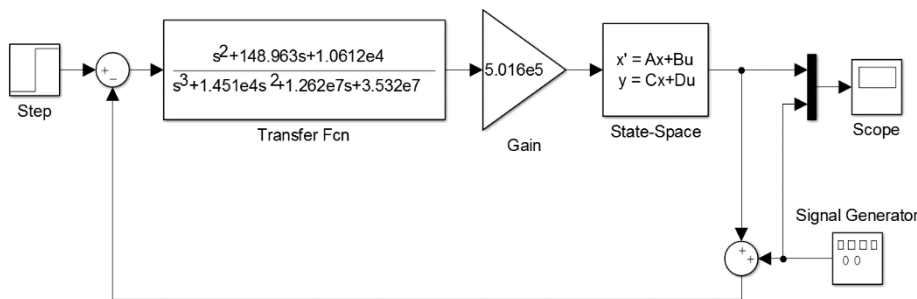


Рисунок 1 – Структурная схема системы робастного управления

Анализ фильтрации помех робастным регулятором проводился в пакете Simulink. В этом пакете для исследования влияния интенсивности случайного частотного спектра сигналов, характерного для шума датчика обратной связи, установленного на выходе робастной системы управления потокоцеплением, была построена структурная схема, представленная на рис. 1. В этой схеме помехи на выходе объекта создавались генератором случайных сигналов.

Расчеты выполнялись при следующих номинальных значениях исходных данных объекта (1): $T_{fc}=0,001$ с; $R_{1n}=2,65$ Ом; $R_{2n}=2,0$ Ом; $L_{1n}=0,186$ Гн; $L_{2n}=0,189$ Гн; $L_{12n}=0,179$ Гн; $\sigma=0,0996$, соответствующих асинхронному электроприводу с двигателем MDXMA100-32.

Рассчитанные по этим данным номинальные значения параметров регулятора (3), представленного передаточной функцией на рис. 1, оказались равными: $k=5,016 \cdot 10^5$; $b_1=148,963$; $b_2=1,0612 \cdot 10^4$; $a_1=1,451 \cdot 10^4$; $a_2=1,262 \cdot 10^7$; $a_3=3,532 \cdot 10^7$.

На рис.2 приведены отфильтрованные системой робастного управления кривые переходных процессов потокосцепления при значениях регулярных размахов помех 0,1, 0,3 и 0,5 (соответственно рис. 2 а, б, в).

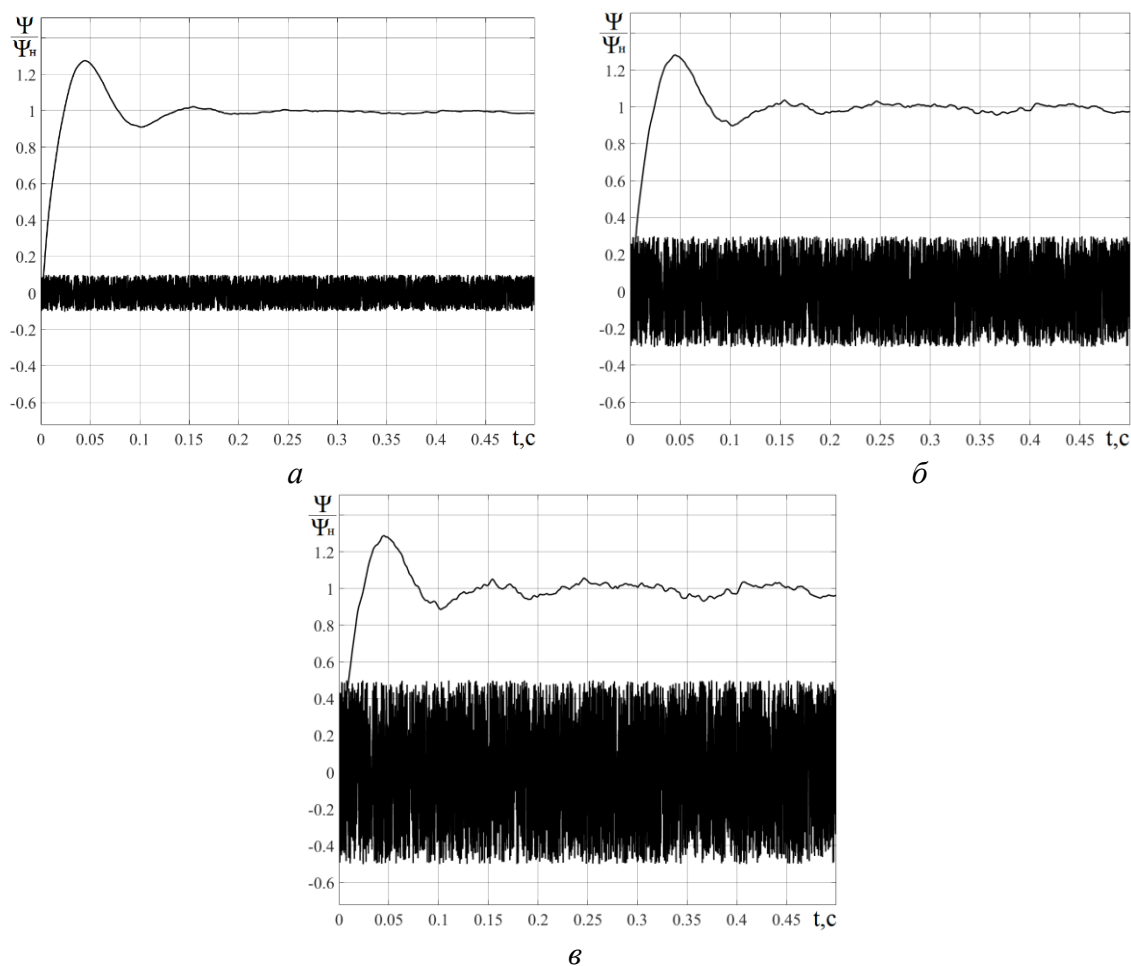


Рисунок 2 – Зависимость потокосцепления Ψ/Ψ_n от времени t при различных значениях размахов сгенерированных помех: а – размах 10 %; б – 30 %; в – 50 %

Из анализа кривых, представленных на рис. 2, видно, что с ростом размахов помех возрастает и уровень размаха выходного сигнала системы Ψ/Ψ_n . Поэтому величину размахов случайных помех следует ограничивать до допустимых значений, предусмотренных технической документацией. Если робастным регулятором ограничить помехи до допустимых значений не удастся, то необходимо установить причину их появления и затем свести их до минимума известными мероприятиями, освещенными в научно-технической литературе [33] (например, экранированием от наводок, заземлением корпусов и пр.)

Выводы

1. Разработана методика фильтрации помех H_∞ -субоптимальным робастным регулятором в системе управления потокосцеплением ротора асинхронного электродвигателя. Методика позволяет оценивать точность фильтрации помех по рассчитанной кривой переходного процесса потокосцепления.

2. Результаты моделирования переходных процессов потокосцепления ротора подтверждают высокую точность стабилизации и малую чувствительность системы к помехам.

3. Использование разработанной методики позволяет проводить расчеты по уточнению допусков на фильтрацию помех H_∞ -субоптимальным робастным регулятором в системе управления потокосцеплением ротора асинхронного электродвигателя.

4. Дальнейшие исследования будут направлены на экспериментальную проверку уровня фильтрации помех H_∞ -субоптимальным робастным регулятором.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хлопенко Н. Я., Хлопенко И. Н. Структурный синтез стабилизирующего робастного регулятора потокосцепления ротора. *Електротехніка і електромеханіка*. 2017. № 1. С.21–25. doi: 10.20998/2074-272X.2017.1.04.

2. Хлопенко И. Н., Рожков С. А., Хлопенко Н. Я. Устойчивость и точность робастной системы стабилизации потокосцепления ротора асинхронного электродвигателя при случайных вариациях неопределенных параметров в заданных границах. *Електротехніка і електромеханіка*. 2018. №4. С.35–39. doi: 10.20998/2074-272X/2018.4.06.

3. Никифоров В. О. Адаптивное и робастное управление с компенсацией возмущений. СПб. : Наука, 2003. 282 с.

4. Цыкунов А. М. Робастное управление с компенсацией возмущений. Москва : Физматлит, 2012. 298 с.

5. Цыкунов А. М. Робастная система слежения с компенсацией возмущений и помех. *Вестник АГТУ*. 2014. № 1. С. 54–61.

6. Francis B. A., Zames G. On H_∞ -optimal sensitivity theory for SISO feedback systems. *IEEE Trans. Automat. Control*. 1984. Vol. 29. P. 9–16.

7. Glover K. Robust stabilization of linear multivariable systems: relation to approximation. *Intern. J. Control*. 1986. Vol. 43. N 3. P. 741–766.

8. Doyle J. C., Glover K., Khargonekar P. P., Francis B. A. State-space solution to standard H_2 and H_∞ control problems. *IEEE Trans. Automat. Control*. 1989. Vol. 34. N 8. P. 831–847.

9. Методы робастного, нейро-нечеткого и адаптивного управления / под ред. Н. Д. Егупова. Москва : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. 744 с.

10. Честнов В. Н. H_∞ -подход к синтезу регуляторов при параметрической неопределенности и полигармонических внешних возмущениях. *Автоматика и телемеханика*. 2015. № 6. С. 112–127.

11. Richard Y., Chiang R., Michael G., Safonov M. MATLAB: Robust Control Toolbox. User's Guide. Version 2, 1998. 230 p. URL : <http://www.mathworks.com> (Accessed 12 May 2016).

12. Баландин Д. В., Коган М. М. Синтез законов управления на основе линейных матричных неравенств. Москва : Физматлит, 2007. 280 с.

13. Куржанский А. Б. Управление и наблюдение в условиях неопределенности. Москва : Наука, 1977. 392 с.

14. Черноусько Ф. Л. Оценивание фазового состояния динамической системы. Москва : Наука, 1988. 320 с.

15. Назин С. А., Поляк Б. Т., Топунов М. В. Подавление ограниченных внешних возмущений с помощью метода инвариантных эллипсоидов. *Автоматика и телемеханика*. 2007. № 3. С. 106–125.

16. Уткин В. И. Скользящие режимы в задачах оптимизации и управления. Москва : Наука, 1981. 368 с.

17. Емельянов С. В. Системы автоматического управления с переменной структурой. Москва : Наука, 1967. 336 с.

18. Мееров М. В. Синтез структур систем автоматического управления высокой точности. Москва : Наука, 1967. 423 с.

19. Изосимов Д. Б., Рывкин С. Е. Скользящий режим в электроприводе : препринт. Москва : Институт проблем управления, 1993. 134 с.
20. Рывкин С. Е. Скользящие режимы в задачах управления автоматическим синхронным электроприводом. Москва : Наука, 2009. 237 с.
21. Вишневикий В. И., Лазарев С. А. Адаптивный скользящий режим управления скоростью асинхронного электродвигателя. *Вестник Чувашского университета*. 2011. № 3. С. 52–59.
22. Полилов Е. В., Батрак А. М., Руднев Е. С. Практическая реализация разрывных алгоритмов в системах векторного управления синхронными электродвигателями. *Вісник Кременчуцького державного університету імені Михайла Остроградського*. 2010. Ч. 3. С. 30–36.
23. Кузнецов Б. И., Никитина Т. Б., Коломиец В. В., Хоменко В. В. Исследование влияния нелинейностей и вариации параметров объекта управления на динамические характеристики электромеханических следящих систем. *Вісник НТУ «ХПИ»*. 2015. № 12 (1121). С. 68–71.
24. Несенчук А. А., Опейко О. Ф., Однолько Д. С. Моделирование динамики и расчет робастных параметров системы управления электропривода на основе корневых портретов. *Искусственный интеллект*. 2014. № 3. С. 90–103.
25. Пересада С. М., Ковбаса С. Н., Бовкунович В. С. Грубое векторное управление моментом и потоком асинхронного двигателя. *Технічна електродинаміка*. 2010. № 1. С. 60–66.
26. Полилов Е. В., Руднев Е. С., Скорик С. П. Синтез алгоритмов робастного управления синхронным электродвигателем методами H_∞ -теории. *Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського*. 2010. № 4 (63). Ч. 3. С. 15–20.
27. Елистратов В. Д., Ильина А. Г. Робастное управление следящим электроприводом с нежестко присоединенной нагрузкой с ограничением нормы H_∞ . *Вестник АГТУ. Сер.: Морская техника и технологии*. Астрахань, 2016. № 4. С. 89–94.
28. Поляков В. Н., Ишматов З. Ш. Робастная система регулирования токов электроприводов с машиной двойного питания. *Электроприводы переменного тока (ЭППТ 2015) : труды международной шестнадцатой научно-технической конференции*. Екатеринбург, 2015. С. 89–94.
29. Никитина Т. Б., Коломиец В. В., Титарченко М. О., Хоменко В. В. Разработка и экспериментальное исследование стенда стохастической двухмассовой электромеханической системы. *Вестник НТУ «ХПИ»*. 2013. № 19 (992). С. 113–120.
30. Чайковский М. М. Синтез субоптимального анизотропийного стохастического робастного управления методами выпуклой оптимизации : автореферат дис. доктора технических наук : 05.13.01. Москва : Ин-т проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2012. 46 с.
31. Никитина Т. Б. Многокритериальный синтез робастного управления многомассовыми системами. Харьков : ХНАДУ, 2013. 432 с.
32. Кузнецов Б. И., Никитина Т. Б., Коломиец В. В., Хоменко В. В. Многокритериальный синтез стохастического робастного управления многомассовыми электромеханическими системами на основе стохастической мультигенной оптимизации. *Вестник НТУ «ХПИ»*. 2014. № 62 (1104). С. 77–86.
33. Тесленко В. А. Влияние помех на измерительные цепи. *Промышленные измерения, контроль, автоматизация, диагностика (ПиКАД)*. 2007. № 1. С. 52–56.

REFERENCES

1. Khlopenko, N. J. & Khlopenko, I. N. (2017). Structural synthesis of a stabilizing robust controller of the rotor flux linkage. *Electrical engineering & electromechanics*, 1, 21–25. doi: 10.20998/2074-272X.2017.1.04.
2. Khlopenko, I. N., Rozhkov, S. A. & Khlopenko, N. J. (2018). Stability and accuracy of the robust system for stabilizing the rotor flux-linkage of an asynchronous electric drive at random variations of the uncertain parameters within the specified boundaries. *Electrical engineering & electromechanics*, 4, 35–39. doi: 10.20998/2074-272X.2018.4.06.
3. Nikiforov V. O. (2003). *Adaptivnoe i robstnoe upravlenie s kompensatsiei vozmushchenii*. Saint Petersburg : Nauka Publ.
4. Tsykunov A. M. (2012). *Robastnoe upravlenie s kompensatsiei vozmushchenii*. Moscow : Fizmatlit Publ.
5. Tsykunov A. M. (2014). Robust tracking system with compensation of perturbations and noises. *Vestnik AGTU. Ser.: Upravlenye, vychyslytelnaia tekhnika i informatyka*, 1, 54–61.
6. Francis, B. A. & Zames, G. (1984). On H_∞ -optimal sensitivity theory for SISO feedback systems. *IEEE Trans. Automat. Control*, Vol. 29, 9–16.
7. Glover K. (1986). Robust stabilization of linear multivariable systems: relation to approximation. *Intern. J. Control*. Vol. 43, 3, 741–766.
8. Doyle, J. C., Glover, K., Khargonekar, P. P. & Francis, B. A. (1989). State-space solution to standard H_2 and H_∞ control problems. *IEEE Trans. Automat. Control*. Vol. 34, 8, 831–847.
9. Egupov N. D. (2002). *Metody robstnogo, neuro-nechetkogo i adaptivnogo upravleniia*. Moscow : Publishing House of the MSTU named after N.E. Bauman.
10. Chestnov V. N. (2015). H_∞ -approach to controller synthesis under parametric uncertainty and polyharmonic external disturbances. *Automation and Remote Control*, 6, 112–127.
11. Richard, Y., Chiang, R., Michael, G., Safonov, M. (1998). MATLAB: Robust Control Toolbox. User's Guide. Version 2. Retrieved from <http://www.mathworks.com>.
12. Balandin, D. V. & Kogan, M. M. (2007). *Sintez zakonov upravleniia na osnove lineinykh matrichnykh neravenstv*. Moscow : Nauka Publ.
13. Kurzhanskyi, A. B. (1977). *Upravlenye y nabliudenye v usloviakh neopredelennosti*. Moskva : Nauka.
14. Chernousko F. L. (1988). *Otsenyvanye fazovoho sostoiانيا dynamicheskoi systemy*. Moskva : Nauka.
15. Nazin, S. A., Poliak, B. T. & Topunov M. V. (2007). Podavlenie ogranichennykh vneshnykh vozmushchenii s pomoshch'iu metoda invariantnykh ellipsoidov. *Avtomatika i telemekhanika*, 3, 106–125.
16. Utkyn, V. Y. (1981). *Skolziashchye rezhymy v zadachakh optymyzatsyi i upravleniia*. Moskva : Nauka.
17. Emelianov, S. V. (1967). *Systemy avtomaticheskoho upravleniia s peremennoi strukturoi*. Moskva : Nauka.
18. Meerov, M. V. (1967). *Syntez struktur system avtomaticheskoho upravleniia vysokoi tochnosti*. Moskva : Nauka.
19. Izosymov, D. B. & Ryvkyn, S. E. (1993). *Skolziashchyi rezhym v elektropryvide : prepynt*. Moskva : Instytut problem upravleniia.
20. Ryvkin, S. E. (2009). *Skolziashchye rezhymy v zadachakh upravleniia avtomaticheskym synkhronnym elektropryvodom*. Moskva : Nauka.
21. Vishnevskiy, V. I., Lazarev, S. A. & Mityukov, P. V. (2011). The adaptive sliding-mode speed observer for sensorless induction motors drives. *Bulletin of the Chuvash University*, 3, 52–59.
22. Polilov, E. V., Batrak, A. M. & Rudnev, E. S. (2010). Practical implementation of algorithms in a discontinuous system of vector control synchronous motors. *Bulletin of the Kremenchuk State University n.a. Mikhail Ostrogradsky*, 3, 30–36.

23. Kuznetsov, B. Y., Nykytyna, T. B., Kolomyets, V. V. & Khomenko, V. V. (2015). Issledovanye vliyaniya nelyneinosti i varyatsyy parametrov obyektu upravleniya na dynamicheskiye kharakterystyky elektromekhanicheskyykh slediashchykh system. *Visnyk NTU «KhPI»*, 12 (1121), 68–71.

24. Nesenчук, A. A., Opeiko, O. F. & Odnolko, D. S. (2014). Dynamics simulation and calculation of robust parameters for the electric drive control system on the basis of the root locus portraits. *Artificial Intelligence*, 3, 90–103.

25. Peresada, S. M., Kovbasa, S. N. & Bovkunovich, V. S. (2010). Rough vector control torque and flux induction motor. *Tekhnichna elektrodynamika*, 1, 60–66.

26. Polilov, E. V., Rudnev, E. S., Skorik, S. P. (2010). Synthesis of robust control algorithms for a synchronous electric motor means H_∞ -theory. *Transactions of Kremenchuk Mykhaylo Ostrogradskiy State University*, 4/2010 (63), part 3, 15–20.

27. Elistratov, V. D. & Ilina, A. G. (2016). Robust control by servo drive with non-rigid load with H-infinity norm limitation. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies*, 4, 89–94.

28. Poliakov, V. N. & Ishmatov, Z. Sh. (2015). Robastnaia sistema rehulyrovaniya tokov elektropryvodov s mashynoi dvoynoho pytaniya. *Elektropryvody peremennoho toka (EPPT 2015) : trudy mezhdunarodnoi shestnadsatoi nauchno-tekhnycheskoi konferentsyy*. Ekaterynburh, 89–94.

29. Nykytyna, T. B., Kolomyets, V. V., Tytarchenko, M. O. & Khomenko V. V. (2013). Razrabotka i eksperymentalnoe issledovanye stenda stokhastycheskoi dvukhmassovoi elektromekhanicheskoi systemy. *Vestnyk NTU «KhPY»*, 19 (992), 113–120.

30. Chaikovskiy M. M. (2012). Syntez suboptimalnogo anyzotropynoho stokhastycheskoho robstnogo upravleniya metodamy vypukloi optymyzatsyy. *Extended abstract of candidate's thesis*. Moskva.

31. Nikitina T. B. (2013). *Mnogokriterial'nyj sintez robstnogo upravleniya mnogomassovymi sistemami*. Kharkiv : Kharkiv National Automobile and Highway University Publ.

32. Kuznetsov, B. Y., Nykytyna, T. B., Kolomyets, V. V. & Khomenko, V. V. (2014). Mnokryterialnyi syntez stokhastycheskoho robstnogo upravleniya mnogomassovymy elektromekhanicheskymy systemamy na osnove stokhastycheskoi multyhennoi optymyzatsyy. *Vestnyk NTU «KhPY»*, 62 (1104), 77–86.

33. Nykytyna, T. B., Kolomyets, V. V., Tytarchenko, M. O. & Khomenko, V. V. (2013). Razrabotka y eksperymentalnoe issledovanye stenda stokhastycheskoi dvukhmassovoi elektromekhanicheskoi systemy. *Vestnyk NTU «KhPY»*, 19 (992), 113–120.

34. Teslenko V. A. (2007). Vliyanye pomekh na izmerytelnye tsepy. *Promyshlennye izmereniya, kontrol, avtomatyzatsiya, dyahnostyka*, 1, 52–56.

Хлопенко М. Я., Рожков С. О., Хлопенко І. М. ФІЛЬТРАЦІЯ ПЕРЕШКОД РОБАСТНИМ РЕГУЛЯТОРОМ В СИСТЕМІ КЕРУВАННЯ ПОТОКОЗЧЕПЛЕННЯМ РОТОРА

Мета роботи полягає в теоретичному дослідженні фільтрації перешкод стабілізуючим H_∞ -субоптимальним робастним регулятором в системі керування потокозчепленням ротора асинхронного електродвигуна. Для проведення досліджень застосовувалася математична модель каналу потокозчеплення ротора системи векторного керування асинхронного електроприводу з параметричною невизначеністю. Розраховувалася передавальна функція H_∞ -субоптимального регулятора за методом мішаної чутливості. Ця передавальна функція використовувалася для побудови структурної схеми системи керування потокозчепленням з одиничним зворотним зв'язком із сумуючим пристроєм корисного сигналу та перешкоди. Проведено комп'ютерне моделювання передавальної функції H_∞ -субоптимального регулятора. Побудовано структурну схему в пакеті Simulink системи робастного керування потокозчепленням ротора з одиничним зворотним зв'язком із сумуючим пристроєм корисного сигналу та перешкоди. Отримано криві перехідних процесів потокозчеплення при різних значеннях розмахів перешкод. Проведено аналіз фільтрації перешкод робастним регулятором. Розроблено методіку фільтрації перешкод H_∞ -субоптимальним робастним регулятором в системі керування потокозчепленням ротора асинхронного електродвигуна. Методика дозволяє оцінювати точність розмаху відфільтрованих регулятором

перешкод по розрахованій кривій перехідного процесу поточкозчеплення. Результати моделювання перехідних процесів поточкозчеплення ротора підтверджують високу точність стабілізації поточкозчеплення та малу чутливість системи до перешкод при обмеженні їх розмахів до допустимих значень. Використання розробленої методики дозволяє проводити розрахунки з уточнення допусків на фільтрацію перешкод H_∞ -субоптимальним робастним регулятором в системі керування поточкозчепленням ротора асинхронного електродвигуна. Бібл.33. рис.2.

Ключові слова: робастне керування, поточкозчеплення ротора, перешкоди.

Khlopenko N. J., Rozhkov S. A., Khlopenko I. N. FILTRATION OF UNDESIRED SIGNALS BY THE ROBUST CONTROLLER IN THE ROTOR FLUX-LINKAGE CONTROL SYSTEM

Purpose. The aim of the work is to theoretically study undesired signals being filtered by a stabilizing H_∞ -suboptimal robust controller in the rotor flux-linkage control system of an asynchronous motor.

Methodology. To make the research, the mathematical model of the rotor flux-linkage channel of the vector control system of an asynchronous electric drive with parametric uncertainty has been applied. The transfer function of the H_∞ -suboptimal controller has been calculated using the mixed sensitivity method. This transfer function has been used to design a structural scheme of a flux-linkage control system with single feedback with a summing device of desired and undesired signals. **Results.** Computer simulation of the transfer function of the H_∞ -suboptimal controller has been carried out. A structural scheme of a robust control system for rotor flux-linkage with single feedback with a summing device of desired and undesired signals has been built in the Simulink application. The curves of the flux-linkage transient processes for various values of the amplitude of undesired signal have been obtained. The analysis of undesired signal filtering by a robust controller has been carried out. **Originality.** The method for filtering undesired signal by a H_∞ -suboptimal robust controller in the rotor flux-linkage control system of an asynchronous motor is developed. The method allows to evaluate the accuracy of the range of undesired signals filtered by the controller from the calculated flux-linkage transient process curve. The rotor flux-linkage transient processes simulation results prove the high accuracy of flux-linkage stabilization and the low sensitivity of the system to undesired signals while limiting their range to acceptable values. **Practical value.** The application of designed method allows to carry out calculations to clarify the tolerances for undesired signals filtering by the H_∞ -suboptimal robust controller in the rotor flux-linkage control system of an asynchronous motor.

Keywords: robust control, rotor flux-linkage, undesired signals.

© Хлопенко М. Я., Рожков С. О., Хлопенко І. М.

Статтю прийнято
до редакції 17.04.19

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

ЕПОКСИ-ПОЛІЕФІРНІ КОМПОЗИТИ З ПІДВИЩЕНИМИ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ДЛЯ РЕМОНТУ ЕЛЕМЕНТІВ СУДНОВИХ ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ

Браїло М. В., к.т.н., доцент кафедри транспортних технологій Херсонської державної морської академії, e-mail: mv.brailo@gmail.com, ORCID: 0000-0001-8167-9999;

Кобельник О. С., аспірант кафедри транспортних технологій Херсонської державної морської академії, e-mail: os.kobelnyk@gmail.com;

Сапронов О. О., т.н., доцент кафедри транспортних технологій Херсонської державної морської академії, e-mail: oo.sapronov@gmail.com, ORCID: 0000-0003-1115-6556;

Аппазов Е. С., к.т.н., доцент кафедри інноваційних технологій та технічних засобів судноводіння Херсонської державної морської академії;

Ludmila Dulebová, Ph.D., Assoc. Prof., Technical University of Kosice, Košice, Slovakia, e-mail: ludmila.dulebova@tuke.sk

У роботі розв'язана проблема вибору активної дисперсної добавки, що забезпечує поряд з технологічністю підвищення властивостей композитних матеріалів. Для забезпечення комплексу експлуатаційних характеристик композитів використано вуглецеву речовину з високими адсорбційними властивостями та гідрофобністю, яка отримана шляхом карбонізації органічних матеріалів і подальшим їх активуванням. Як основний компонент для зв'язувача при формуванні епоксидних композитів вибрано епоксидний діановий олігомер марки ЕД-20), який характеризується високою адгезійною та когезійною міцністю, незначною усадкою і технологічністю при нанесенні на поверхні складного профілю. Для зшивання епоксидних композицій використано твердник поліетиленполіамін ПЕПА, що дозволяє затверджувати матеріали при кімнатних температурах. Зшивали композити, вводячи твердник у композицію при стехіометричному співвідношенні компонентів за вмісту (мас.ч.) – епоксидний діановий олігомер ЕД-20: ортофталева ненасичена передприскорена литтєва поліефірна смола Norsodyne O 12335 AL : твердник: ПЕПА : твердник бутанокс-М50 (Vitanox-М50), що є перекисом метилетилкетону – 100 : 20 : 10 : 1. Введення добавки з високими адсорбуючими властивостями призводить до підвищення крихкості матеріалу, зменшуються показники руйнівних напружень при згинанні та ударної в'язкості. Водночас, висока питома площа часток наповнювача дозволяє сформувати структуру композитів із підвищеними показниками модуля пружності при згинанні та теплостійкості. Встановлено, що для формування композитів із підвищеними показниками модуля пружності доцільно використовувати добавку за вмісту $q = 30$ мас.ч., при цьому спостерігали максимальне зростання модуля пружності до $E = 5,7$ ГПа. Тоді, як значення показників теплостійкості (за Мартенсом) композитних матеріалів підвищується за вмісту часток активованого вугілля $q = 5 \dots 10$ мас.ч. (від $T = 335$ К до $T = 343$ К). Показано, що епокси-поліефірну матрицю із оптимальним вмістом часток активованого вугілля можливо використовувати у вузлах тертя за рахунок пористої структури.

Ключові слова: активність наповнювача, композит, модуль пружності, руйнівні напруження при згинанні, ударна в'язкість, теплостійкість.

DOI: 10.33815/2313-4763.2019.1.20.134-140

Постановка проблеми. В процесі експлуатації суднових транспортних засобів основним є їх безперебійна, надійна робота, яка залежить від технічного стану кожного окремого елемента всього судна. Важливу частину систем на судні займають теплообмінні апарати, що забезпечують відведення тепла від енергетичної установки і втримувати тепловий режим роботи двигуна внутрішнього згорання. Водночас елементи теплових апаратів працюють в умовах впливу агресивного середовища і постійної зміни температури. Це призводить до виникнення пошкоджень, зниження продуктивності і виходу з ладу. Важливим є можливість відновлення робочих елементів теплообмінників на судні в процесі експлуатації. Актуальним у даному напрямку є використання полімерних композитних матеріалів з прогнозованими властивостями. Водночас до полімерів висуваються високі фізико-механічні і теплофізичні вимоги. Тому актуальним є розробка полімерних матеріалів з поліпшеними експлуатаційними властивостями. В даному

напрямку перспективним є використання полімерів на основі поліефірних і епоксидних смол. Наповнення епоксидного та поліефірного зв'язувачів різними за формою і природою дрібнодисперсними добавками є одним із способів забезпечення композитних матеріалів (КМ) прогнозованими технологічними та експлуатаційними характеристиками [1–6]. Основною проблемою при формуванні КМ є вибір активних наповнювачів із розвиненою поверхнею. Введення таких добавок у епоксидний зв'язувач дозволяє змінювати структуру полімеру в поверхневих шарах і у його об'ємі, а це у свою чергу забезпечує поліпшення як технологічних, так і експлуатаційних характеристик розроблених матеріалів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз наукових праць [6–10] дозволяє констатувати, що актуальним при розробленні покриттів чи епоксидних композитів є вибір наповнювача, що може виконувати функцію гідрофобної та антиагломеруючої добавки. Це дозволяє забезпечувати матеріали поряд з високими механічними характеристиками водонепроникненість КМ, а отже стійкість матеріалів до різних зовнішніх факторів (вологість, вплив агресивних середовищ). Так у праці [7] показано, що використання стеарату кальцію за вмісту $q = 10 \dots 20$ мас.ч. на 100 мас.ч. епоксидного олігомера ЕД-20 і 10 мас.ч. твердника ПЕПА забезпечує формування матеріалу з руйнівними напруженнями при згинанні $\sigma_{z2} = 72,0$ МПа та модулем пружності при згинанні $E = 4,1$ ГПа. У даному випадку зростання механічних характеристик пов'язано з впливом стеаринової кислоти аліфатичного ряду, що входить у склад дисперсної добавки та забезпечує поряд із зменшенням водонепроникності високу пружність. Таким чином, можна стверджувати, що актуальним є вибір активних наповнювачів при формуванні композитів функціонального призначення.

Мета роботи – розробити епокси-поліефірні композити з підвищеними експлуатаційними характеристиками для ремонту елементів суднових технічних засобів.

Матеріали та методика дослідження. З метою формування матриці для КМ з поліпшеними фізико-механічними та теплофізичними властивостями використовували наступні компоненти.

1. Основним компонентом зв'язувача вибрано низькомолекулярний епоксидний діановий олігомер марки ЕД-20 ($q = 100$ мас.ч.). Слід зазначити, що молекули епоксидних олігомерів містять гліцидилові та епоксидні групи, які здатні, взаємодіючи з твердником, формувати зшити структуру в матеріалах у вигляді сітки.

2. Ортофталева ненасичена передприскорена литтєва поліефірна смола Norsodyne O 12335 AL ($q = 20$ мас.ч. на 100 мас.ч. епоксидного олігомеру ЕД-20).

3. Твердник холодного тверднення епоксидних смол поліетиленполіамін (ПЕПА) (ТУ 6-05-241-202-78) (10 мас.ч. на 100 мас.ч. ЕД-20).

4. Твердник для поліефірних смол – Бутанокс-М50 (Butanox-M50), що є перекисом метилетилкетону (МЕКП) ($q = 1$ мас.ч. на 100 мас.ч. поліефірної смоли Norsodyne O 12335).

5. Активоване вугілля (дисперсність $d = 5 \dots 10$ мкм) – пориста вуглецева речовина з високими адсорбційними властивостями та гідрофобністю, яка отримана шляхом карбонізації органічних матеріалів і подальшим їх активуванням. Містить значну кількість пор і тому має дуже велику питому площу поверхні, унаслідок чого має високу адсорбцію. Вміст добавки змінювали у межах $q = 5 \dots 60$ мас.ч. на 100 мас.ч. епоксидного олігомеру марки ЕД-20.

У роботі досліджено наступні фізико-механічні властивості: модуль пружності, руйнівні напруження при згинанні та ударна в'язкість; теплофізичні: теплостійкість (за Мартенсом).

Руйнівні напруження і модуль пружності при згинанні визначали згідно ГОСТ 4648-71 і ГОСТ 9550-81 відповідно. Параметри зразків: довжина – $l = 120 \pm 2$ мм, ширина – $b = 15 \pm 0,5$ мм, висота – $h = 10 \pm 0,5$ мм.

Ударну в'язкість визначали за допомогою маятникового копра згідно методу Шарпі (ГОСТ 4647-80). Визначали робочий кут відхилення маятника після руйнування зразка при

наперед заданому початковому куті підйому робочого тіла установки. Дослідження проводили за температури $T = 298 \pm 2$ К і відносній вологості $d = 50 \pm 5$ %. Використовували зразки з розміром: $l \times b \times h = (65 \times 12 \times 12) \pm 0,5$ мм.

Теплостійкість (за Мартенсом) КМ визначали згідно ГОСТ 21341-75. Методика дослідження полягає у визначенні температури, при якій досліджуваний зразок нагрівали зі швидкістю $v = 3$ К/хв під дією постійного згинаючого навантаження $F = 5 \pm 0,5$ МПа, внаслідок чого він деформується на задану величину ($h = 6$ мм).

Епокси-поліефірні композити з дисперсним наповнювачем формували за такою технологією з виконанням температурно-часових режимів: попереднє дозування епоксидної діанової смоли ЕД-20 та поліефірної смоли Norsodyne O 12335 AL; дозування наповнювача та подальше введення його в зв'язувач; гідродинамічне суміщення епокси-поліефірної композиції впродовж часу $t = 5 \pm 0,1$ хв; введення твердника ПЕПА і Butanox-M50 та перемішування композиції впродовж часу $t = 5 \pm 0,1$ хв. Надалі затверджували КМ за експериментально встановленим режимом: формування зразків та їх витримання впродовж часу $t = 12,0 \pm 0,1$ год за температури $T = 293 \pm 2$ К, нагрівання зі швидкістю $v = 3$ К/хв до температури $T = 393 \pm 2$ К, витримання КМ впродовж часу $t = 2,0 \pm 0,05$ год, повільне охолодження до температури $T = 293 \pm 2$ К. З метою стабілізації структурних процесів у КМ зразки витримували впродовж часу $t = 24$ год на повітрі за температури $T = 293 \pm 2$ К з наступним проведенням експериментальних випробувань.

Результати досліджень та їх обговорення. На початковому етапі досліджували руйнівні напруження та модуль пружності при згинанні, і ударну в'язкість епокси-поліефірного матеріалу наповненого частками активованого вугілля. При введенні дисперсної добавки спостерігали зниження показників руйнівних напружень при згинанні та ударної в'язкості. За вмісту $q = 5 \dots 15$ мас.ч. активованого вугілля значення руйнівних напружень при згинанні (рис.1, крива 1) зменшуються від $\sigma_{32} = 50,4$ МПа (для епокси-поліефірної матриці) до $\sigma_{32} = 34,7 \dots 35,4$ МПа. Подальше введення часток активованого вугілля призводить до різкого зниження значень руйнівних напружень при згинання до $\sigma_{32} = 22,9 \dots 28,0$ МПа за вмісту $q = 20 \dots 30$ мас.ч і за критичного вмісту $q = 50$ мас.ч. становить $\sigma_{32} = 4,8$ МПа. Слід зазначити, що максимально можливе наповнення епокси-поліефірного зв'язувача без застосування додаткових умов становило $q = 50$ мас.ч. Введення наповнювача понад 50 мас.ч. не забезпечує достатнього змочування часток активованого вугілля зв'язувачем і, як наслідок, зшивання матеріалу проходить із значними дефектами у його структурі при отвердженні. Це обумовлено тим, що даний наповнювач характеризується високими адсорбційними властивостями, оскільки має значну кількість пор і відрізняється значною питомою площею поверхні. Активне адсорбування зв'язувача частками вугілля призводить до зниження показників фізико-механічних властивостей сформованого матеріалу. Зокрема, показники ударної в'язкості композиту знижуються вже за незначного вмісту добавки. За вмісту $q = 5$ мас.ч. значення зменшується від $W = 8,3$ кДж/м² (для матриці) до $W = 3,3$ кДж/м². Подальше введення наповнювача від $q = 10$ мас.ч. до $q = 50$ мас.ч. призводить до зниження показників ударної в'язкості до $W = 2,1 \dots 2,5$ кДж/м². Отже, монотонне зниження показників ударної в'язкості при введенні пористої добавки опосередковано свідчить, що такі матеріали характеризуються значною крихкістю. На перший погляд це вказує на недолік, а саме незначну механічну міцність. Водночас, значна пористість добавки може забезпечувати і пористість самого матеріалу, що є вагомим при використанні таких КМ у вузлах тертя. Так як матеріал може бути пористим, перспективним є подача чи наповнення КМ мастильним матеріалом, що дозволить забезпечити зниження коефіцієнту тертя. Тобто, не зважаючи на зниження ударної в'язкості і руйнівних напружень при згинанні КМ доцільно провести дослідження впливу активованого вугілля на модуль пружності при згинанні.

Отже, аналізуючи отримані результати модуля пружності при згинанні композитного матеріалу (рис. 1, крива 2) помітно, що показники підвищуються за вмісту $q = 5 \dots 30$ мас.ч. порівняно з матрицею. Зокрема, за вмісту до $q = 5$ мас.ч. значення підвищується від $E = 3,6$ ГПа (для матриці) до $E = 4,6$ ГПа і за вмісту $q = 30$ мас.ч. становить

$E = 5,7$ ГПа. Очевидно, що значна кількість пор, а відповідно висока питома площа поверхні наповнювача дозволяє підвищити пружні властивості сформованого композиту.

Слід зауважити, що область пружних деформацій при згинанні КМ є незначною, оскільки супроводжується подальшим його руйнуванням при незначних навантаженнях (рис. 1, крива 1). Отже, отримані високі показники пружності ($E = 5,7$ ГПа) розроблених КМ дозволяють стверджувати, що використання таких матеріалів є актуальним, але потребує поглибленого дослідження. Тобто, такі матеріали необхідно посилювати або армуючими добавками (волокна), або модифікуючими добавками (модифікатори, пластифікатори), що дозволить забезпечити комплекс поліпшених властивостей. Це у свою чергу, дозволить використовувати такі КМ у різних умовах експлуатації, зокрема і у вузлах тертя.

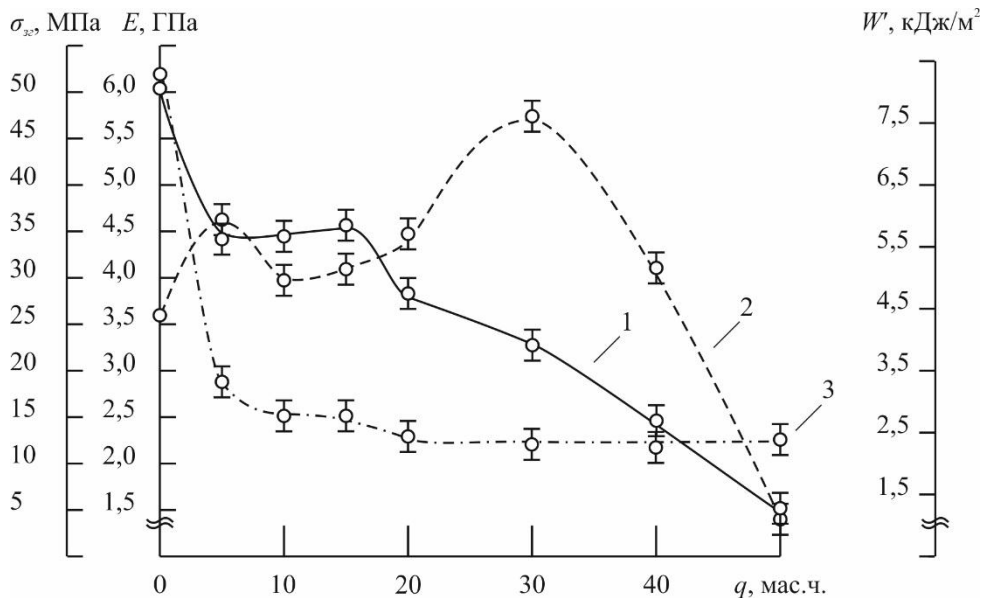


Рисунок 1 – Вплив вмісту часток активованого вугілля на фізико-механічні властивості епоксиполіефірної матриці: 1 – руйнівне напруження при згинанні ($\sigma_{зг}$); 2 – модуль пружності при згинанні (E); 3 – ударна в'язкість (W')

На наступному етапі досліджували вплив вмісту часток активованого вугілля на теплостійкість композитного матеріалу (за Мартенсом). Встановлено, що введення активованого вугілля в діапазоні $q = 5 \dots 10$ мас.ч. приводить до підвищення показників теплостійкості від $T = 335$ К (для епоксиполіефірної матриці) до $T = 343$ К. Збільшення вмісту понад $q = 10$ мас.ч. наповнювача призводить до зниження теплостійкості матеріалу. За вмісту $q = 15$ мас.ч. значення становить $T = 343$ К і поступово знижується пропорційно введенню часток наповнювача до $T = 326$ К за критичного вмісту $q = 50$ мас.ч.

Отже, при дослідженні фізико-механічних та теплофізичних властивостей епоксиполіефірного композитного матеріалу наповненого частками активованого вугілля встановлено, що введення добавки з високими адсорбуючими властивостями призводить до підвищення крихкості матеріалу – зменшуються показники руйнівних напружень при згинанні та ударної в'язкості. Водночас, слід зазначити, що висока питома площа часток наповнювача дозволяє сформувати КМ із підвищеними показниками модуля пружності при згинанні (за вмісту $q = 5 \dots 30$ мас.ч.) та теплостійкості КМ (за вмісту $q = 5 \dots 10$ мас.ч.).

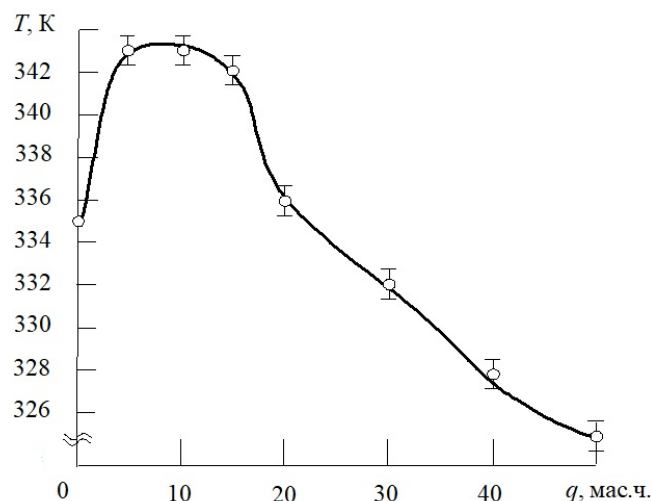


Рисунок 2 – Вплив вмісту часток активованого вугілля на теплостійкість (за Мартенсом) епокси-поліефірної матриці

На основі експериментальних досліджень встановлено, що використовувати даний композит, як покриття, або, як конструкційний матеріал, на який будуть діяти статичні, динамічні, або ударні навантаження не є доцільним. Водночас, наповнювач активоване вугілля можливо використовувати у епокси-поліефірній матриці при створенні багатокомпонентного полімерного матеріалу для підвищення показників модуля пружності при згинанні та теплостійкості (за Мартенсом) у комплексі із добавками, які впливають на стійкість матеріалу до навантажень. Додатково, пориста структура таких КМ потребує поглибленого дослідження, позаяк існує ймовірність використання розроблених матеріалів у вузлах тертя.

Висновки. За результатами експериментальних досліджень фізико-механічних та теплофізичних властивостей епокси-поліефірних матеріалів за різного вмісту часток активованого вугілля можна констатувати наступне:

1. Встановлено, що введення часток активованого вугілля у епокси-поліефірну матрицю забезпечує підвищення модуля пружності при згинанні і теплостійкості за Мартенсом композитних матеріалів. Доведено, що введення добавки за вмісту $q = 30$ мас.ч. забезпечує підвищення модуля пружності розроблених матеріалів від $E = 3,6$ ГПа (для епокси-поліефірної матриці) до $E = 5,7$ ГПа.

2. Проаналізовано, що значення показників теплостійкості (за Мартенсом) композитних матеріалів підвищується за вмісту часток активованого вугілля $q = 5 \dots 10$ мас.ч. від $T = 335$ К (для епокси-поліефірної матриці) до $T = 343$ К.

Враховуючи, що теплообмінники на судні працюють в умовах впливу температур, то показники теплостійкості матеріалів для відновлення їх технічного стану є пріоритетними. Тому, розроблений багатокомпонентний композитний матеріал з прогнозованими властивостями, на основі епокси-поліефірної матриці із оптимальним вмістом часток активованого вугілля, можливо використовувати при відновленні технічного стану судових теплообмінних апаратів. Також можливе використання розроблених матеріалів у вузлах тертя.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Кербер М. Л. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология: учеб. пособие / Кербер М. Л., Виноградов В. М., Головкин Г. С. и др. ; под ред. Берлина А. А. СПб.: Профессия, 2008. 560 с.

2. Buketov A. V., Sapronov O. O., Brailo M. V., Maruschak P. O., Yakushchenko S. V., Panin S. V., Nigalatiy V. D. Dynamics of destruction of epoxy composites filled with ultra-dispersed diamond under impact conditions. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*. 2018. DOI: 10.1080/15376494.2018.1495788.

3. Buketov A., Brailo M., Yakushchenko S., Sapronova A. Development of Epoxy-Polyester Composite with Improved Thermophysical Properties for Restoration of Details of Sea and River Transport. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2018. Article ID 6378782.
4. Duleba B. et al. Possibility of Increasing the Mechanical Strength of Carbon. *Epoxy Composites by Addition of Carbon Nanotubes, Materials Science Forum*. 2015. Vol. 818, P. 299–302.
5. Букетов А. В., Сапронов О. О., Алексенко В. Л. Епоксидні нанокompозити: монографія. Херсон : ХДМА, 2015. 184 с.
6. Salom C., Prolongo M. G., Toribio A., Martínez-Martínez A. J., Aguirre Cárcer I., Prolongo S. G. Mechanical properties and adhesive behavior of epoxy-graphene nanocomposites. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 2017.
7. Лещенко О. В. Дослідження впливу структурно-активної добавки на властивості епоксидних композитів. *Наукові нотатки*. Луцьк : ЛНТУ, 2018. Випуск 63. С. 114–122.
8. Abouzahr S., Wilkes G. L. Structure property studies of polyester- and polyether-based MDI–BD segmented polyurethanes: Effect of one- vs. two-stage polymerization conditions. *J. Appl. Polym. Sci.* 1984. Vol. 29. Issue 9. P. 2695–2711.
9. Букетов А. В., Браїло М. В., Кобельник О. С., Акімов О. В. Трибологічні властивості епоксикompозитів, наповнених дисперсними частинками і термопластами. *Фізико-хімічна механіка матеріалів*. 2016. №1. С. 28–35.
10. Buketov A. V., Brailo M. V., Kobel'nyk O. S., Akimov O. V. Tribological properties of the epoxy composites filled with dispersed particles and thermoplastics. *Materials Science*. 2016. Vol. 52, Number 1. P. 25–32.

REFERENCES

1. Kerber M. L., Vinogradov V. M., Golovkin G. S. i dr. ; Berlina A. A. (Ed.) (2008). *Polimerniye kompozitsionniye materialih: struktura, svoystva, tekhnologiya*. SPb.: Professiya.
2. Buketov, A. V., Sapronov, O. O., Brailo, M. V., Maruschak, P. O., Yakushchenko, S. V., Panin, S. V. & Nigalatiy V. D. (2018). Dynamics of destruction of epoxy composites filled with ultra-dispersed diamond under impact conditions. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*. DOI: 10.1080/15376494.2018.1495788.
3. Buketov, A., Brailo, M., Yakushchenko, S. & Sapronova A. (2018). Development of Epoxy-Polyester Composite with Improved Thermophysical Properties for Restoration of Details of Sea and River Transport. *Advances in Materials Science and Engineering*. Article ID 6378782.
4. Duleba, B. et al. (2015). Possibility of Increasing the Mechanical Strength of Carbon. *Epoxy Composites by Addition of Carbon Nanotubes, Materials Science Forum, Vol. 818*, 299–302.
5. Buketov, A. V., Sapronov, O. O. & Aleksenko, V. L. (2015). *Epoksidni nanokompозити: monografiya*. Kherson : KhDMA.
6. Salom, C., Prolongo, M. G., Toribio, A., Martínez-Martínez, A. J., Aguirre Cárcer I., Prolongo S. G. (2017). Mechanical properties and adhesive behavior of epoxy-graphene nanocomposites. *International Journal of Adhesion and Adhesives*.
7. Leshchenko, O. V. (2018). Doslidzhennia vplyvu strukturno-aktyvnoi dobavky na vlastyivosti epoksydnykh kompozitiv. *Naukovi notatky*. Lutsk : LNTU. 63, 114–122.
8. Abouzahr, S., Wilkes G. L. (1984). Structure property studies of polyester- and polyether-based MDI–BD segmented polyurethanes: Effect of one- vs. two-stage polymerization conditions. *J. Appl. Polym. Sci., Vol. 29, Issue 9*, 2695–2711.
9. Buketov, A. V., Brailo, M. V., Kobelnyk, O. S. & Akimov, O. V. (2016). Trybolohichni vlastyivosti epoksykompozitiv, napovnenykh dyspersnymy chastynkamy i termoplastamy. *Fizyko-khimichna mekhanika materialiv, 1*, 28–35.
10. Buketov, A. V., Brailo, M. V., Kobel'nyk, O. S. & Akimov O. V. (2016). Tribological properties of the epoxy composites filled with dispersed particles and thermoplastics. *Materials Science, Vol. 52, Number 1*, 25–32.

Браило Н. В., Кобельник О. С., Сапронов А. А., Аппазов Э. С., Ludmila Dulebová ЭПОКСИ-ПОЛИЭФИРНЫЕ КОМПОЗИТЫ С ПОВЫШЕННЫМИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ДЛЯ РЕМОНТА ЭЛЕМЕНТОВ СУДОВЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ

В работе решена проблема выбора активной дисперсной добавки, которая обеспечивает наряду с технологичностью повышение свойств композитных материалов. Для обеспечения комплекса эксплуатационных характеристик композитов использовано углеродное вещество с высокими адсорбционными свойствами и гидрофобностью, полученной путем карбонизации органических материалов и последующим их активированием. В качестве основного компонента для связующего при формировании эпоксидных композитов выбрано эпоксидный диановый олигомер марки ЭД-20, который характеризуется высокой адгезионной и когезионной прочностью, незначительной усадкой и технологичностью при нанесении на поверхности сложного профиля. Для сшивания эпоксидных композиций использовано отвердитель полиэтиленполиамин ПЭПА, что позволяет отверждать материалы при комнатных температурах. Сшивали композиты, вводя отвердитель в композицию при стехиометрическом соотношении компонентов при содержании (масс.ч.) - эпоксидный диановый олигомер ЭД-20: ортофталевая ненасыщенная передприскоренная литьевая полиэфирная смола Norsodyne O 12335 AL: отвердитель ПЭПА: отвердитель бутанокс-М50 (Butanox-M50), что является перекисью метилэтилкетона – 100 : 20 : 10 : 1. Введение добавки с высокими адсорбирующими свойствами приводит к повышению хрупкости материала, уменьшаются показатели разрушающих напряжений при сгибании и ударной вязкости. В то же время, высокая удельная площадь частиц наполнителя позволяет сформировать структуру композита с повышенными показателями модуля упругости при изгибе и теплостойкости. Установлено, что для формирования композитов с повышенными показателями модуля упругости целесообразно использовать добавку за содержания $q = 30$ масс.ч., при этом наблюдали максимальный рост модуля упругости до $E = 5,7$ ГПа. Тогда, как значения показателей теплостойкости (по Мартенсу) композитных материалов повышается при содержании частиц активированного угля $q = 5...10$ масс.ч. (от $T = 335$ К до $T = 343$ К). Показано, что эпокси-полиэфирную матрицу с оптимальным содержанием частиц активированного угля можно использовать в узлах трения за счет пористой структуры.

Ключевые слова: *активность наполнителя, композит, модуль упругости, разрушительные напряжения при изгибе, ударная вязкость, теплостойкость.*

Brailo M. V., Kobelnik O. S., Sapronov O. O., Appazov E. S., Ludmila Dulebová STRESS-RELATED AND HEAT-TRANSFER PROPERTIES OF EPOXY-POLYESTER COMPOSITES FILLED WITH ACTIVATED CARBON

The current study has solved the problem of reactive dispersed additive match, which provides, along with manufacturability, improved properties of composite materials. To ensure a set of operational characteristics of the composites, the carbon substance with high adsorption properties and hydrophobicity was used. The latter was obtained by carbonization of organic materials and their subsequent activation. ED-20 epoxy diane oligomer has been selected to be the main component for the binder during epoxy composites formation. ED-20 epoxy diane oligomer possesses high adhesive and cohesive strength, slight shrinkage and manufacturability when applied to the intricate shape surface. PEPA polyethylene polyamine hardener was used for crosslinking of epoxy compositions, which allows materials to be hardened at room temperature. The composites were crosslinked by introducing the hardener into a composition at stoichiometric ratio of components at the content (parts by weight) - ED-20 epoxy diane oligomer: Norsodyne O 12335 AL orthophthalic unsaturated pre-accelerated polyester resin: PEPA hardener: Butanox-M50 hardener (Butaneox-M50) which is methyl ethyl ketone peroxide – 100 : 20 : 10 : 1. The introduction of additives with high adsorbing properties leads to material embrittlement; the indicators of fracture stresses during bending and impact strength have been reduced. At the same time, the high specific filler particles area enables formation of a composite structure with increased elasticity modulus during bending and heat resistance. It was found that for composites formation with increased indicators of elasticity modulus, it is advisable to use an additive at the content $q = 30$ pts.wt., while the maximum increase in elasticity modulus up to $E = 5.7$ GPa was observed. But, the indicator values of heat resistance (according to Martens) of composite materials increase at the content of activated carbon particles $q = 5...10$ pts.wt. (from $T = 335$ K to $T = 343$ K). It is shown that an epoxy-polyester matrix with an optimal content of activated carbon particles can be used in friction units due to its porous structure.

Keywords: *filler activity, composite, elasticity modulus, fracture stresses at bending, impact strength, heat resistance.*

© Браило М. В., Кобельник О. С., Сапронов О. О., Аппазов Е. С., Ludmila Dulebová

Статтю прийнято
до редакції 28.02.19

ВПЛИВ ВМІСТУ ОРГАНІЧНИХ ВОЛОКОН В ЕПОКСИДНОМУ ЗВ'ЯЗУВАЧІ НА ПОКАЗНИКИ АДГЕЗІЙНОЇ ТА КОГЕЗІЙНОЇ МІЦНОСТІ ПОКРИТТІВ ТРАНСПОРТНОЇ ТЕХНІКИ

Сапронова А. В., аспірант кафедри транспортних технологій Херсонської державної морської академії, e-mail: super.ane4ka2011@yandex.ua; ORCID: 0000-0002-4327-4293

У роботі розглянуто вплив вмісту суміші дискретних органічних волокон, що містить 50 % шовку, 45 % акрилу, 5 % поліаміду, на особливості структуроутворення епоксидних композитів для забезпечення необхідного комплексу властивостей деталей транспортної техніки. Як основний компонент для зв'язувача при формуванні епоксидних композитів вибрано епоксидний діановий олігомер марки ЕД-20. Для зшивання епоксидних композицій використано твердник поліетиленполіамін ПЕПА, що дозволяє затверджувати матеріали при кімнатних температурах. Проведено дослідження поверхні волокнистої добавки методом ІЧ-спектрального аналізу. Встановлено коливання: С-N груп у діапазоні хвильових чисел $\nu = 1068 \dots 1122 \text{ см}^{-1}$; амідної групи при хвильовому числі $\nu = 1253 \text{ см}^{-1}$; нітрильної групи при хвильовому числі $\nu = 2239 \text{ см}^{-1}$; карбонільної С=О групи при хвильовому числі $\nu = 2362 \text{ см}^{-1}$; валентні коливання -ОН, -NH- груп при хвильовому числі $\nu = 3410 \text{ см}^{-1}$. У роботі подано результати дослідження адгезійної міцності при відриві та зсуві й аналіз поверхні руйнування адгезійного з'єднання. Показано, що максимальним значенням адгезійної міцності характеризуються матеріали, де переважає когезійний характер руйнування адгезійного з'єднання. Забезпечення в'язкого характеру руйнування, шляхом регульованого введення суміші дискретних органічних волокон дозволяє підвищувати механічну міцність розроблених матеріалів.

Ключові слова: епоксидний зв'язувач, суміш дискретних органічних волокон, адгезійна міцність, поверхня руйнування, характер руйнування, ІЧ-спектральний аналіз.

DOI: 10.33815/2313-4763.2019.1.20.141-150

Постановка проблеми. При формуванні наповнених волокнистими добавками захисних покриттів, основною проблемою є забезпечення високого ступеня змочування, що безпосередньо впливає на міжфазову взаємодію «олігомер-волокно» і як наслідок на експлуатаційні характеристики сформованих полімерів. Вирішенням цієї проблеми можливо декількома способами. Серед них є використання поверхнево-активних речовин (активаторів, модифікаторів) [1–4], які знижують поверхневий натяг олігомера, що забезпечує значну міжфазову взаємодію зв'язувача з активними центрами на поверхні волокон. Водночас, аналіз праць [5–7], дозволяє констатувати, що застосування технологічного режиму формування композитного матеріалу з використанням ультразвукового диспергування є не менш ефективним способом. Це дозволяє забезпечити високий ступінь змочування волокна та його рівномірний розподіл у об'ємі зв'язувача.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Суттєвого поліпшення властивостей полімерів чи покриттів на їх основі досягають шляхом зміцнення матриці добавками різної фізико-хімічної природи. Аналіз наукових праць [8–10] дозволяє констатувати, що раціональним є вибір наповнювача, що є відходом від промисловості. Це дозволяє знизити вартість кінцевих виробів при достатньо високих механічних характеристиках. Так у праці [11] показано, що введення дисперсних часток конвертерного шламу дисперсністю $d = 60 \dots 63 \text{ мкм}$ за вмісту $q = 40 \text{ мас.ч.}$ забезпечує зростання адгезійної міцності при відриві з $\sigma_a = 24,4 \text{ МПа}$ до $\sigma_a = 52,83 \text{ МПа}$, адгезійної міцності при зсуві з $\tau = 9,0 \text{ МПа}$ до $\tau = 12,7 \text{ МПа}$. Введення часток гранульованого шлаку [12] у епоксидний зв'язувач дисперсністю 80 мкм за вмістом $q = 40 \text{ мас.ч.}$ забезпечує зростання руйнівних напружень при згинанні з $\sigma_{32} = 48,0 \text{ МПа}$, до $\sigma_{32} = 55,0 \text{ МПа}$. Водночас, актуальним є дослідження впливу волокнистих добавок, які також можуть бути відходами промисловості. Аналіз фізичних властивостей акрилових волокон дозволяє констатувати, що вони забезпечують стійкість до атмосферного впливу, старінню, підвищують теплостійкість. Тоді, як волокна шовку забезпечують еластичність. Припускали, що в комплексі суміш дискретних волокон

дозволить забезпечити комплекс механічних характеристик за рахунок так званої армуючої дії.

Мета роботи – дослідження особливостей впливу волокнистого наповнювача у епоксидному зв'язувачі на процеси структуроутворення і властивості захисних покриттів.

Методика дослідження. Основним компонентом для зв'язувача при формуванні КМ вибрано епоксидний діановий олігомер марки ЕД-20 (ГОСТ 10587-84), який характеризується комплексом покращених властивостей [5-7] порівняно з іншими відомими реактопластами.

Для зшивання епоксидних композицій використовували твердник поліетиленполіамін (ПЕПА) (ТУ 6-05-241-202-78), який дозволяє зшивати матеріали при кімнатних температурах.

Як наповнювач використовували суміш дискретних органічних волокон: СДОВ (шовк – 50 %, акрил – 45 %, поліамід – 5 %) з параметрами $l = 9 \dots 15$ мм, $d = 18 \dots 25$ мкм.

Епоксидний композит, формували за такою технологією: попереднє дозування епоксидної діанової смоли ЕД-20, підігрівання смоли до температури $T = (353 \pm 2)$ К і їх витримка при цій температурі впродовж часу $\tau = (20 \pm 0,1)$ хв; дозування СДОВ і подальше введення у епоксидний зв'язувач; гідродинамічне поєднання олігомеру ЕД-20 і нанонаповнювача впродовж часу $\tau = (1 \pm 0,1)$ хв; ультразвукова обробка композицій впродовж часу $\tau = (1,5 \pm 0,1)$ хв; охолодження композицій до кімнатної температури впродовж часу $\tau = (60 \pm 5)$ хв; введення твердника ПЕПА і перемішування композицій впродовж часу $\tau = (5 \pm 0,1)$ хв. Потім проводили полімеризацію КМ за експериментально встановленим режимом: формування зразків і їх витримка впродовж часу $\tau = (12,0 \pm 0,1)$ год за температури $T = (293 \pm 2)$ К, нагрівання зі швидкістю $v = 3$ К/хв до температури $T = (393 \pm 2)$ К, витримка КМ впродовж часу $\tau = (2,0 \pm 0,05)$ год, повільне охолодження до температури $T = (293 \pm 2)$ К. З метою стабілізації структурних процесів перед проведенням випробувань зразки з КМ витримували впродовж $\tau = 24$ год на повітрі за температури $T = (293 \pm 2)$ К.

У роботі досліджували наступні властивості КМ: адгезійна міцність при відриві і зсуві, залишкові напруження, руйнівні напруження та модуль пружності при згинанні.

Адгезійну міцність матриці до металевої основи досліджували, вимірюючи руйнівне напруження («метод грибків») при рівномірному відриві пари склеєних зразків згідно ГОСТу 14760-69. Вимірювали силу відривання клейових з'єднань сталейних зразків на автоматизованій розривній машині УМ-5 при швидкості навантаження $v = 10$ Н/с. Діаметр робочої частини сталейних зразків при відриві становив – $d = 25$ мм.

Залишкові напруження у матриці визначали консольним методом [13]. Покриття товщиною $\delta = 0,3 \dots 0,5$ мм формували на сталейній основі. Параметри основи: загальна довжина – $l = 100$ мм; робоча довжина – $l_0 = 80$ мм, товщина – $\delta = 0,3$ мм.

Руйнівні напруження і модуль пружності при згинанні визначали згідно ГОСТу 4648-71 і ГОСТу 9550-81 відповідно. Параметри зразків: довжина $l = 120 \pm 2$ мм, ширина $b = 15 \pm 0,5$ мм, висота $h = 10 \pm 0,5$ мм.

Відхилення значень при дослідженні показників адгезійних і фізико-механічних властивостей КМ становило 4...6 % від номінального.

Для дослідження хімічних зв'язків у наповнювачі використовували ІЧ-спектральний аналіз. ІЧ-спектри реєстрували на спектрофотометрі марки «IRAffinity-1» (Японія) у ділянці хвильових чисел $\nu = 400 \dots 2400$ см^{-1} однопроменевим методом у відбитому світлі. Розгортку спектру за хвильовими числами $\lambda^{-1} = \nu$ здійснювали на діаграмі в межах 225 мм у діапазоні вибраних частот. Хвильові числа, інтенсивність пропускання, напівширину і площу смуги поглинання визначали за допомогою комп'ютерної програми IRsolution. Похибка при визначенні хвильового числа $-\nu = \pm 0,01$ см^{-1} , а при визначенні точності розташування піку – $\nu = \pm 0,125$ см^{-1} . Фотометрична точність становила $\pm 0,2$ % при програмному управлінні щільною і тривалістю інтегрування – $t = 10$ с. Крок інтегрування – $\Delta\lambda = 4$ см^{-1} .

Дослідження структури (топології) матеріалів проводили на металографічному мікроскопі моделі XJL-17AT, який обладнаний камерою Levenhuk C310 NG (3,2 Mega Pixels). Діапазон збільшення зображення від 100 до 1600 разів. Для обробки цифрових зображень використовували програмне забезпечення «Levenhuk TourView».

Експериментальні результати дослідження. У роботі попередньо визначали хімічну активність СДОВ, тобто наявність активних груп у структурі і на поверхні методом ІЧ-спектрального аналізу. Згідно ІЧ-спектрального аналізу (рис. 1, табл. 1) зареєстровані смуги поглинання, що характеризують коливання активних груп СДОВ.

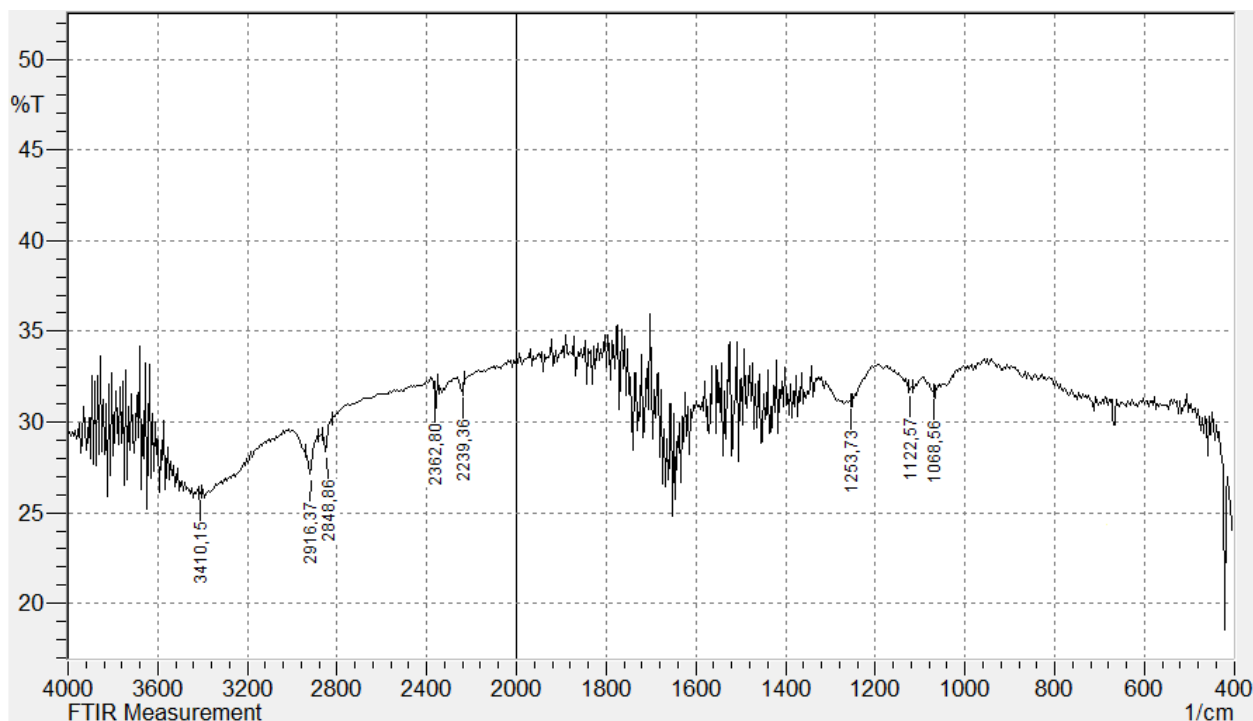


Рисунок 1 – Спектр суміші дискретних органічних волокон в області хвильових чисел $\nu = 467 \dots 3410 \text{ cm}^{-1}$

Таблиця 1 – Характеристичні смуги поглинання згідно ІЧ-спектру суміші дискретних органічних волокон

№ п/п	Хвильове число, ν , cm^{-1}	Групи, що відповідають характеристичним смугам поглинання	Інтенсивність пропускання, T , %	Відносна площа смуги поглинання, S , %
1	1068	C-N коливання	31,6	21,7
2	1122	C-N коливання	31,7	21,4
3	1253	Амідна група $-\text{NH}_2$	31,0	40,4
4	2239	$\text{C}\equiv\text{N}$ коливання нітрильної групи,	31,7	14,7
5	2362	Карбонільна $\text{C}=\text{O}$ група	31,4	16,1
6	2848	CH_2 асиметричні коливання	28,3	20,5
7	2916	CH_2 асиметричні коливання	27,1	29,6
8	3410	$-\text{OH}$, $-\text{NH}$ - валентні коливання	26,0	87,5

Отже, ІЧ-спектральний аналіз дозволив виявити значну кількість активних груп на поверхні СДОВ, здатних взаємодіяти з макромолекулами епоксидного зв'язувача, утворюючи просторову сітку полімеру з високим ступенем зшивання.

Надалі досліджували вплив вмісту СДОВ на адгезійну міцність при відриві (σ_a), зсуві (τ) і залишкові напруження (σ_z) у КМ. Встановлено, що введення у епоксидний олігомер ЕД-20 часток СДОВ за вмісту $q = 0,010 \dots 0,020 \text{ мас.ч.}$ приводить до зростання адгезійної міцності при відриві КМ з $\sigma_a = 24,4 \text{ МПа}$ (для епоксидної матриці) до $\sigma_a = 27,0 \text{ МПа}$ (рис. 2, крива 1). При цьому спостерігали змішаний характер руйнування адгезійного з'єднання (рис. 3, а, б), що вказує на кінетично неврівноважену полімерну систему за

незначного наповнення зв'язувача. Максимум на кривій залежності адгезійної міцності від вмісту СДОВ встановлено за вмісту $q = 0,050$ мас.ч., що підтверджує попередні результати дослідження отримані на основі ІЧ-спектрального аналізу, тобто активність добавки. Припускали, що за такого вмісту реалізується максимальна взаємодія амідних, карбонільних і нітрільних груп добавки (табл. 1) із компонентами зв'язувача, що забезпечує перебіг фізико-хімічних процесів зшивання наповненого полімеру із металевою основою. Це забезпечує зростання адгезійної міцності при відриві з $\sigma_a = 24,4$ МПа до $\sigma_a = 32,0$ МПа, що додатково підтверджено чисто когезійним характером руйнування (рис. 3, в). Аналіз праці [14] дозволяє констатувати, що за таких умов міцність адгезійного з'єднання переважає міцність самого матеріалу. При введенні СДОВ за вмісту $q = 0,100$ мас.ч. спостерігали подібний характер руйнування (рис. 3, г), що свідчить про високі показники адгезійної міцності ($\sigma_a = 31,5$ МПа). Надалі, введення волокнистої добавки у епоксидний зв'язувач за вмісту $q = 0,500 \dots 1,000$ мас.ч. призводить до незначного зниження адгезійної міцності при відриві ($\sigma_a = 30,0 \dots 31,0$ МПа). Руйнування таких КМ має здебільшого когезійний характер (рис. 3, д) з частковим проявом адгезійного (рис. 3, е).

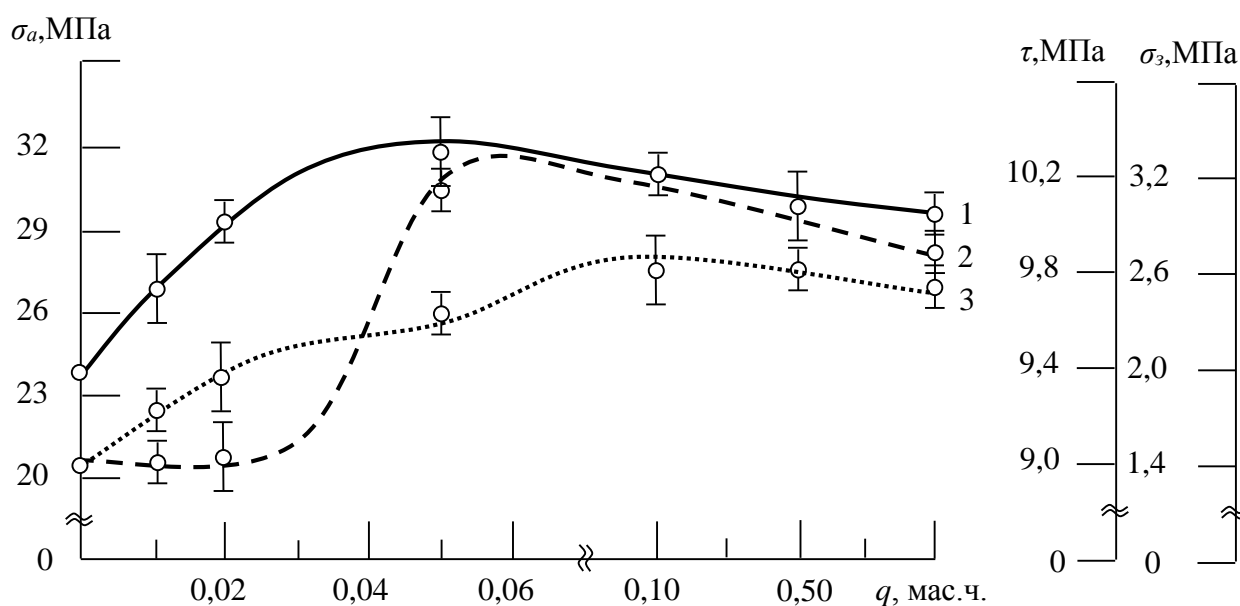


Рис. 2. Залежність адгезійної міцності (σ_a , τ) і залишкових напружень (σ_3) КМ від вмісту суміші дискретних органічних волокон: 1 – адгезійна міцність при відриві (σ_a); 2 – адгезійна міцність при зсуві (τ); 3 – залишкові напруження (σ_3)



Рисунок 3 – Характер відриву (адгезійна міцність при відриві) епоксидних композитів із різним вмістом суміші дискретних органічних волокон, q , мас.ч.: а) 0,010; б) 0,020; в) 0,050; г) 0,100; д) 0,500; е) 1,000.

Аналіз залежності адгезійної міцності при зсуві від вмісту СДОВ дозволив виявити подібну залежність (рис. 2, крива 2). Тобто, максимальне значення адгезійної міцності при зсуві, яке становить $\tau = 10,1$ МПа спостерігали при введенні волокнистої добавки за вмісту $q = 0,050$ мас.ч. Надалі введення СДОВ за вмісту $q = 0,100 \dots 1,000$ мас.ч. забезпечує незначне зниження адгезійної міцності ($\tau = 9,8 \dots 10,0$ МПа). При цьому аналіз відриву таких композитів (рис. 4, а-в) дозволяє констатувати про подібний (змішаний) характер руйнування, де без цифрового оброблення поверхні складно визначити фактичну площу когезійного контакту. Припускали, що введення добавки за вмісту $q = 0,050 \dots 1,000$ мас.ч. викликано як хімічною взаємодією (за рахунок активних груп волокнистої добавки), так і фізичною взаємодією, яка виникає завдяки зчепленню мікронерівностей поверхні волокна з металевою основою.



Рисунок 4 – Характер відриву (адгезійна міцність при зсуві) епоксидних композитів із різним вмістом суміші дискретних органічних волокон, q , мас.ч.: а) 0,050; б) 0,100; в) 1,000

Надалі досліджено вплив часток СДОВ на залишкові напруження композитного матеріалу (рис. 2, крива 3). Встановлено, що величина залишкових напружень при максимальному значенні адгезійної міцності ($\sigma_a = 31,5$ МПа при $q = 0,050$ мас.ч.) становить $\sigma_z = 2,2$ МПа. Так як залишкові напруження при даному вмісті ($q = 0,050$ мас.ч.) добавки не є максимальними, можна стверджувати, що досягнуто оптимальне співвідношення вище наведених значень. Тобто, високе значення адгезійної міцності і помірне значення залишкових напружень дозволить експлуатувати розроблені матеріали тривалий час без відшарування і розтріскування, а, отже, констатувати про підвищений період експлуатації полімеру без зміни властивостей.

Додатково проводили дослідження впливу вмісту суміші дискретних органічних волокон на фізико-механічні властивості. Зокрема досліджували вплив добавки на показники руйнівних напружень при згинанні та модуль пружності при згинанні.

Встановлено, що введення у епоксидний зв'язувач добавки СДОВ за вмісту $q = 0,010$ мас.ч. приводить до стрімкого підвищення показників руйнівних напружень при згинанні КМ з $\sigma_{z2} = 48,0$ МПа (для епоксидної матриці) до $\sigma_{z2} = 58,0$ МПа (рис. 5, крива 1). Вважали, що підвищення руйнівних напружень КМ пов'язано з армуючою дією добавки за рахунок високого ступеня змочування і сил поверхневого натягу при просочуванні поверхні волокон рідкою фазою епоксидного зв'язувача. Це, у свою чергу, забезпечує здатність макромолекул деформуватися під дією статичного навантаження. У цьому випадку формуються КМ із значною пружністю, що підтверджено отриманим значенням модуля пружності при згинанні – $E = 3,3$ ГПа (рис. 5, крива 1). Додатково дані положення добре узгоджуються із результатами оптичної мікроскопії (рис. 6, а). Структура зламу композиту характеризується в'язким руйнуванням з рівномірним розподілом ліній, що очевидно зорієнтовані у напрямку прикладення навантаження. При цьому відсутність дефектної

структури забезпечує високі показники руйнівних напружень і модуля пружності при згинанні.

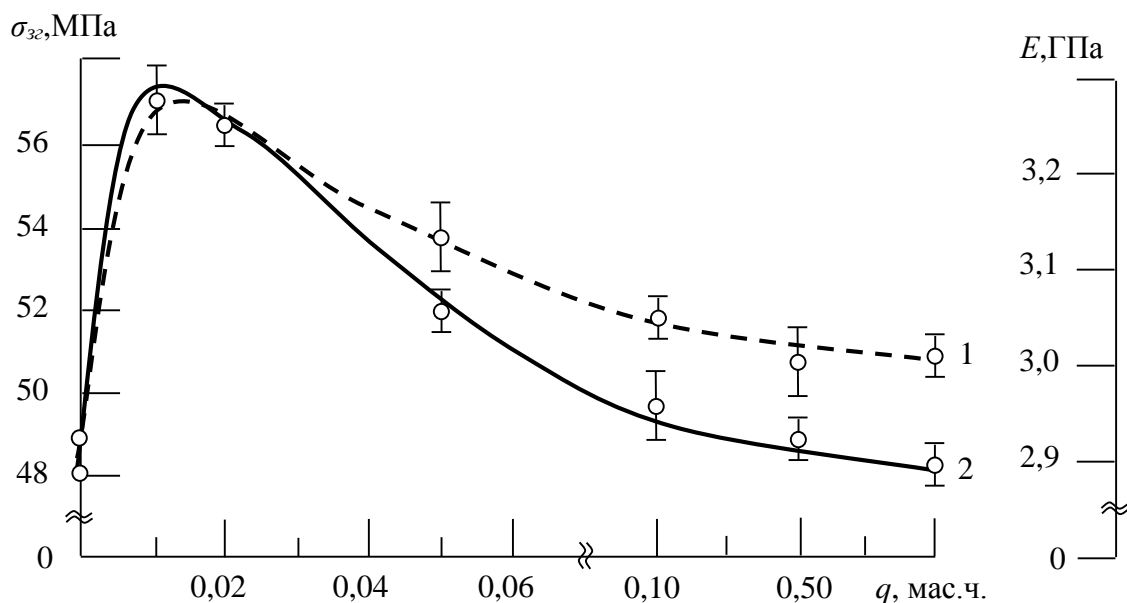


Рисунок 5 – Залежність фізико-механічних властивостей КМ від вмісту суміші дискретних органічних волокон: 1 – руйнівні напруження при згинанні (σ_{32}); 2 – модуль пружності при згинанні (E)

При введенні часток СДОВ у епоксидний зв'язувач за вмісту $q = 0,020$ мас.ч. спостерігали ділянки з крихким характером руйнування КМ (рис. 6, б). Очевидно їх поява викликана початком хаотичного розподілу суміші дискретних органічних волокон у епоксидному зв'язувачі, що призводить до нерівномірного розподілу залишкових напружень, а це у свою чергу забезпечує незначне зниження механічної міцності. Так руйнівні напруження при згинанні знижуються до $\sigma_{32} = 57,0$ МПа, а модуль пружності до $E = 3,2$ ГПа. Введення часток СДОВ у епоксидний зв'язувач за вмісту $q = 0,050 \dots 0,100$ мас.ч. призводить до стрімкого зниження руйнівних напружень при згинанні – $\sigma_{32} = 50,0 \dots 52,0$ МПа і модуля пружності – $E = 3,05 \dots 3,1$ ГПа. У даному випадку фактична площа руйнування приймає крихкий характер руйнування (рис. 6, в, г). Введення часток СДОВ у епоксидний зв'язувач за вмісту $q = 0,500 \dots 1,000$ мас.ч. призводить до формування дефектів у структурі через неповне змочування часток зв'язувачем (рис. 5, д, е). Відповідно, механічна міцність КМ знижується до рівня не наповненої матриці ($\sigma_{32} = 49,0$ МПа, $E = 3,0$ ГПа).

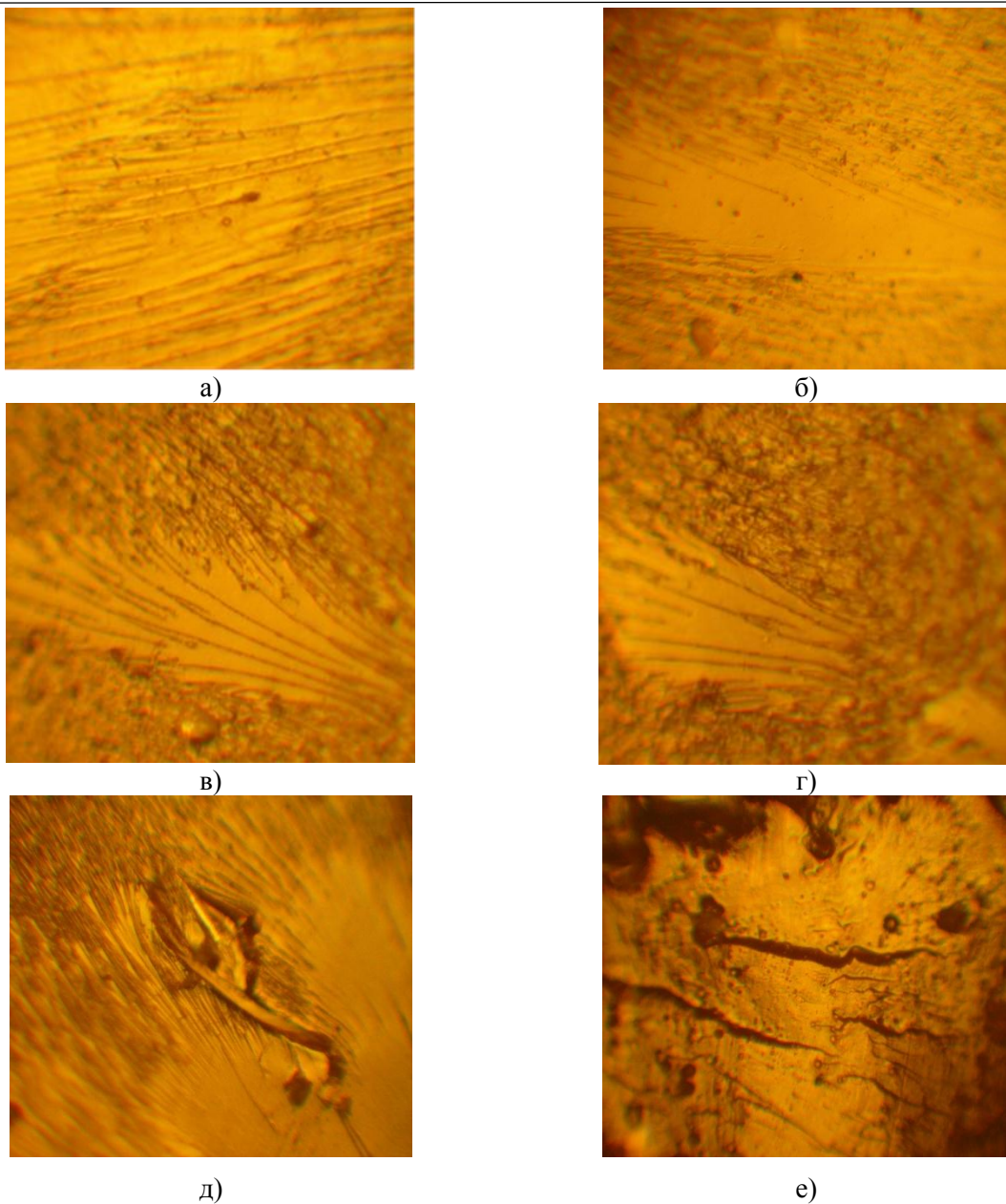


Рисунок 6 – Фрактограми зламу епоксидних композитів із різним вмістом суміші дискретних органічних волокон, q , мас.ч.: а) 0,010; б) 0,020; в) 0,050; г) 0,100; д) 0,500; е) 1,000.

Висновки. У процесі проведення експериментальних досліджень встановлено наступне:

1. Для формування покриттів транспортної техніки, які забезпечують високі показники адгезійної міцності доцільно використовувати композити, що містять суміш дискретних органічних волокон за вмісту $q = 0,050 \dots 0,100$ мас.ч. на 100 мас.ч. епоксидного олігомеру ЕД-20 і 10 мас.ч. твердника ПЕПА. Введення волокнистої добавки у епоксидний зв'язувач за оптимального вмісту забезпечує взаємодію амідних $-NH_2$, карбонільних $C=O$ і нітрильних $C \equiv N$ груп, внаслідок чого міцність адгезійного з'єднання переважає міцність самого матеріалу (адгезійна міцність при відриві – $\sigma_a = 31,5 \dots 32,0$ МПа, адгезійна міцність при зсуві – $\tau = 10,0 \dots 10,1$ МПа, залишкові напруження – $\sigma_z = 2,2$ МПа).

2. Для формування покриттів транспортної техніки, які забезпечують високі показники когезійної міцності доцільно використовувати композити, що містять суміш дискретних органічних волокон за вмісту $q = 0,010 \dots 0,020$ мас.ч. на 100 мас.ч. епоксидного олігомеру ЕД-20 і 10 мас.ч. твердника ПЕПА. Модуль пружності таких матеріалів становить – $\sigma_{32} = 57,0 \dots 58,0$ МПа, а модуль пружності – $E = 3,2 \dots 3,3$ ГПа. Підвищення механічної міцності пов'язано із здатністю макромолекул деформуватися під дією

статичного навантаження за рахунок орієнтації суміші дискретних органічних волокон у напрямку прикладення навантаження, що підтверджено методом оптичної мікроскопії.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Ходаковський О.В. Дослідження впливу парааміноазобензолу на адгезійні властивості епоксидної матриці для захисних покриттів засобів транспорту / О.В. Ходаковський, М.Ю. Амелін, С.О. Сметанкін, О.В. Акімов, В.М. Яцюк // Вісник НТУ «ХП». – 2016. – № 50 (1222). – С.42-46.
2. Ходаковський О.В. Теплофізичні властивості модифікованих парааміноазобензолом епоксидних матриць для захисних покриттів деталей транспортної галузі / Ходаковський О.В., Амелін М.Ю., Букетова Н.М., Яцюк В.М. // Науковий вісник ХДМА. – 2017. – № 1 (16). – С. 216–225.
3. Сметанкін С.О. Модифіковані епоксидні композити для підвищення надійності експлуатації та якості ремонту транспортної техніки / С.О.Сметанкін, В.Д.Нігалатій, О.В.Шарко, Д.А.Наговський, О.І. Скирденко // Вісник ХНТУ.-2015.-№4(55). – С.203-2018.
4. Нігалатій В.Д. Исследование влияния химического состава на результаты акустических измерений прочностных свойств материалов / В.Д. Нігалатій // Весник Карагандинского государственного университета. – 2015. - №3 (79). – С.81-86.
5. Buketov A.V., Sapronov O.O., Brailo M.V., Aleksenko V.L. Influence of the ultrasonic treatment on the mechanical and thermal properties of epoxy nanocomposites // Materials Science.- Vol. 49, Number 5.– 2014.–P.696-702.
6. Buketov A.V., Sapronov O.O., Brailo M.V. Investigation of the Physico-Mechanical and Thermophysical Properties of Epoxy Composites with a Two-Component Bidisperse Filler // Strength of Materials.–Vol. 46, No 5. – 2014.–P.717-723.
7. Buketov A. Enhancing performance characteristics of equipment of sea and river transport by using epoxy composites / A. Buketov, P. Maruschak, O. Sapronov, D. Zinchenko, V. Yatsyuk, S. Panin // Transport – 2016. – Vol. – 31(3). – P. 333-342.
8. Сапронов О.О. Полімерні композити для ремонту устаткування газотранспортної промисловості // Всеукраїнський щоквартальний науково-технічний журнал: Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – №1(66) – 2018. – С. 71-76.
9. Сапронов О.О. Використання дисперсних добавок для підвищення теплофізичних властивостей полімерних захисних покриттів / О.О.Сапронов, О.В.Лещенко // Вісник ХНТУ – 2018. – №1(64). – P. 57-61.
10. Амелін М.Ю. Відновлення деталей транспорту полімерними композитами з мікродисперсними частками, що є відходами виробництва / М.Ю.Амелін, О.О.Сапронов, О.В.Ходаковський, Н.М.Букетова // Наукові нотатки. - Луцьк: ЛНТУ. – Випуск 60. – 2017. – С. 22-30.
11. Букетова Н.М. Особливості впливу дисперсного конвертерного шламу на адгезійні і фізико-механічні властивості епоксидних композитів / Н.М. Букетова // Науковий вісник ХДМА. – 2015. – № 2 (13). – С. 153-162.
12. Buketov A.V. Use of dispersive additives to ensure high indicators of physico-mechanical properties of functional polymer coatings // A.V. Buketov, O.O. Sapronov, O.V. Leshchenko, S.V. Voronenko. Journal of Hydrocarbon Power Engineering. – 2017. – Vol. – 4(2). – P. 54-63.
13. Корякина М.И. Испытание лакокрасочных материалов и покрытий. М.: Химия. – 1988. – 272 с.
14. Buketov. A. V. Adhesive pull and shear strength of epoxy nanocomposite coatings filled with ultradispersed diamond / A.V. Buketov, N.A. Dolgov, A.A. Sapronov, and V.D. Nigalatii // Strength of Materials. – Vol. 50, No 3. – 2018. – P.425-431.

REFERENCES

1. Khodakovskiy O.V. Doslidzhennia vplyvu paraaminoazobenzolu na adheziini vlastyivosti epoksydnoi matrytsi dlia zakhysnykh pokryttiv zasobiv transportu / O.V. Khodakovskiy, M.Iu. Amelin, S.O. Smetankin, O.V. Akimov, V.M. Yatsiuk // *Visnyk NTU «KhPI»*. – 2016. – № 50 (1222). – S.42-46.
2. Khodakovskiy O.V. Teplofizychni vlastyivosti modyfikovanykh paraaminoazobenzolom epoksydnykh matryts dlia zakhysnykh pokryttiv detalei transportnoi haluzi / Khodakovskiy O.V., Amelin M.Iu., Buketova N.M., Yatsiuk V.M. // *Naukovyi visnyk KhDMA*. – 2017. – № 1 (16). – S. 216–225.
3. Smetankin S.O. Modyfikovani epoksydni kompozyty dlia pidvyshchennia nadiinosti ekspluatatsii ta yakosti remontu transportnoi tekhniki / S.O.Smetankin, V.D.Nihalatii, O.V.Sharko, D.A.Nahovskiy, O.I. Skyrdenko // *Visnyk KhNTU*.-2015.-№4(55). – S.203-2018.
4. Nyhalatyi V.D. Yssledovanye vliyaniya khymycheskoho sostava na rezultaty akustycheskykh yzmerenyi prochnostnykh svoistv materiyalov / V.D. Nyhalatyi // *Vesnyk Karahandynskoho hosudarstvennoho unyversyteta*. – 2015. - №3 (79). – S.81-86.
5. Buketov A.V., Saprionov O.O., Brailo M.V., Aleksenko V.L. Influence of the ultrasonic treatment on the mechanical and thermal properties of epoxy nanocomposites // *Materials Science*.-Vol. 49, Number 5.– 2014.–P.696-702.
6. Buketov A.V., Saprionov O.O., Brailo M.V. Investigation of the Physico-Mechanical and Thermophysical Properties of Epoxy Composites with a Two-Component Bidisperse Filler // *Strength of Materials*.-Vol. 46, No 5. – 2014.–P.717-723.
7. Buketov A. Enhancing performance characteristics of equipment of sea and river transport by using epoxy composites / A. Buketov, P. Maruschak, O. Saprionov, D. Zinchenko, V. Yatsyuk, S. Panin // *Transport* – 2016. – Vol. – 31(3). – P. 333-342.
8. Saprionov O.O. Polimerni kompozyty dlia remontu ustatkuvannia hazotransportnoi promyslovosti // *Vseukrainskyi shchokvartalnyi naukovo-tekhnichnyi zhurnal: Rozvidka ta rozrobka naftovykh i hazovykh rodovyshch*. – №1(66) – 2018. – S. 71-76.
9. Saprionov O.O. Vykorystannia dyspersnykh dobavok dlia pidvyshchennia teplofizychnykh vlastyvostei polimernykh zakhysnykh pokryttiv / O.O.Saprionov, O.V.Leshchenko // *Visnyk KhNTU* – 2018. – №1(64). – P. 57-61.
10. Amelin M.Iu. Vidnovlennia detalei transportu polimernymy kompozytamy z mikrodyspersnymy chastkamy, shcho ye vidkhodamy vyrobnytstva / M.Iu.Amelin, O.O.Capronov, O.V.Khodakovskiy, N.M.Buketova // *Naukovi notatky*. - Lutsk: LNTU. – Vypusk 60. – 2017. – S. 22-30.
11. Buketova N.M. Osoblyvosti vplyvu dyspersnoho konverternoho shlamu na adheziini i fizyko-mekhanichni vlastyivosti epoksydnykh kompozytiv / N.M. Buketova // *Naukovyi visnyk KhDMA*. – 2015. – № 2 (13). – S. 153-162.
12. Buketov A.V. Use of dispersive additives to ensure high indicators of physico-mechanical properties of functional polymer coatings // A.V. Buketov, O.O. Saprionov, O.V. Leshchenko, S.V. Voronenko. *Journal of Hydrocarbon Power Engineering*. – 2017. – Vol. – 4(2). – P. 54-63.
13. Koriakyna M.Y. Ysprytanye lakokrasochnykh materiyalov u pokrytyi. M.: Khymyia. – 1988. – 272 s.
14. Buketov. A. V. Adhesive pull and shear strength of epoxy nanocomposite coatings filled with ultradispersed diamond / A.V. Buketov, N.A. Dolgov, A.A. Saprionov, and V.D. Nihalatii // *Strength of Materials*. – Vol. 50, No 3. – 2018. – P.425-431.

Сапронова А. В. ВЛИЯНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ОРГАНИЧЕСКИХ ВОЛОКОН В ЭПОКСИДНОМ СВЯЗУЮЩЕМ НА ПОКАЗАТЕЛИ АДГЕЗИОННОЙ И КОГЕЗИОННОЙ ПРОЧНОСТИ ПОКРЫТИЙ ТРАНСПОРТНОЙ ТЕХНИКИ

В работе рассмотрено влияние содержания смеси дискретных органических волокон, содержащих 50% шелка, 45% акрила, 5% полиамида на особенности структурообразования эпоксидных композитов для обеспечения необходимого комплекса свойств деталей транспортной техники. В качестве основного компонента для связующего при формировании эпоксидных композитов выбрано эпоксидный диановый олигомер марки ЭД-20. Для сшивания эпоксидных композиций использовано отвердитель полиэтиленполиамин ПЭПА, что позволяет отверждать материалы при комнатных температурах. Проведено исследование поверхности волокнистой добавки методом ИК-спектрального анализа. Установлено колебания: C-N групп в диапазоне волновых чисел $\nu = 1068...1122 \text{ см}^{-1}$; амидной группы при волновом числе $\nu = 1253 \text{ см}^{-1}$; нитрильной группы при волновом числе $\nu = 2239 \text{ см}^{-1}$; карбонильной C=O группы при волновом числе $\nu = 2362 \text{ см}^{-1}$; валентные колебания -OH, -NH- групп при волновом числе $\nu = 3410 \text{ см}^{-1}$. В работе объединены результаты исследования адгезионной прочности при отрыве и сдвиге и анализ поверхности разрушения адгезионного соединения. Показано, что максимальным значением адгезионной прочности характеризуются материалы, где преобладает когезионный характер разрушения адгезионного соединения. Обеспечение вязкого характера разрушения, путем регулируемого введения смеси дискретных органических волокон позволяет повышать механическую прочность разработанных материалов.

Ключевые слова: эпоксидное связующее, смесь дискретных органических волокон, адгезионная прочность, поверхность разрушения, характер разрушения, ИК-спектральный анализ.

Sapronova A. V. THE INFLUENCE OF ORGANIC FIBER CONTENT IN THE EPOXIDE BINDER ON ADHESIVE AND COGESIVE STRENGTH OF THE TRANSPORT TECHNICAL COATINGS

The influence of the content of a mixture of discrete organic fibers containing 50 % silk, 45 % acrylic, 5 % polyamide on the peculiarities of structure formation of epoxy composites to provide the necessary complex of properties of transport equipment parts is considered in the work. ED-20 brand epoxy dian oligomer was selected as the main component for the binder in the formation of epoxy composites. For crosslinking of epoxy compositions, a PEPA hardener was used to allow the materials to be solidified at room temperature. The surface of the fibrous additive was investigated by the method of IR spectral analysis. Oscillations of C-N groups in the wavenumber range $\nu = 1068...1122 \text{ cm}^{-1}$ are established; amide group at wave number $\nu = 1253 \text{ cm}^{-1}$; the nitrile group at a wave number $\nu = 2239 \text{ cm}^{-1}$; carbonyl C=O group at wave number $\nu = 2362 \text{ cm}^{-1}$; valence vibrations of the -OH, -NH- groups at the wave number $\nu = 3410 \text{ cm}^{-1}$. The paper combines the results of the study of adhesion strength at tear and shear and analysis of the surface of failure of the adhesive connection. It is shown that the maximum values of adhesive strength are characterized by materials where the cohesive nature of the destruction of the adhesive compound predominates. The maximum value of adhesive strength is $\sigma_a = 32,0 \text{ MPa}$ and $\tau = 10,1 \text{ MPa}$ with the introduction of a mixture of discrete organic fibers with a content of $q = 0,050 \text{ wt.h.}$ per 100 parts by weight epoxy oligomer ED-20 and 10 wt.h. of PEPA hardener. Ensuring the viscous nature of the fracture through the controlled introduction of a mixture of discrete organic fibers allows to increase the mechanical strength of the developed materials. The maximum value of mechanical strength is $\sigma_b = 58,0 \text{ MPa}$ and $E = 3,3 \text{ GPa}$ with the introduction of a mixture of discrete organic fibers with a content of $q = 0,010 \text{ wt.h.}$ per 100 parts by weight epoxy oligomer ED-20 and 10 wt.h. of PEPA hardener.

Keywords: epoxy binder, mixture of discrete organic fibers, adhesive strength, fracture surface, fracture character, IR-spectral analysis.

© Сапронова А. В.

Статтю прийнято
до редакції 19.04.19

ВПЛИВ СИНТЕЗОВАНОЇ ПОРОШКОВОЇ ТИТАНО-АЛЮМІНІЄВОЇ ШИХТИ НА МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ЕПОКСИКОМПОЗИТІВ ДЛЯ ЗАСОБІВ МОРСЬКОГО ТА РІЧКОВОГО ТРАНСПОРТУ

Сизоненко О. М., д.т.н., головний науковий співробітник відділу імпульсної обробки дисперсних систем Інституту імпульсних процесів і технологій НАН України, м. Миколаїв, e-mail: sizonenko43@rambler.ru, ORCID: 0000-0002-8449-2481;

Негруца Р. Ю., аспірант кафедри транспортних технологій Херсонської державної морської академії;

Торпаков А. С., к.т.н., старший науковий співробітник відділу імпульсної обробки дисперсних систем Інституту імпульсних процесів і технологій НАН України, м. Миколаїв, ORCID: 0000-0002-9805-3914;

Букетова Н. М., докторант кафедри транспортних технологій Херсонської державної морської академії, ORCID: 0000-0002-7670-6590;

Пилипчук Н. А., марістрант Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка

Показано, що для поліпшення антикорозійних властивостей і зносостійкості засобів морського та річкового транспорту, військової техніки, машинобудування, хімічної, нафтопереробної та газотранспортної промисловості необхідно використовувати полімерні епоксикомпозитні захисні покриття. Експлуатаційні характеристики полімерних, у тому числі епоксидних, композитних матеріалів і захисних покриттів на їх основі підвищують за рахунок введення нано- і мікродисперсних наповнювачів у вигляді порошків.

У роботі для формування композитних матеріалів і захисних покриттів для транспортної галузі використано епоксидний діановий олігомер ЕД-20, твердник поліетиленполіамін ПЕПА і мікродисперсні частки синтезованої високовольтним електророзрядом порошкової титано-алюмінієвої шихти. Досліджено залежність вмісту мікродисперсного порошку на адгезійні, фізико-механічні властивості і залишкові напруження епоксидних композитів. Доведено, що для формування композитного матеріалу чи захисного покриття з поліпшеними адгезійними і когезійними властивостями оптимальний вміст часток становить 0,05...0,50 мас.ч. на 100 мас.ч. епоксидного олігомеру ЕД-20.

Перевагою розробки над зарубіжними і вітчизняними аналогами є облік основних факторів агресивних середовищ, де експлуатується технологічне обладнання, та розробка матеріалів, які у комплексі мають високі показники фізико-механічних, теплофізичних властивостей, корозійної тривкості та зносостійкості. Виходячи з цього, у епоксидний зв'язувач вводили активний до міжфазової взаємодії мікродисперсний наповнювач, у тому числі синтезований високовольтним електроіскровим розрядом. При цьому важливим є визначення критичного вмісту синтезованої високовольтним електророзрядом порошкової титано-алюмінієвої мікродисперсної шихти при формуванні захисних епоксидних покриттів для засобів морського та річкового транспорту.

Ключові слова: епоксидний композит, модуль пружності, ударна в'язкість, руйнівні напруження при згинанні.

DOI: 10.33815/2313-4763.2019.1.20.151-161

Постановка проблеми. На сьогодні наукові школи передових країн світу займаються вирішенням важливої науково-технічної проблеми – розробкою захисних в основному полімерних антикорозійних і зносостійких покриттів для морського та річкового транспорту, військової техніки, машинобудування, хімічної, нафтопереробної та газотранспортної промисловості. Експлуатаційні характеристики полімерних, у тому числі епоксидних, композитних матеріалів і захисних покриттів на їх основі підвищують за рахунок попередньої обробки інгредієнтів матриці за допомогою зовнішніх полів, а також в результаті введення нано- і мікродисперсних наповнювачів у вигляді порошків. Авторами [1–7] досліджено та обґрунтовано механізм впливу обробки за допомогою постійного та високочастотного магнітного поля на властивості композитів. Виявлено механізм впливу ультрафіолетового випромінювання на процеси структуроутворення, що дозволило підвищити експлуатаційні характеристики композитних матеріалів (КМ) з дисперсними

наповнювачами різної фізичної природи. Доведена ефективність використання комплексної ультразвукової обробки епоксидних композицій на повітрі і волокнистого наповнювача у водному середовищі для створення захисних покриттів з високою антикорозійною і зносостійкістю. На основі проведених досліджень розроблені різні технології обробки і формування епоксидних композицій з нано- і мікродисперсним наповнювачем, а також створено нові матеріали для захисних покриттів, які відзначаються високими експлуатаційними характеристиками. Крім того, в результаті спрямованого введення в епоксидну матрицю дисперсних наповнювачів, а також в результаті магнітної обробки і ультрафіолетового опромінення композицій, реалізується синергійний ефект, що дозволяє істотно підвищити експлуатаційні характеристики захисних покриттів при експлуатації обладнання в критичних умовах.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На підставі проведених досліджень авторами [1–5] розроблені нові епоксикомпозитні покриття для захисту технологічного обладнання від корозії і зносу. Цікавим для замовників може бути те, що при розробці покриттів використовували мікродисперсні наповнювачі з відходів промислового виробництва. Це дозволяє не тільки поліпшити властивості покриттів, але і істотно знизити їх вартість. Крім цього, такий підхід забезпечує одночасно утилізацію відходів, що вигідно не тільки економічно, але і з точки зору екології та охорони навколишнього середовища, що може бути суттєво не тільки для промисловості, а й для розвитку в цілому будь-якого регіону.

Перевагою даних розробок над зарубіжними і вітчизняними аналогами є облік основних факторів агресивних середовищ, де експлуатується технологічне обладнання, та розробка матеріалів, які в комплексі мають високі показники фізико-механічних, теплофізичних властивостей, корозійної тривкості та зносостійкості. Водночас слід зазначити, що проблема поліпшення механічних, антикорозійних властивостей і зносостійкості КМ у комплексі на сьогодні ще остаточно не вирішена. Потребує подальших фундаментальних досліджень область полімерного матеріалознавства, що охоплює обґрунтування механізму взаємодії інгредієнтів композицій при їх структуроутворенні на мікро-, мезо- і макрорівні. Саме такі процеси при формуванні структури матеріалів у подальшому визначають їх когезійні і, як наслідок, антикорозійні властивості та зносостійкість.

Враховуючи це, актуальним є введення у епоксидний зв'язувач активних до взаємодії мікродисперсних наповнювачів, у тому числі синтезованих високовольтним електроіскровим розрядом. При цьому важливим є проведення дослідження стосовно визначення критичного вмісту синтезованої високовольтним електророзрядом порошкової титано-алюмінієвої мікродисперсної шихти при формуванні захисних епоксидних покриттів для засобів морського та річкового транспорту.

Мета роботи – дослідити вплив вмісту синтезованої шихти на адгезійні і фізико-механічні властивості епоксидних композитів для засобів морського та річкового транспорту.

Матеріали та методика дослідження. Як основний компонент для зв'язувача при формуванні епоксидних КМ вибрано епоксидний діановий олігомер марки ЕД-20 (ГОСТ 10587-84), який характеризується високою адгезійною та когезійною міцністю, незначною усадкою і технологічністю при нанесенні на поверхні складного профілю. Для зшивання епоксидних композицій використано твердник поліетиленполіамін ПЕПА (ТУ 6-05-241-202-78), що дозволяє затверджувати матеріали при кімнатних температурах. ПЕПА є низькомолекулярною речовиною, яка складається з таких взаємозв'язаних компонентів: $[-CH_2-CH_2-NH-]_n$. Зшивали КМ, вводючи твердник у композицію при стехіометричному співвідношенні компонентів за вмісту (мас.ч.) – ЕД-20 : ПЕПА – 100 : 10.

Як мікродисперсний наповнювач для експериментальних досліджень використано синтезовану порошкову титано-алюмінієву шихту (ПТАШ). Формування наповнювача проводили високовольтним електророзрядним (ВЕР) синтезом. Для високовольтного

електророзрядного синтезу наповнювача використовували дослідний стенд, описаний у роботах [8-10]. У вигляді вихідного матеріалу використовували суміш порошків наступного вихідного складу: Al (15 %) + Ti (85 %). При дослідженні накопичена енергія одиничного розряду (W_1) становила 1 кДж, а інтегральна питома енергія обробки ($W_{\text{пит}}$) становила 25 МДж/кг. У процесі досліджень виконували варіювання розподілом електричного поля та плазмових утворень у об'ємі розрядної камери шляхом використання 3-вістрійної конструкції електродної системи (рис. 1).



Рисунок 1 – 3-вістрійна конструкція електродної системи

Використання різних електродних систем дозволило керувати розподілом інтенсивності впливу основних факторів ВЕР [8]. Так, якщо у випадку використання 1-вістрійної системи більша частка накопиченої енергії трансформувалась у ударні хвилі, то використання 3-вістрійної системи дозволяє підвищити інтенсивність впливу термічних та струмових факторів. Результати досліджень показали, що у результаті ВЕР-обробки відбулось подрібнення усіх оброблених часток та зміна їх фазового складу із синтезом високомодульних сполук Ti, Al_3Ti і Ti_3AlC_2 (табл. 1).

Таблиця 1 – Результати ВЕР-синтезу наповнювача

Вихідний склад	Склад після ВЕР-синтезу	Електродна система	Діаметр після обробки, d , мкм		
			$d_{\text{мін}}$	$d_{\text{макс}}$	$d_{\text{сеп}}$
Al (15 %) + Ti (85 %)	Ti (75 %) + Al_3Ti (15 %), Ti_3AlC_2 (10 %)	3	~1	122	9,5

Епоксидні композити формували за такою технологією [1, 2, 6]: підігрівання смоли до температури $T = 353 \pm 2$ К і витримка при даній температурі впродовж часу $\tau = 20 \pm 0,1$ хв; гідродинамічне суміщення олігомеру і часток наповнювача впродовж часу $\tau = 10 \pm 0,1$ хв; ультразвукова обробка (УЗО) композиції впродовж часу $\tau = 1,5 \pm 0,1$ хв; охолодження композиції до кімнатної температури впродовж часу $\tau = 60 \pm 5$ хв; введення твердника і перемішування композиції впродовж часу $\tau = 5 \pm 0,1$ хв. Затверджували КМ за режимом: формування зразків та їх витримання впродовж часу $\tau = 12,0 \pm 0,1$ год за температури $T = 293 \pm 2$ К, нагрівання зі швидкістю $v = 3$ К/хв до температури $T = 393 \pm 2$ К, витримання впродовж часу $\tau = 2,0 \pm 0,05$ год, повільне охолодження до температури $T = 293 \pm 2$ К. З метою стабілізації структурних процесів у композиті зразки витримували впродовж часу $\tau = 24$ год на повітрі за температури $T = 293 \pm 2$ К з наступним проведенням експериментальних випробувань.

У роботі досліджували наступні властивості КМ: адгезійну міцність, залишкові напруження, руйнівні напруження та модуль пружності при згинанні і ударну в'язкість.

Адгезійну міцність КМ до металеві основи досліджували, вимірюючи руйнівні напруження («метод грибків») при рівномірному відриві пари склеєних зразків згідно ГОСТ 14760 - 69. Дослідження адгезійної міцності при зсуві проводили згідно ГОСТ 14759 - 69, аналогічно вимірюючи силу відривання клейових з'єднань зразків на

автоматизованій розривній машині УМ-5 при швидкості навантаження $v = 10$ м/с. Діаметр робочої частини зразків при відриві становив – $d = 25$ мм. Слід зазначити, що площа склеювання зразків, які досліджували при відриві та зсуві, була однаковою.

Залишкові напруження у покриттях визначали консольним методом [3]. Покриття товщиною $\delta = 0,3 \dots 0,8$ мм формували на металевій основі. Параметри основи: загальна довжина – $l = 100$ мм, робоча довжина – $l_0 = 80$ мм, товщина – $\delta = 0,3$ мм.

Руйнівні напруження і модуль пружності при згинанні визначали згідно з ГОСТ 4648-71 і ГОСТ 9550-81 відповідно. Параметри зразків: довжина $l = 120 \pm 2$ мм, ширина $b = 15 \pm 0,5$ мм, висота $h = 10 \pm 0,5$ мм.

Ударну в'язкість визначали за методом Шарпі відповідно до ГОСТ 4647-80 на маятниковому копрі МК-30 при температурі $T = 298 \pm 2$ К і відносній вологості $d = 50 \pm 5$ %. Використовували зразки з такими параметрами: $(63,5 \times 12,7 \times 12,7) \pm 0,5$ мм. Відстань між опорами $40 \pm 0,5$ мм.

Відхилення значень при дослідженнях показників адгезійних і фізико-механічних властивостей КМ становило 4...6 % від номінального.

Результати досліджень та їх обговорення. На попередньому етапі досліджували адгезійну міцність і залишкові напруження у епоксикомпозитних матеріалах. Експериментально встановлено (рис. 2), що адгезійна міцність при відриві обробленої ультразвуком епоксидної матриці становить $\sigma_a = 24,8$ МПа. Введення наповнювача ПТАШ за незначного вмісту ($q = 0,05$ мас.ч. на 100 мас.ч. епоксидного олігомеру ЕД-20) приводить до суттєвого поліпшення адгезійних властивостей композиту. У цьому випадку адгезійна міцність КМ збільшується від $\sigma_a = 24,8$ МПа (для епоксидної матриці) до $\sigma_a = 38,0$ МПа. Це, у першу чергу, зумовлено активністю до міжфазової взаємодії при структуроутворенні матеріалів часток синтезованої порошкової титано-алюмінієвої шихти. На наш погляд, активні центри на поверхні дисперсної фази у вигляді Al_3Ti і Ti_3AlC_2 взаємодіють з боковими групами та сегментами макромолекул епоксидної смоли, що пришвидшує перебіг фізико-хімічних процесів міжфазової взаємодії. Це, у свою чергу, створює умови для підвищення гель-фракції у композиті, що відповідно забезпечує збільшення показників адгезійних характеристик розробленого матеріалу.

Надалі збільшення вмісту наповнювача у КМ призводить до монотонного зменшення адгезійної міцності матеріалів. Показано (рис. 2, крива 1), що введення у зв'язувач часток у кількості $q = 0,50$ мас.ч. забезпечує формування композиту з адгезійною міцністю при відриві – $\sigma_a = 28,9$ МПа, а введення у зв'язувач часток у кількості $q = 2,00$ мас.ч. призводить до зменшення показників адгезійних характеристик КМ при відриві до $\sigma_a = 19,5$ МПа. Дані значення є меншими порівняно з аналогічними показниками для полімерної матриці. Отже, експериментально встановлено критичний вміст досліджуваного наповнювача при формуванні епоксикомпозитів з поліпшеними адгезійними характеристиками при відриві. Доведено, що введення у епоксидний зв'язувач часток ПТАШ за критичного вмісту $q = 0,05$ мас.ч. забезпечує збільшення адгезійної міцності від $\sigma_a = 24,8$ МПа (для епоксидної матриці) до $\sigma_a = 38,0$ МПа.

Додатково експериментально встановлено, що крива залежності адгезійної міцності при зсуві від вмісту досліджуваного наповнювача (рис. 2, крива 2) повністю корелює з аналогічною динамікою адгезійних характеристик при відриві (рис. 2, крива 1). Це свідчить про достовірність отриманих результатів дослідження. Показано (рис. 2), що максимальні показники адгезійних властивостей при зсуві отримано для КМ, наповненого частками ПТАШ за вмісту $q = 0,05$ мас.ч. Такий КМ характеризується адгезійною міцністю при зсуві – $\tau = 10,8$ МПа, що на 2,3 МПа є більшим від аналогічного показника для епоксидної матриці. Надалі збільшення вмісту наповнювача призводить до монотонного зменшення показників адгезійної міцності і при введенні часток у кількості $q = 2,00$ мас.ч. формується композит з адгезійною міцністю $\tau = 9,8$ МПа. На наш погляд, це зумовлено перенасиченням наповнювача у гетерогенних системах, що погіршує їх змочування епоксидним зв'язувачем. Як було зазначено вище, частки добавки є активними до міжфазової взаємодії.

Тому введення їх у гомеопатичних дозах приводить до суттєвого підвищення характеристик матеріалів. Навпаки, надмірна кількість добавки призводить до зниження як когезійних, так і адгезійних властивостей розроблених КМ.

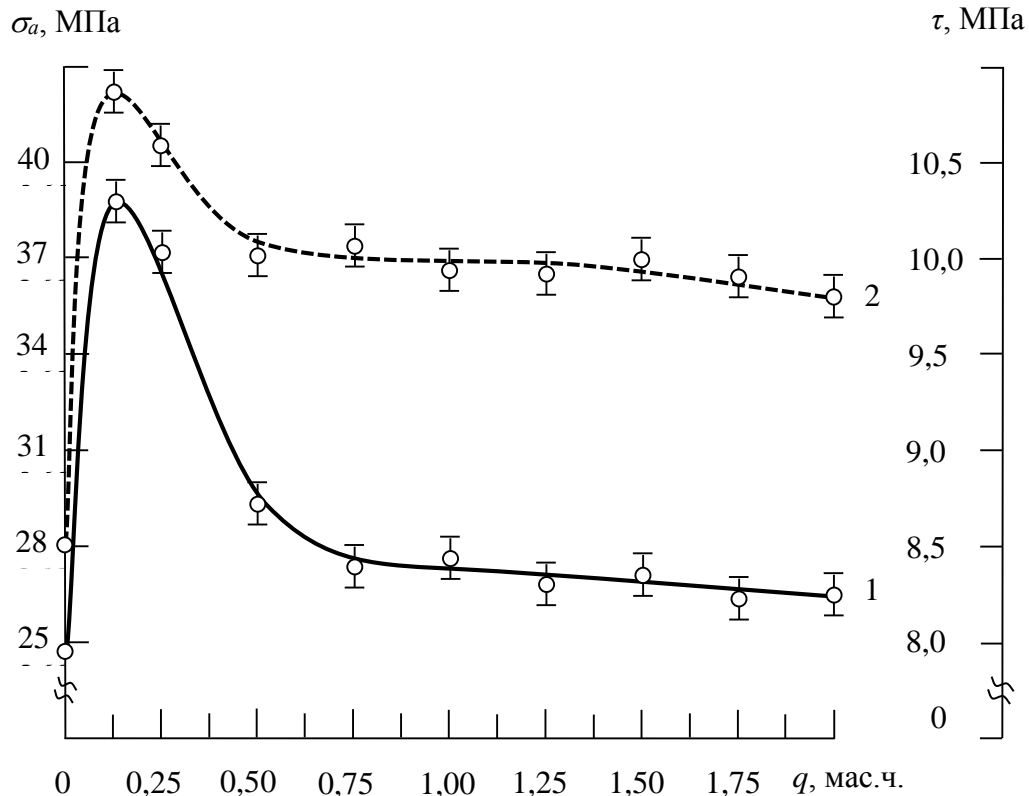


Рисунок 2 – Залежність адгезійної міцності КМ від вмісту мікродисперсного наповнювача ПТАШ: 1 – адгезійна міцність при відриві (σ_a); 2 – адгезійна міцність при зсуві (τ).
Матеріал основи – сталь марки Ст 3

За результатами дослідження динаміки залишкових напружень від вмісту мікродисперсного наповнювача можна констатувати наступне. Максимум на гістограмі, що ілюструє залежність « $\sigma_3 - q$ », спостерігали для КМ з найбільшими значеннями адгезійної міцності при відриві і зсуві, тобто за критичного вмісту мікродисперсних часток ($q = 0,05$ мас.ч.). При формуванні такого матеріалу залишкові напруження збільшуються від $\sigma_3 = 1,4$ МПа (для епоксидної матриці) до $\sigma_3 = 1,9$ МПа. Це пояснюють тим, що за такого наповнення формується міцнозшита структура полімеру з високим ступенем зшивання. Відповідно кількість фізичних і хімічних зв'язків на одиницю об'єму полімеру є значною. Це безумовно приводить до підвищення показників залишкових напружень у розроблених КМ. Навпаки, надмірна кількість наповнювача (при $q = 0,50 \dots 2,00$ мас.ч.) призводить до формування дефектів у КМ, кількість зв'язків на одиницю об'єму зменшується, що є причиною зменшення залишкових напружень при введенні у полімер часток понад критичного вмісту.

Отже, у роботі встановлено критичний вміст мікродисперсного наповнювача синтезованої порошкової титано-алюмінієвої шихти для формування епоксидних композитів з поліпшеними показниками адгезійної міцності. Доведено, що наповнення композитів дисперсними частками у кількості $q = 0,05$ мас.ч. на 100 мас.ч. епоксидного олігомеру ЕД-20 забезпечує підвищення показників адгезійної міцності при відриві від $\sigma_a = 24,8$ МПа (для епоксидної матриці) до $\sigma_a = 38,0$ МПа, адгезійної міцності при зсуві від $\tau = 8,5$ МПа до $\tau = 10,8$ МПа, при цьому залишкові напруження збільшуються від $\sigma_3 = 1,4$ МПа до $\sigma_3 = 1,9$ МПа.

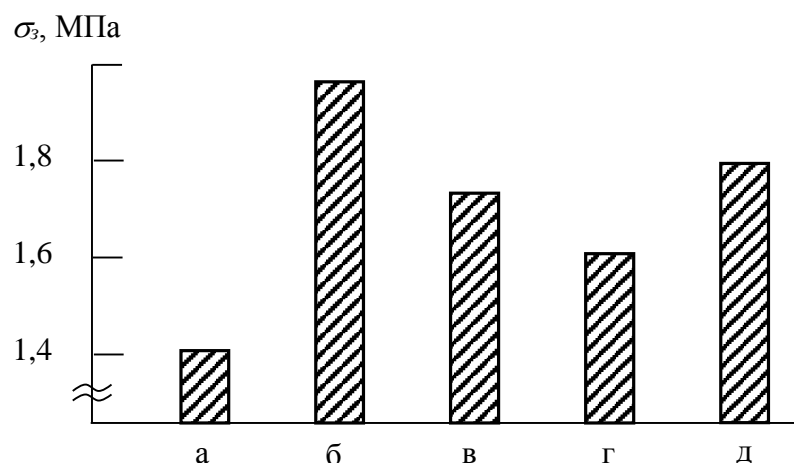


Рисунок 3 – Залежність залишкових напружень (σ_3) у КМ від вмісту (q) мікродисперсного наповнювача ПТАШ: а) вихідна матриця (контрольний зразок); б) $q = 0,05$ мас.ч.; в) $q = 0,50$ мас.ч.; г) $q = 1,00$ мас.ч.; д) $q = 2,00$ мас.ч.

На наступному етапі досліджували фізико-механічні властивості розроблених епоксидних композитів. Показано (рис. 4), що модуль пружності епоксидної матриці становить $E = 2,8$ ГПа. Експериментально доведено (рис. 4, крива 1), що введення наповнювача за вмісту $q = 0,05 \dots 0,50$ мас.ч. не приводить до збільшення показників досліджуваної властивості, позаяк різниця у значеннях складає $0,1$ ГПа. Надалі наповнення епоксидного зв'язувача частками ПТАШ у кількості $q = 0,75 \dots 2,00$ мас.ч. спричиняє погіршення пружних характеристик композитів, оскільки модуль пружності зменшується до $E = 2,5$ ГПа. Як було зазначено вище, це зумовлено надмірною кількістю дисперсної добавки у матеріалах, що призводить до погіршення когезійної міцності композитів.

Результати дослідження залежності руйнівних напружень при згинанні КМ від вмісту наповнювача дозволяють констатувати наступне. Максимум на кривій залежності « $\sigma_{3z} - q$ » спостерігали для КМ, що містять наповнювач ПТАШ у кількості $q = 0,25 \dots 0,50$ мас.ч. Формування таких композитів забезпечує збільшення руйнівних напружень КМ від $\sigma_{3z} = 48,0$ МПа (для епоксидної матриці) до $\sigma_{3z} = 67,3 \dots 75,2$ МПа. Надалі збільшення кількості часток спричиняє різке зменшення показників до $\sigma_{3z} = 47,7$ МПа (за вмісту наповнювача – $q = 2,00$ мас.ч.).

Результати досліджень ударної в'язкості розроблених матеріалів добре узгоджуються з динамікою наведених вище випробувань. Показано (рис. 5), що максимальними показниками ударної в'язкості відрізняються матеріали, які містять синезовану шихту у кількості $q = 0,25 \dots 0,50$ мас.ч. Введення досліджуваного наповнювача за такого критичного вмісту забезпечує підвищення показників ударної в'язкості КМ від $W = 7,4$ кДж/м² (для епоксидної матриці) до $W = 9,9 \dots 10,4$ кДж/м². Подальше збільшення вмісту часток призводить до погіршення механічних властивостей епоксикомпозитів при ударі.

Отже, встановлено оптимальний вміст синтезованої порошкової титано-алюмінієвої шихти для формування епоксидних композитів з поліпшеними механічними властивостями. Доведено, що наповнення композитів дисперсними частками у кількості $q = 0,25 \dots 0,50$ мас.ч. на 100 мас.ч. епоксидного олігомеру ЕД-20 забезпечує підвищення руйнівних напружень при згинанні КМ від $\sigma_{3z} = 48,0$ МПа (для епоксидної матриці) до $\sigma_{3z} = 67,3 \dots 75,2$ МПа, ударної в'язкості від $W = 7,4$ кДж/м² до $W = 9,9 \dots 10,4$ кДж/м², при цьому показники модуля пружності матеріалів практично не змінюються.

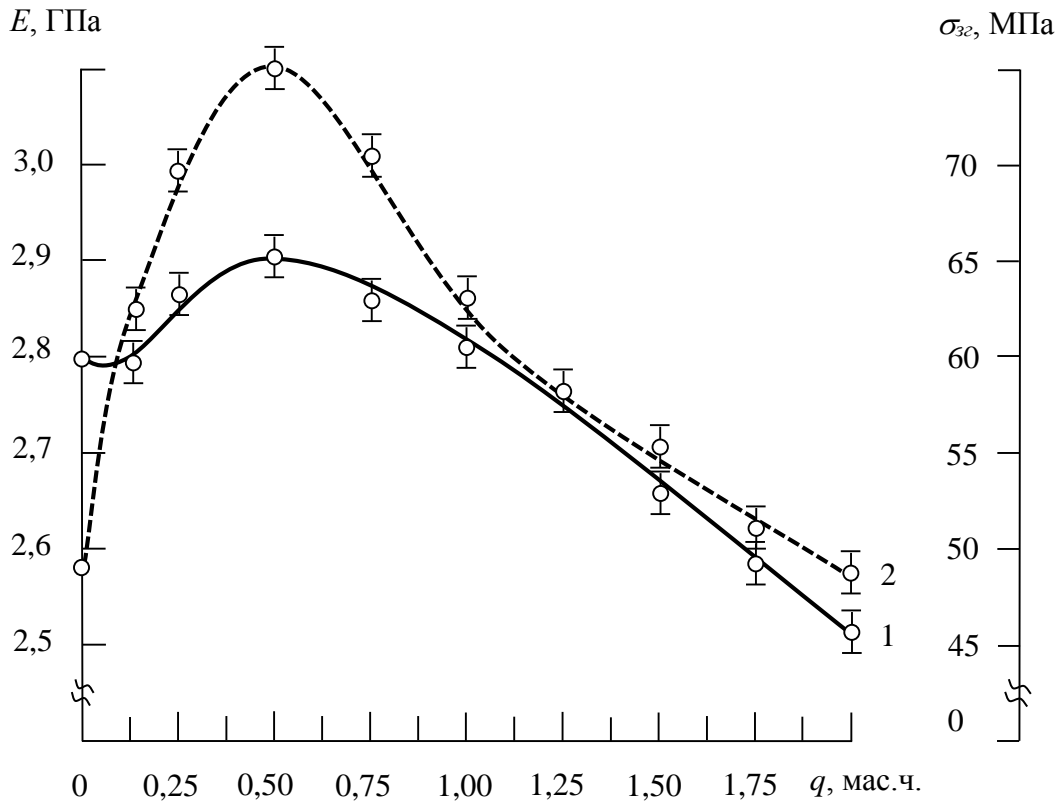


Рисунок 4 – Залежність фізико-механічних властивостей КМ від вмісту ПТАШ: 1 – модуль пружності при згинанні (E); 2 – руйнівні напруження при згинанні (σ_{32})

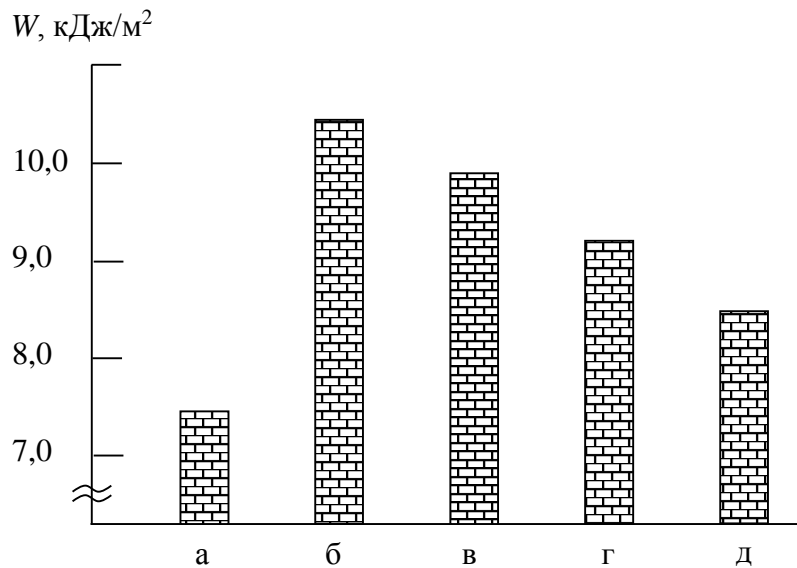


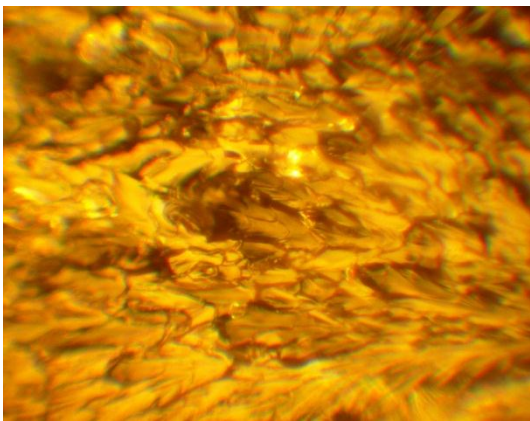
Рисунок 5 – Залежність ударної в'язкості (W) від вмісту (q) мікродисперсного наповнювача ПТАШ у КМ: а) вихідна матриця (контрольний зразок); б) $q = 0,05$ мас.ч.; в) $q = 0,50$ мас.ч.; г) $q = 1,00$ мас.ч.; д) $q = 2,00$ мас.ч.

Для підтвердження результатів отриманих випробувань додатково досліджували поверхню зламу композитів методом оптичної мікроскопії. Показано (рис. 6, а, б), що поверхня зламу КМ з частками ПТАШ у кількості $q = 0,05$ мас.ч. є не достатньо рівномірною, характеризується кластерними включеннями. З одного боку це свідчить про підвищені когезійні характеристики таких композитів, однак з іншого боку можна констатувати про формування складного напруженого стану у таких системах. Наслідком

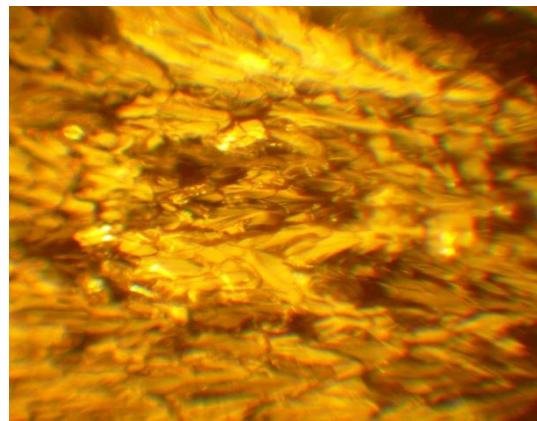
цього може бути передчасне старіння матеріалів внаслідок значних залишкових напружень. Крім цього, можна відзначити значну жорсткість таких систем за рахунок наявності кластерів, що передбачає різке поширення тріщин по контуру включень під час зовнішніх навантажень, особливо ударного характеру.

Поверхні склювання композитів з частками ПТАШ у кількості $q = 0,25$ мас.ч. (рис. б, в, г) і $q = 0,50$ мас.ч. (рис. б, д, е) є пологими, відзначаються в'язким характером руйнування. Утворені мікроструктури з полімерної матриці рівномірно розподілені як на поверхні, так і за об'ємом зразків. Це свідчить про поліпшені когезійні властивості розроблених матеріалів.

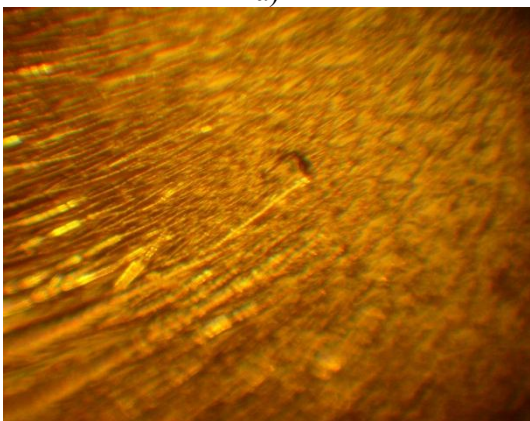
Аналіз фрактограм поверхні композитів, наповнених частками порошкової шихти у кількості $q = 2,00$ мас.ч. (рис. б, є, ж) дозволяє констатувати наступне. Поверхня зламу розрихлена, містить повітряні включення і тріщини (позначено стрілками). У першу чергу, як зазначали вище, це є причиною недостатнього змочування наповнювача внаслідок його надлишку у композиті. Це безумовно погіршує когезійні і відповідно механічні властивості епоксидних композитів.



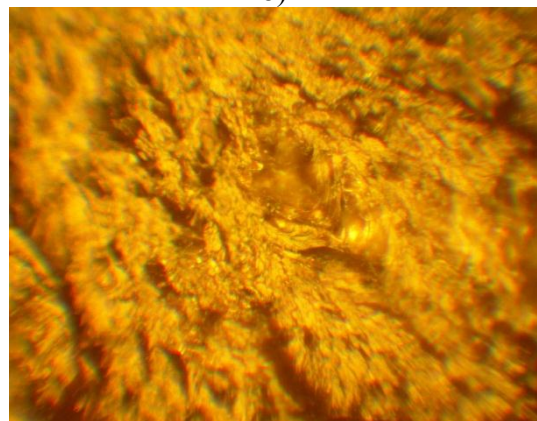
а)



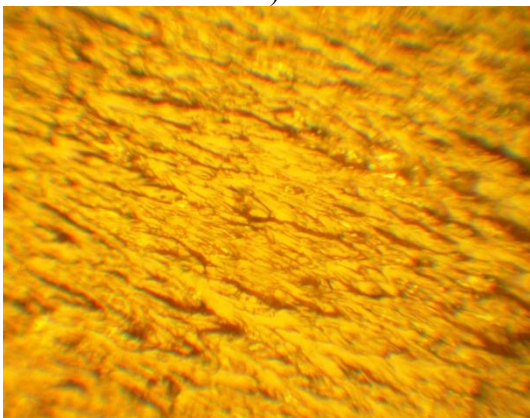
б)



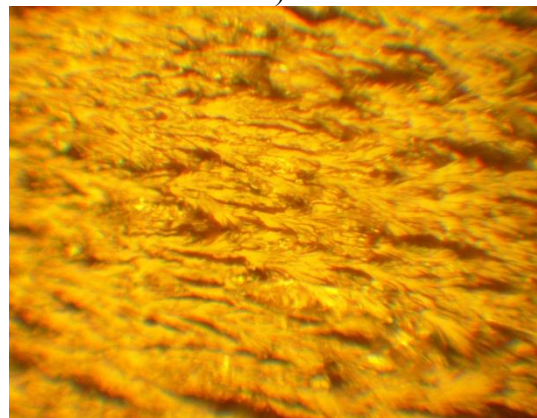
в)



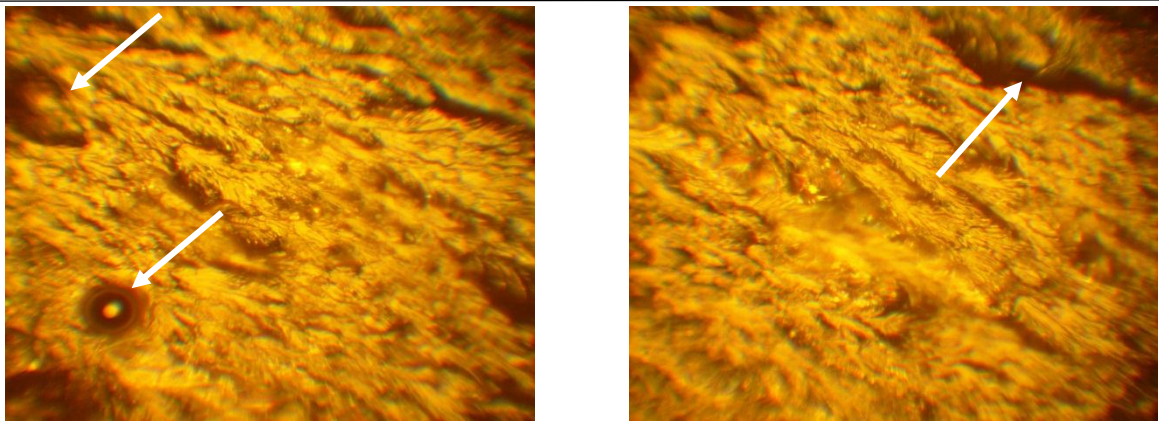
г)



д)



е)



є)

ж)

Рисунок 6 – Фрактограми зламу КМ із різним вмістом мікродисперсного наповнювача ПТАШ, q , мас.ч. на 100 мас.ч. епоксидного олігомеру ЕД-20 ($\times 50$): а, б) 0,05; в, г) 0,25; д, е) 0,50; є, ж) 2,00

Висновки. На основі проведених у роботі досліджень можна констатувати наступне.

1. Встановлено критичний вміст мікродисперсного наповнювача синтезованої порошкової титано-алюмінієвої шихти для формування епоксидних композитів з поліпшеними показниками адгезійної міцності. Доведено, що наповнення композитів дисперсними частками у кількості $q = 0,05$ мас.ч. на 100 мас.ч. епоксидного олігомеру ЕД-20 забезпечує підвищення показників адгезійної міцності при відриві матеріалів від $\sigma_a = 24,8$ МПа (для епоксидної матриці) до $\sigma_a = 38,0$ МПа, адгезійної міцності при зсуві від $\tau = 8,5$ МПа до $\tau = 10,8$ МПа, при цьому залишкові напруження збільшуються від $\sigma_3 = 1,4$ МПа до $\sigma_3 = 1,9$ МПа.

2. Встановлено оптимальний вміст синтезованої порошкової титано-алюмінієвої шихти для формування епоксидних композитів з поліпшеними механічними властивостями. Доведено, що наповнення композитів дисперсними частками у кількості $q = 0,25 \dots 0,50$ мас.ч. на 100 мас.ч. епоксидного олігомеру ЕД-20 забезпечує підвищення руйнівних напружень при згинанні матеріалів від $\sigma_{3z} = 48,0$ МПа (для епоксидної матриці) до $\sigma_{3z} = 67,3 \dots 75,2$ МПа, ударної в'язкості від $W = 7,4$ кДж/м² до $W = 9,9 \dots 10,4$ кДж/м², при цьому показники модуля пружності матеріалів практично не змінюються.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Buketov A.V. Nanomodified dispersed particles- and synthetic fibers-filled epoxy composite materials for the metal-polymer tribosystems of transport vehicles / A.V. Buketov, D.O. Zinchenko, S.O. Smetankin // *Nanomechanics Science and Technology: An International Journal*. – 2017. – Vol. 8. – P. 41-54.
2. Buketov A. Enhancing performance characteristics of equipment of sea and river transport by using epoxy composites / A. Buketov, P. Maruschak, O. Sapronov, D. Zinchenko, V. Yatsyuk, S. Panin // *Transport*. – 2016. – Vol. 31(3). – P. 333-342.
3. Букетов А.В. Влияние модификатора 4,4-сульфонилбис (4,1-фенилен)бис(н,н-диэтилдитиокарбамата) на адгезионные свойства эпоксидной матрицы / А.В. Букетов, С.А. Сметанкин // *Механика композиционных материалов и конструкций* – 2018. – Т.24. – № 2. – С. 242-265.
4. Букетов А.В. Розроблення епоксиполіефірної матриці з поліпшеними адгезійними та фізико-механічними властивостями зі застосуванням ізоціанатного модифікатора / А.В. Букетов, М.В. Браїло, С.В. Якущенко, В.М. Яцюк // *Фізико-хімічна механіка матеріалів*. – 2019. – 55, № 2. – С. 31–36.
5. Investigation of Tribological Properties of Two-Component Bidisperse Epoxy-Polyester Composite Materials for Its Use in the Friction Units of Means of Sea Transport / A. Buketov, M. Brailo, S. Yakushchenko, O. Sapronov, V. Vynar, O. Bezbakh, R. Negrutsa // *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*. – 2019. – Vol. 63. – N. 3. - PP. 171-182. <https://doi.org/10.3311/PPme.13161>.

6. Buketov A.V. Epoxy composite modifications influence on the energy activation's of thermal destruction / A.V. Buketov, S.A. Smetankin, A.V. Akimov, A.G. Kulinich // *Funct. Mater.* 2019; 26 (2): 403-411. doi.org/10.15407/fm26.02.403.

7. Buketov A. The use of complex additives for the formation of corrosion- and wear-resistant epoxy composites / A.Buketov, O.Sapronov, M.Brailo, D.Stukhlyak, S.Yakushchenko, N.Buketova, A.Sapronova, V.Sotsenko // *Advances in Materials Science and Engineering.* – Vol. 2019, Article ID 8183761, 5 pages, 2019. (<https://doi.org/10.1155/2019/8183761>).

8. Sizonenko O. Variation in the particle size of Fe–Ti–B₄C powders induced by high-voltage electrical discharge / O.Sizonenko, G.Baglyuk, A.Torpakov and other // *Powder Metallurgy and Metal Ceramics.* – 2012. – Vol 51, Issue 3. – P. 129-136.

9. Syzonenko O. Method of preparation of blend for aluminium matrix / O.Syzonenko, E.Shererii, S.Prokhorenko and other // *Composites by high voltage electric discharge. Machines. Technologies. Materials.* – 2017. – Vol. 11, Issue 4. – P. 171-173.

10. Сизоненко О.Н. Моделирование и анализ электроразрядных процессов в слое порошка Ti в керосине / О.Н.Сизоненко, В.А.Трегуб, Э.И.Тафтай и др. // *Вісник українського матеріалознавчого товариства. Київ.* – 2014. – Вип. 7. – С. 55-61.

REFERENCES

1. Buketov A.V. Nanomodified dispersed particles- and synthetic fibers-filled epoxy composite materials for the metal-polymer tribosystems of transport vehicles / A.V. Buketov, D.O. Zinchenko, S.O. Smetankin // *Nanomechanics Science and Technology: An International Journal.* – 2017. – Vol. 8. – P. 41-54.

2. Buketov A. Enhancing performance characteristics of equipment of sea and river transport by using epoxy composites / A. Buketov, P. Maruschak, O. Sapronov, D. Zinchenko, V. Yatsyuk, S. Panin // *Transport.* – 2016. – Vol. 31(3). – P. 333-342.

3. Buketov A.V. Vliyanie modifikatora 4,4-sul'fonilbis (4,1-fenilen)bis(n,n-diehtilditiokarbamata) na adgezionnihe svoystva ehpoksidnoy matricih / A.V. Buketov, S.A. Smetankin // *Mekhanika kompozitsionnykh materialov i konstruktsiy* – 2018. – T.24. – № 2. – S. 242-265.

4. Buketov A.V. Rozroblennia epoksyopoliefirnoi matrytsi z polipshenyi adheziinymi ta fizyko-mekhanichnymi vlastyvoistamy zi zastosuvanniam izotsianatnoho modyfikatora / A.V. Buketov, M.V. Brailo, S.V. Yakushchenko, V.M. Yatsiuk // *Fizyko-khimichna mekhanika materialiv.* – 2019. – # 2. – S. 31–36.

5. Investigation of Tribological Properties of Two-Component Bidisperse Epoxy-Polyester Composite Materials for Its Use in the Friction Units of Means of Sea Transport / A. Buketov, M. Brailo, S. Yakushchenko, O. Sapronov, V. Vynar, O. Bezbakh, R. Negrutza // *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering.* – 2019. – Vol. 63. – N. 3. – PP. 171-182. <https://doi.org/10.3311/PPme.13161>.

6. Buketov A.V. Epoxy composite modifications influence on the energy activation's of thermal destruction / A.V. Buketov, S.A. Smetankin, A.V. Akimov, A.G. Kulinich // *Funct. Mater.* 2019; 26 (2): 403-411. doi.org/10.15407/fm26.02.403.

7. Buketov A. The use of complex additives for the formation of corrosion- and wear-resistant epoxy composites / A.Buketov, O.Sapronov, M.Brailo, D.Stukhlyak, S.Yakushchenko, N.Buketova, A.Sapronova, V.Sotsenko // *Advances in Materials Science and Engineering.* – Vol. 2019, Article ID 8183761, 5 pages, 2019. (<https://doi.org/10.1155/2019/8183761>).

8. Sizonenko O. Variation in the particle size of Fe–Ti–B₄C powders induced by high-voltage electrical discharge / O.Sizonenko, G.Baglyuk, A.Torpakov and other // *Powder Metallurgy and Metal Ceramics.* – 2012. – Vol 51, Issue 3. – P. 129-136.

9. Syzonenko O. Method of preparation of blend for aluminium matrix / O.Syzonenko, E.Shererii, S.Prokhorenko and other // *Composites by high voltage electric discharge. Machines. Technologies. Materials.* – 2017. – Vol. 11, Issue 4. – P. 171-173.

10. Syzonenko O.N. Modelyrovanye y analizy elektrorazriadnykh protsessov v sloe poroshka Ti v kerosyne / O.N.Syzonenko, V.A.Trehub, Э.У.Тафтай y dr. // *Visnyk ukrainskoho materialoznavchoho tovarystva. Kyiv.* – 2014. – Vyp. 7. – S. 55-61

Сизоненко О. Н., Негруца Р. Ю., Торпаков А. С., Букетова Н. Н., Пилипчук Н. А. ВЛИЯНИЕ СИНТЕЗИРОВАННОЙ ПОРОШКОВОЙ ТИТАНО-АЛЮМИНИЕВОЙ ШИХТЫ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЭПОКСИКОМПОЗИТОВ ДЛЯ СРЕДСТВ МОРСКОГО И РЕЧНОГО ТРАНСПОРТА

Показано, что для улучшения антикоррозионных свойств и износостойкости средств морского и речного транспорта, военной техники, машиностроения, химической, нефтеперерабатывающей и газотранспортной промышленности необходимо использовать полимерные в том числе эпоксикомпозитные защитные покрытия. Эксплуатационные характеристики полимерных, в том числе эпоксидных, композитных материалов и защитных покрытий на их основе повышаются за счет введения нано- и микродисперсных наполнителей в виде порошков.

В работе для формирования композитных материалов и защитных покрытий для транспортной отрасли использован эпоксидный диановый олигомер ЭД-20, отвердитель полиэтиленполиамин ПЭПА и микродисперсные частицы синтезированной высоковольтным электроразрядом порошковой титано-алюминиевой шихты. Исследована зависимость содержания микродисперсного порошка на адгезионные, физико-механические свойства и остаточные напряжения эпоксидных композитов. Доказано, что для формирования композитного материала или защитного покрытия с улучшенными адгезионными и когезионными свойствами оптимальное содержание частиц составляет 0,05...0,50 масс.ч. на 100 масс.ч. эпоксидного олигомера ЭД-20.

Преимуществом разработки над зарубежными и отечественными аналогами является учет основных факторов агрессивных сред, в которых эксплуатируется технологическое оборудование, и разработка материалов, которые в комплексе отличаются высокими показателями физико-механических, теплофизических свойств, коррозионной стойкости и износостойкости. Исходя из этого, в эпоксидное связующее вводили активный к межфазному взаимодействию микродисперсный наполнитель, в том числе синтезированный высоковольтным электроискровым разрядом. При этом важным является определение критического содержания синтезированной высоковольтным электроразрядом порошковой титано-алюминиевой микродисперсной шихты при формировании защитных эпоксидных покрытий для средств морского и речного транспорта.

Ключевые слова: эпоксидный композит, модуль упругости, ударная вязкость, разрушающие напряжения при изгибе.

Sizonenko O. M., Negrutza R. Yu., Torpakov O. S., Buketova N. M., Pilypchuk N. A. INFLUENCE OF SYNTHESIZED POWDER TITANIUM-ALUMINUM CHARGE ON MECHANICAL PROPERTIES OF EPOXYCOMPOSITES FOR SEA AND RIVER TRANSPORT

It has been demonstrated that in order to improve anticorrosive properties and wear resistance of sea and river transport, military equipment, vehicle manufacturing, chemical, oil refining and gas industries, the utilization of polymeric epoxycomposite protective coatings is required. Polymer operational properties, including epoxy, composite materials and protective coatings based on them, have been improved due to introduction of pulverulent nano-and microdispersed fillers.

ED-20 epoxy diane oligomer, PEPA polyethylene polyamine hardener and microdispersed particles synthesized by high-voltage electrical discharge powder titanium aluminum charge have been utilized to form composite materials and protective coatings used in transport industry. The relationship between the content of microdispersed powder and adhesive, stress-related properties and residual stresses of epoxy composites has been investigated. It has been proved that in order to form a composite material or protective coating with improved adhesive and cohesive properties, the desirable particle content is to be 0.05...0.50 wt.h. per 100 wt.h. of ED-20 epoxy oligomer.

The advantage of the current development over foreign alternatives and those produced within the country is that it is possible to consider the main factors of corrosive environments where processing equipment is being operated, and development of materials, possessing high stress-related, heat-transfer, corrosion and wear resistance properties.

Given this, an interaction-active microdispersed filler synthesized by a high-voltage electrical spark discharge has been introduced into the epoxy binder. By doing so, it is of essential importance to determine the critical content of the synthesized by high-voltage electrical discharge titanium-aluminum microdispersed powder charge during formation of protective epoxy coatings for sea and river transport.

Key words: epoxy composite, modulus of elasticity, toughness, destructive bending stresses.

© Сизоненко О. М., Негруца Р. Ю., Торпаков А. С., Букетова Н. М., Пилипчук Н. А.

Статья подано
до редакції 17.04.19

ОТРИМАННЯ КОМПЛЕКСНИХ ЛІГАТУР НА ОСНОВІ МАРГАНЦЮ МЕТОДОМ РОЗПИЛЕННЯ РОЗПЛАВУ ВОДОЮ

Терновий Ю. Ф., д.т.н., професор, завідувач кафедри металургії Запорізького національного університету;

Воденнікова О. С., к.т.н., доцент кафедри металургії Запорізького національного університету, ORCID ID: 0000-0003-0496-5435;

Білан В. І., мол.н.сп. ДП «УкрНДІспецсталь»

Запропоновано технологію отримання комплексних лігатур складного хімічного складу шляхом водного розпилення сплавів та отримання суміші замість механічного дроблення простих феросплавів. Одержані комплексні лігатури системи Mn-Si-Mo-Ni, Mn-Mo-Ni, Mn-Mo-Ni-Ti, Mn-Si-Mo-Ni-Ti, Mn-Si-Mo-Ni та Mn-Si-Ni-Cr-Mo при тиску розпилення води до 5,5 МПа мають високу плинність і дрібнодисперсність фазового складу та забезпечують гартування в межах 10^5 – 10^7 К/с. Використання порошкових комплексних лігатур на основі марганцю при виготовленні порошкового дроту дозволяє досягнути високих технологічних і механічних характеристик зварних з'єднань, особливо при їх експлуатації в умовах низьких температур, та покращити екологічний стан, знизити пожежо- та вибухонебезпечність за рахунок пасивування порошку при розпиленні розплаву водою високого тиску.

Ключові слова: металевий порошок, розпилений порошок, комплексна лігатура, частинка, водяне розпилення, лігатура на основі марганцю, розплавлений метал, зварювальні з'єднання.

DOI: 10.33815/2313-4763.2019.1.20.162-167

Вступ. Аналіз сучасних методів отримання порошкових лігатур [1–6] показав, що найбільш перспективними за продуктивністю й ефективністю використання в промисловості є процеси розпилення розплавлених металів стисненими газами, водою високого тиску і відцентровим методом. Методи розпилення рідких металів дозволяють регулювати технологічні, механічні й інші властивості, в залежності від їх подальшого застосування.

У роботах [7, 8] запропоновано отримання порошків комплексних лігатур розпиленням струменя розплаву водою високого тиску. Зокрема, отримання порошку середньовуглецевого феромарганцю [9] методом розпилення струменя розплаву дозволяє зменшити вихід пиловидної фракції при одночасному пасивуванні порошку.

Мета роботи – розробка способу отримання порошків комплексних лігатур на основі марганцю методом розпилення розплаву водою.

Методика дослідження. Гранулометричний склад порошків комплексних лігатур системи Mn-Si-Mo-Ni, Mn-Mo-Ni, Mn-Mo-Ni-Ti, Mn-Si-Mo-Ni-Ti, Mn-Si-Mo-Ni та Mn-Si-Ni-Cr-Mo визначався ситовим методом згідно з ГОСТом 18318-94, насипну щільність порошків визначали згідно ГОСТ 19440-94, плинність згідно ГОСТ 20899-98.

Форму розпилених частинок комплексних лігатур вивчали за допомогою оптичного стереомікроскопу «TEKNIVAL» та скануючого електронного мікроскопу «Stereoscan S-4». Мікроструктуру частинок вивчали на мікроскопі «Neophot-2». Масову долю в литих пробах та розпиленому порошку визначали хімічними методами аналізу.

Механічні властивості комплексних лігатур визначали за загальноприйнятою методикою: випробування на розтягування – згідно ГОСТ 1497-84, випробування на ударний вигін – згідно з ГОСТом 9454-78. Механічні властивості зварних з'єднань визначали згідно з ГОСТом Р 57180-2016.

Основні результати дослідження. В умовах ДП «УкрНДІспецсталь» широко використовується метод розпилення струму розплаву водою високого тиску з наступним зневодненням та сушінням [10]. Кожна частинка комплексної лігатури у своєму обсязі вміщує легуючі елементи, розкислювачі та модифікатори. Виготовляють порошки наступних систем: Mn-Si-Mo-Al-Fe, Mn-Si-Mo-Fe, Mn-Mo-Ni-Ti-Fe, Mn-Ni-Si-Cr-Mo-Fe, Cr-Si-Ti-Mn-Mo-Fe, Mn-Mo-Ni-Ti-Al-Fe, Mn-Mo-Ni-Fe, Mn-Si-Mo-Ni-Ti-Fe, Mn-Si-Cr-Ti-V-Fe та Cr-Mn-Ni-Si-Fe. Використання порошків, розпилених водою, для зварної техніки усуває

спучування електродної маси, не утруднює опресовування та термообробку електродів та екструзію дроту, покращує екологічний стан, знижує пожежо- та вибухонебезпечність за рахунок пасивування порошку при розпиленні.

Дослідження технологічних режимів отримання порошоків на основі марганцю системи (табл. 1) проводили на дослідній лінії ДП «УкрНДІспецсталь» з виробництва водорозпиленних порошоків (рис. 1) [10]. Процес включав відкриту індукційну плавку (в індукційній печі МГП-52 з ємністю тигля 30 кг), розпилення струменя розплаву водою на УВР-1 при тиску не більше 5,5 МПа, зневоднення, сушіння, видалення робочої фракції. У якості шихтових матеріалів при виплавці комплексних лігатур використовували: марганець металевий марки Мр-2, феромарганець марки ФМн1,5, феромолібден марки ФМо60, нікель марки Н2, кремній кристалічний марки Кр-1 і феротитан марки ФТи65. Для наведення шлаку використовували вапно. Розкислення ванни печі перед присадкою кремнію та феротитану, а також перед випуском розплаву проводили порошком алюмінію та силікокальцію.

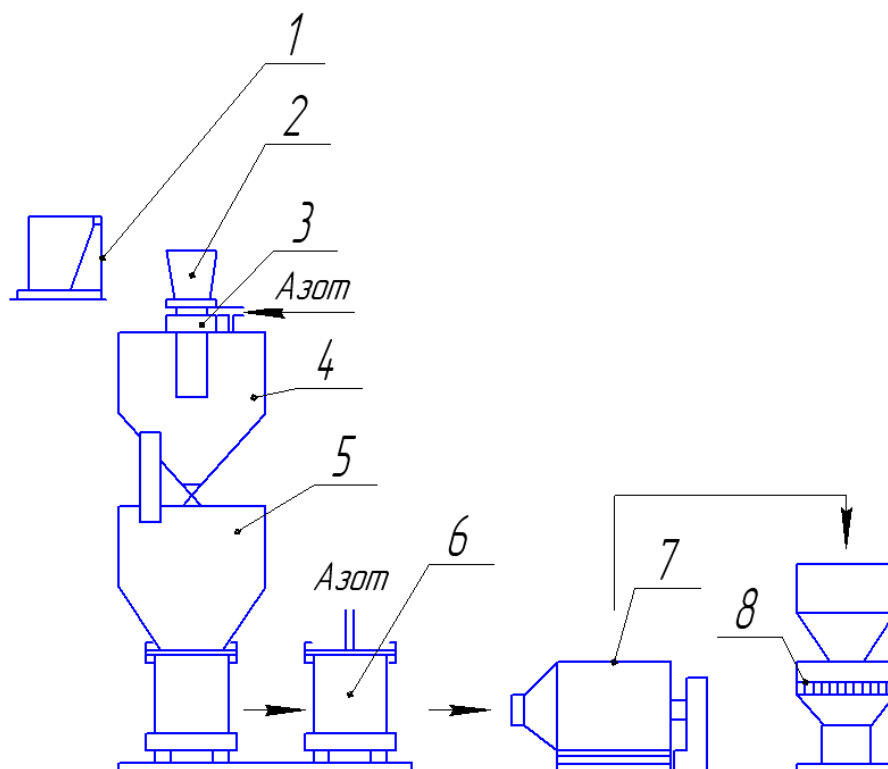


Рисунок 1 – Схема дослідної лінії з виробництва водорозпиленних порошоків:
1 – індукційна піч; 2 – металопримач; 3 – вузол, що розпилює; 4 – камера розпилення; 5 – камера відстоювач; 6 – порошкопримач; 7 – вакуумний сушильний барабан; 8 – сито

Хімічний склад комплексних лігатур на основі марганцю та вміст у них газів приведено в табл. 1. и табл. 2.

Таблиця 1 – Хімічний склад комплексних лігатур на основі марганцю

Склад лігатури	Масова доля елементів, %					
	Mn	Si	Mo	Ni	Ti	Fe
Mn-Si-Mo-Ni	53,2	11,63	9,63	17,4	-	інше
Mn-Mo-Ni	62,4	-	8,35	9,9	-	інше
Mn-Mo-Ni-Ti	55,4	-	7,87	9,9	3,54	інше
Mn-Si-Mo-Ni-Ti	48,7	9,22	7,24	11,5	7,00	інше
Mn-Si-Mo-Ni	53,3	12,85	8,00	18,2	-	інше

Відпрацювання технології розпилення проводили на форсунці кільцевого типу при тиску води у процесі не більше 5,5 МПа. Розпилення проводили шляхом подання розплаву заданого хімічного складу з печі через металопримач та його донний зливний патрубок з

калібрувальним отвором у зону дії водяної форсунки. Час розпилення складав 5–7 хв. Для оптимізації гранулометричного складу та форми частинок змінювали тиск води, витрату води та розплаву, геометричні параметрами форсунки.

В дослідних плавках отримано наступне засвоєння елементів з шихти: кремнію – 92–95 %, молібдену – 98–99 %, нікелю – 100 %, титану – 90–93 %, марганцю – 95–97 %.

Таблиця 2 – Вміст газів у комплексних лігатурах на основі марганцю

Склад лігатури	Масова доля кисню (%) у порошку фракції, мм			Масова доля водню (%) у порошку фракції -160 + 100 мм
	-315+200	-160 + 100	- 50	
Mn-Si-Mo-Ni	1,95	2,00	2,40	0,0032
Mn-Mo-Ni	1,50	1,75	2,44	0,0024
Mn-Mo-Ni-Ti	1,77	1,86	2,03	0,0074
Mn-Si-Mo-Ni-Ti	1,35	0,63	0,42	0,0042
Mn-Si-Mo-Ni	0,265	0,445	0,630	0,0044

З даних табл. 2 видно, що зі зменшенням розміру фракції порошку на основі марганцю закономірності підвищення в них вмісту кисню не спостерігаються.

Мікроструктурний аналіз зразків лігатури Mn-Mo-Ni показав, що наряду з частинками дендритно-коміркової структури спостерігаються точкові та пластинчасті утворення (рис. 2, а). У порошку, що вміщує титан (лігатури системи Mn-Mo-Ni-Ti та Mn-Si-Mo-Ni-Ti), мікроструктура в основному коміркова, при цьому зустрічаються окремі дрібні дендрити (рис. 2, б, в). У порошку, що вміщує кремній (лігатура Mn-Si-Mo-Ni) при відсутності титану спостерігається коміркова мікроструктура зі слабо виявленими границями комірок (рис. 2, г).

При дослідженні проби порошку знайдені шлакові частинки, при цьому найбільша їхня кількість спостерігається у порошках системи Mn-Mo-Ni та Mn-Si-Mo-Ni.

Гранулометричний склад розпиленого порошку комплексної лігатури Mn-Si-Ni-Cr-Mo приведено в табл. 3. Мікроструктурний аналіз зразків лігатури Mn-Si-Ni-Cr-Mo показав на розгалужену та округлу форми частинок.

Використання порошкової комплексної лігатури системи Mn-Si-Ni-Cr-Mo при виготовленні самозахисного порошкового дроту карбонатно-флюоритного типу ПП-АН30с для зварювання трубних марок сталей типу Х70 дозволяє досягнути високого рівня механічних властивостей зварювального з'єднання, особливо при знижених температурах (табл. 4).

Таблиця 3 – Гранулометричний склад розпиленого порошку комплексної лігатури Mn-Si-Ni-Cr-Mo

Розмір частинок, мм	-0,63 + 0,4	- 0,4 + 0,063	- 0,063
Вихід фракції, %	5	70-80	15-25

Таблиця 4 – Механічні властивості зварювального з'єднання з використанням дроту з комплексною лігатурою Mn-Si-Ni-Cr-Mo

σ _т , МПа	σ _в , МПа	δ, %	Ψ, %	KCV, Дж/см ² при t _{вип.} , С ⁰			
				+20	-20	-40	-60
490-520	643-674	26-27	64	130 – 135	92 – 97	75 – 92	54 – 67
				132	94	86	62

Випробування зварювально-технологічних властивостей комплексних лігатур системи Mn-Si-Mo-Ni, Mn-Mo-Ni, Mn-Mo-Ni-Ti, Mn-Si-Mo-Ni-Ti, Mn-Si-Mo-Ni та Mn-Si-Ni-Cr-Mo показали на зниження газовиділення при виготовленні обмазувальної маси в 10–30 разів, що виключає її спучування при виготовленні електродів, підвищення ударної в'язкості зварного шву в 1,3-2 рази при негативній температурі за рахунок введення розпиленого феромарганцю, можливість використання добавки в електродний дріт однієї комплексної лігатури замість трьох простих компонентів лігатури, що раніше

використовувалися.

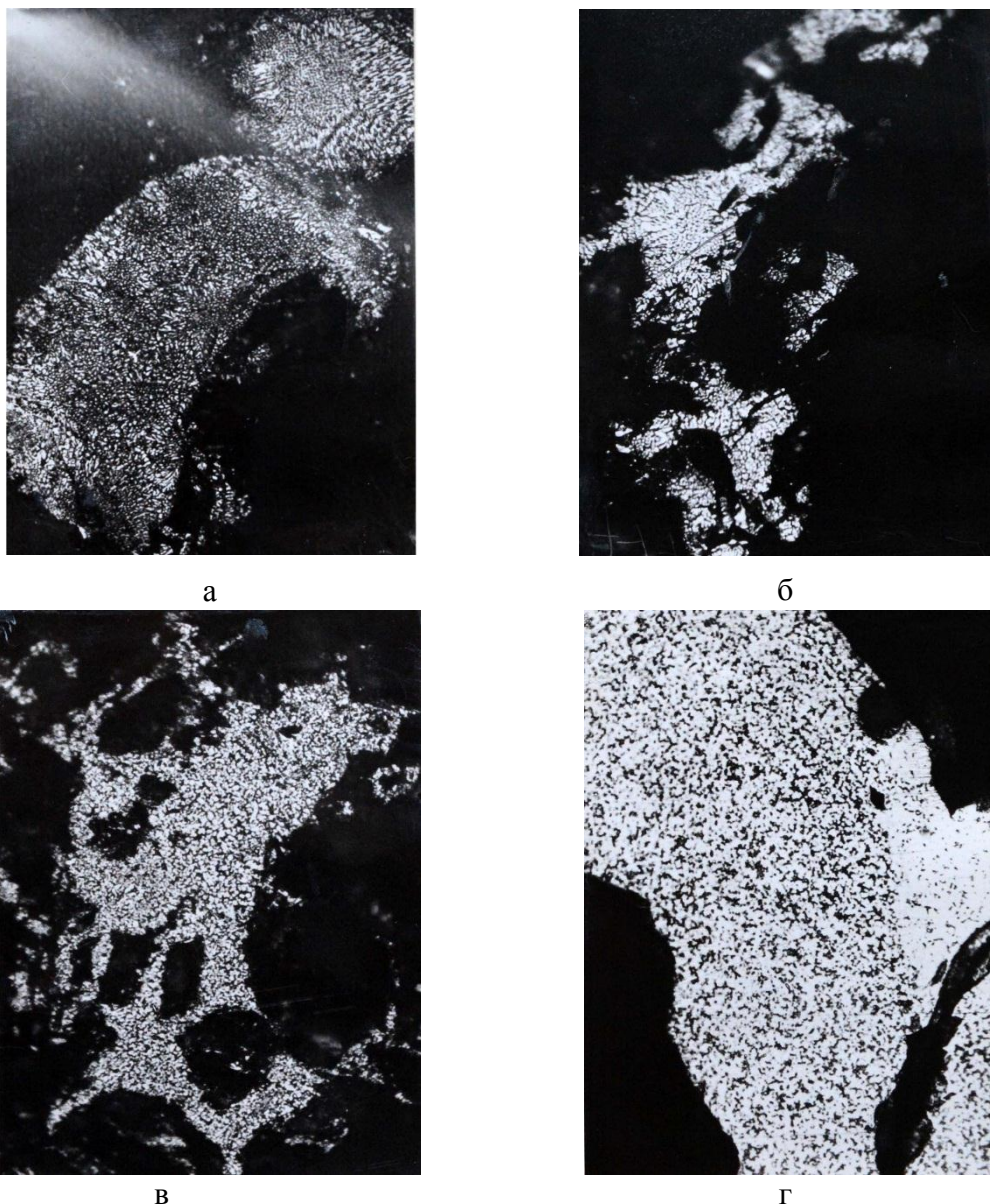


Рисунок 2 – Мікроструктура порошкових частинок, х 500: а – лігатура Mn-Mo-Ni; б – лігатура Mn-Mo-Ni-Ti; в – лігатура Mn-Si-Mo-Ni-Ti; г – лігатура Mn-Si-Mo-Ni

Висновки. У результаті експериментальних досліджень було встановлено:

1. Використання комплексних лігатур системи Mn-Si-Mo-Ni, Mn-Mo-Ni, Mn-Mo-Ni-Ti, Mn-Si-Mo-Ni-Ti, Mn-Si-Mo-Ni та Mn-Si-Ni-Cr-Mo у якості добавки в електродний дріт доцільніше, ніж використання окремих складових компонентів комплексних лігатур.
2. Використання розпилених порошоків сплавів замість механічного дроблення окремих за хімічним складом простих феросплавів та їх суміші призводять до однорідної структури та підвищення технологічних параметрів і якості електродів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Ничипоренко О. С. Распыленные металлические порошки / Ничипоренко О. С., Найда М. Ю., Медведовский А. Б. – К.: Наукова думка, 1980. – 239 с.
2. Ничипоренко О. С. Формирование частиц порошка при распылении расплава водой / О. С. Ничипоренко // Порошковая металлургия, 1976. – №9. – С. 5–10.
3. Металлические порошки и порошковые материалы / [Бабич Б. Н., Вершинина Е. В., Глебов В. А. и др.]; под ред. Ю. В. Левинского. - М: ЭКОМЕТ, 2005. – 520 с.
4. Либенсон Г. А. Процессы порошковой металлургии. В 2-х т. Том 1. Производство

металлических порошков: учебн. для вузов/ Либенсон Г. А., Лопатин В. Ю., Комарницкий Г. В. – М.: МИСИС, 2001. – 368 с.

5. Фишман Б. Д. Новые методы получения металлических порошков / Б. Д. Фишман, С. Г. Короткое. – Киев: ИПМ АН СССР, 1981. – С. 144–146.

6. Промышленное получение порошков ферросилиция методом распыления расплава / П. Ф. Снежко, Н. М. Дезанов, А. Ф. Матюшено А.Ф. [и др.] // Порошковая металлургия. – 1971. – №4. – С. 81–85.

7. Терновой Ю. Ф. Инженерные расчёты технологических процессов распыления расплавленных металлов: монография / Терновой Ю. Ф., Кудиевский С. С., Пашетнева Н. Н. – Запорожье: Запор. гос. инж. ак., 2005. –150 с.

8. Получение порошков комплексных лигатур распылением расплава водой высокого давления / Ю. Ф. Терновой, В. И. Билан, Т. Б. Погожин [и др.] // Новые материалы и технологии в порошковой металлургии. 5-я Национальная научно-техническая конференция: резюме докладов. – София (НРБ), 1990. – С. 31–32.

9. Способ получения пассивированного порошка среднеуглеродистого ферромарганца: а.с. №1603649, СССР, А1 В22 F9/08. Терновой Ю.Ф., Билан В.И., Александров А.П. Заявитель «УкрНИИспецсталь». Заявл. 27.10.88.

10. Терновой Ю. Ф. Технологии и оборудование «УкрНИИспецстали» для производства распыленных металлических порошков / Ю. Ф. Терновой, Н. Н. Пашетнева, А. А. Кононенко [и др.] // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2005. – №6. – С. 84–88.

REFERENCES

1. Nichiporenko, O. S., Najda, Ju. I., & Medvedovskij, A. B. (1980) *Raspylennye metallicheskie poroshki*. Kiev : Naukova dumka.

2. Nichiporenko, O. S. (1976) Formoobrazovanie chastits poroshka pri raspylenii rasplava vodoj. *Poroshkovaja metallurgija*, 9, 5–10.

3. Babich, B. N., Verzhinina, Ye. V., Glebov, V. A. et al. (2005) *Metallicheskie poroshki i poroshkovye materialy*. Moscow: ECOMET.

4. Libenson, G. A., Lopatin, V. Yu., & Komarnitskij, G. V. (2001) *Processy poroshkovej metallurgii. Vol.1. Proizvodstvo metallicheskikh poroshkov*. Moscow : MISIS.

5. Fishman, B. D., & Korotkov, S. G. (1981) *Novye metody poluchenija metallicheskikh poroshkov*. Kiev : IPM AN SSSR, 144–146.

6. Snezhko, P. F., Dezanov, N. M., & Matjushenko, A. F. et al. (1971) Promyshlennoe poluchenie poroshkov ferrosilitsija metodom raspylenija rasplava. *Poroshkovaja metallurgija*, 4, 81–85.

7. Ternovoj, Yu. F., Kudievskij, S. S., & Pashetneva, N. N. (2005) *Inzhenernye pascheti tehnologicheskikh protsessov raspylenija rasplavlennykh metallov*. Zaporozhje : ZGIA.

8. Ternovoj, Yu. F., Bilan, V. I., & Pogozhin, T. B. et al. (1990) Poluchenie poroshkov kompleksnykh ligatur raspyleniem rasplava vodoj vysokogo davlenija : V Nats. nauch.-tehnic. konf. *Novye materialy i tehnologii v poroshkovej metallurgii*. Sofija, 31–32.

9. Ternovoj, Yu. F., Bilan, V. I., & Aleksandrov, A. P. (1988) *Sposob poluchenija passivirovannogo poroshka sredneuglerodistogo ferromargantsa*. A.C. 1603649, SSSR.

10. Ternovoj, Yu. F., Pashetneva, N. N. Kononenko, A. A. & Kurpatchenko, A. B. (2005) Tekhnologii i oborudovanie “UkrNIIspechstali” dlja proizvodstva raspylennykh metallicheskikh poroshkov. *Metallurgicheskaja i gornorudnaja promyshlennost*, №6, 84–88.

Терновой Ю. Ф., Воденникова О. С., Билан В. И. ПОЛУЧЕНИЕ КОМПЛЕКСНЫХ ЛИГАТУР НА ОСНОВЕ МАРГАНЦА МЕТОДОМ РАСПЫЛЕНИЯ РАСПЛАВА ВОДОЙ

Предложена технология получения комплексных лигатур сложного химического состава путем водного распыления сплавов и получения смеси вместо механического дробления простых ферросплавов. Полученные комплексные лигатуры системы Mn-Si-Mo-Ni, Mn-Mo-Ni, Mn-Mo-Ni-Ti, Mn-Si-Mo-Ni-Ti, Mn-Si-Mo-Ni и Mn-Si-Ni-Cr-Mo при давлении распыления воды до 5,5 МПа имеют высокую текучесть и мелкодисперсность фазового состава, и обеспечивают закалку в пределах 10^5 - 10^7 К/с. Использование порошковых комплексных лигатур на основе марганца при изготовлении порошковой проволоки позволяет достичь высоких технологических и механических характеристик сварных соединений, особенно при их эксплуатации в условиях низких температур, и улучшить экологическую обстановку, снизить пожаро- и взрывоопасность за счет пассивирования порошка при распылении расплава водой высокого давления.

Ключевые слова: *металлический порошок, распыленный порошок, комплексная лигатура, частица, водное распыление, лигатура на основе марганца, расплавленный металл, сварочные соединения.*

Ternovyi Yu. F., Vodennikova O. S., Bilan V. I. OBTAINING COMPLETE MANGANESE-BASED ADDITION ALLOYS BY UTILIZING THE SPUTTERING METHOD OF LIQUID-ALLOY BY WATER

Technology of obtaining complex ligatures by means water atomization of alloys as opposed to mechanical crushing individual ferroalloys is proposed. Complex ligatures based on manganese such as Mn-Si-Mo-Ni, Mn-Mo-Ni, Mn-Mo-Ni-Ti, Mn-Si-Mo-Ni-Ti, Mn-Si-Mo-Ni and Mn-Si-Ni-Cr-Mo obtained at pressure of water up to 5,5 MPa have high fluidity, fine size of phases, and ensure quenching rate within 10^5 - 10^7 K/s. Using powder complex ligatures based on manganese at production of powder wire it is possible to achieve high technological and mechanical properties of welded joint, in particular in operating at low temperatures, and to improve ecological status, fire and explosion safety due to passivating powders during high pressured water atomization of melts. As a result of the experimental studies it was found: 1. The use of complex ligatures of the system Mn-Si-Mo-Ni, Mn-Mo-Ni, Mn-Mo-Ni-Ti, Mn-Si-Mo-Ni-Ti, Mn-Si-Mo-Ni and Mn-Si-Ni-Cr-Mo as an additive in the electrode wire is more appropriate than the use of individual components of the complex ligatures. The use of sputtered alloy powders instead of mechanical crushing of simple ferroalloys of their own chemical composition and their mixtures lead to a homogeneous structure and increase of technological parameters and quality of the electrodes.

Keywords: *metal powder, dispersed powder, complete addition alloy, particle, water sputtering, manganese-based addition alloy, molten metal, welded joints.*

© Терновий Ю. Ф., Воденнікова О. С., Білан В. І

Статтю прийнято
до редакції 13.05.19

ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ МАТЕРІАЛІВ

До друку приймаються статті з результатами власних оригінальних досліджень, що мають наукову і практичну значущість і не публікувалися досі. До друку **не приймаються суто оглядові статті**. Відповідальність за зміст статті несе автор.

Згідно з вимогами п. 3 Постанови Президії Вищої Атестаційної Комісії України № 7-05/1 від 15.01.2003 р., наукові статті, що надаються до друку, повинні містити наступні елементи: постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями; аналіз останніх досліджень і публікацій, у яких започатковано розв'язання даної проблеми, на які посилається автор; виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, яким присвячується стаття; формулювання цілей статті (постановка завдання); викладення основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів; висновки щодо даного дослідження та перспективи подальших наукових досліджень у даному напрямку.

Обсяг статей – до 10 сторінок, включаючи всі матеріали, у т. ч. таблиці, рисунки, графіки та список літературних джерел. Сумарний обсяг рисунків і таблиць повинен бути не більше 30% обсягу основної частини.

Оформлення статті. На першій сторінці рукопису зазначається код УДК, назва роботи, прізвище, ініціали та науковий ступінь (звання) автора(ів).

Код УДК – по лівому краю, розмір шрифту – 10.

Назва – по центру друкованими літерами (шрифт жирний, розмір шрифту – 14).

Інформація про автора(ів): прізвище, ініціали, науковий ступінь, вчене звання, повна назва установи або громадської організації, посада, держава, ORCID автора – курсивом, по лівому краю, розміром шрифту 12.

Текст надається у форматі редактора MS Word шрифтом Times New Roman, розмір шрифту – 12, інтервал – 1.

Параметри сторінки (опція меню ФАЙЛ, Параметри сторінки):

розмір паперу – А4: 210*297 мм;

орієнтація аркуша – книжна (альбомна не допускається);

поля – 2 см;

палітурка – 0 см;

колонтитули – 1,3 см;

абзацний відступ – 1,25 см, вирівнювання за шириною, сторінки без нумерації.

Формули повинні бути набрані за допомогою вбудованого редактора формул Equation Editor. Всі формули вставляються в таблицю з неокресленим контуром, що складається з двох колонок: у першій знаходиться формула без абзацу і вирівняна по центру, у другій – номер формули (якщо такий є) теж без абзацу і з вирівнюванням по центру. Межа між колонками таблиці встановлюється на позначці 14 см.

Це стосується також формул і символів формул, які стоять по тексту. Параметри в редакторі формул повинні в точності відповідати наведеним

нижче. Розміри (опція меню редактора Equation Editor: РОЗМІР, Визначити ...):

- Звичайний 12 пт.
- Крупний індекс 7 пт.
- Дрібний індекс 5 пт.
- Крупний символ 18 пт.
- Дрібний символ 12 пт.

Таблиці набираються у Microsoft Word.

Рисунки повинні бути чорно-білими, бажано прозорими, і вставлені у файл і роздруківку статті. Формат рисунків (tif, psx, bmp тощо) повинен бути сумісний з редактором тексту Microsoft Word. Роздільна здатність рисунків – не менше 300 dpi.

Структура статті: вступ (постановка задачі або проблеми); рішення задачі (мета, задачі, об'єкти, предмети, методи дослідження); основні результати та висновки з перспективами; список використаних літературних джерел. Основні розділи можуть мати назви, відмінні від приведених вище найменувань.

Список використаної літератури подається загальним списком у кінці рукопису (послідовність – у порядку згадування по тексту) згідно зі встановленими вимогами стандарту ДСТУ ГОСТ 7.1:2006. У списку повинно бути не менше 10 джерел, у списку посилань неприпустимо використання ГОСТів та загальнонаціональних стандартів, відсоткове співвідношення самоцитуювання – не більше 30% (тобто якщо Ви використали 10 посилань, з них може бути не більше 3 на роботи автора).

До статті також наводиться перелік літератури латиницею (*References*), для його оформлення використовувати APA-стиль. Список літератури транслітерується або перекладається англійською мовою. Транслітерувати інформацію необхідно відповідно до постанови Кабінету Міністрів України від 27.01.2010 «Про впорядкування транслітерації українського алфавіту латиницею» (транслітерацію української мови можна здійснити за посиланням <http://translit.kh.ua> [обрати стандарт: Паспортний (КМУ 2010)]). Транслітерувати джерела, які пишуться латиницею не потрібно.

Структуровані анотації українською, російською та англійською мовами обсягом від 1800 знаків надаються: на мові оригіналу статті перед вступом, на двох інших мовах – після тексту статті. У кінці анотацій наводяться ключові слова.

Документи, що подаються до редакції.

Для публікації автор повинен надати до відділу технічної інформації ХДМА:

- Комп'ютерний варіант статті – файл, набраний у редакторі Microsoft Word;
- файл кожного рисунка, включеного в статтю, окремо;
- рукопис статті (на паперовому носії), підписаний автором(ами) – 2 примірники.

Крім тексту статті автором(ами) надаються:

- структурована анотація та ключові слова українською, англійською і російською мовами, включаючи назву статті та прізвища авторів трьома мовами – на окремій сторінці;
- ліцензійний договір;
- відомості про авторів (прізвище, ім'я, по батькові, вчений ступінь, вчене звання, місце роботи, посада, домашня або службова адреса, контактний телефон, e-mail, наукові інтереси авторів, ORCID автора(ів)) – на окремій сторінці.

Редакційна колегія залишає за собою право як не публікувати роботи у разі їх відхилення, так і приймати рішення щодо їх відповідності напрямом журналу. Рукописи авторам не повертаються.

ЗМІСТ

МОРСЬКИЙ ТА РІЧКОВИЙ ТРАНСПОРТ

- Бражник И. Д.** 4
 ИЗМЕНЕНИЕ РАБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК
 СИСТЕМЫ ИНЕРТИЗАЦИИ ТАНКЕРА ЗА СЧЕТ
 ПРИНУДИТЕЛЬНОЙ ПОДАЧИ ГАЗОВ
- Годованюк С. П., Селиванов С. Е.** 12
 МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПОИСКОВО-СПАСАТЕЛЬНОЙ
 ОПЕРАЦИИ ПО СПАСЕНИЮ ЛЮДЕЙ В МОРСКОЙ ЗОНЕ
 ОТВЕТСТВЕННОСТИ УКРАИНЫ
- Иванов А. А., Тимофеев К. В., Авраменко Н. Н., Растегина Г. И.** 20
 ТРЕНАЖЕР ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ
 ПОДГОТОВКИ СУДОВЫХ СПЕЦИАЛИСТОВ
- Nosov P. S., Zinchenko S. M., Ben A. P., Nahrybelnyi Ya. A.,
 Dudchenko O. M.** 31
 MODELS OF DECISION MAKING BY A NAVIGATOR UNDER IMPLICIT
 AGREEMENTS WITH COLREG RULES
- Товстокорый О. Н., Нестеренко В. Б., Завальнюк О. П.** 40
 ОСОБЕННОСТИ КОНТРОЛЯ ОСТОЙЧИВОСТИ БУКСИРНЫХ СУДОВ
 ПРИ МАНЕВРИРОВАНИИ НА ШЕЛЬФЕ

ІНЖЕНЕРІЯ У ТРАНСПОРТНІЙ ГАЛУЗІ

- Самарін О. Є.** 48
 МАХОВИК ДВИГУНА ЗІ ЗМІННИМ МОМЕНТОМ ІНЕРЦІЇ
- Худяков И. В., Грицук И. В., Погорлецкий Д. С., Манжелей В. С.** 55
 ДИАГНОСТИРОВАНИЕ СУДОВОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ
 УСТАНОВКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТРЕНАЖЕРНОГО
 КОМПЛЕКСА ERS-500 TECHSIM TRANSAS MIP LTD
 В ПРОЦЕССЕ ПОДГОТОВКИ КУРСАНТОВ ХГМА
- Чейлитко А. О., Ільїн С. В., Черненко А. В., Іванісова А. П.** 64
 РОЗРОБКА КОНСТРУКТИВНИХ ЗАХОДІВ ДЛЯ ЗАХИСТУ
 ОБ'ЄКТІВ МІСЬКОЇ ЗАБУДОВИ ВІД ШУМУ

АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ

- Барабаш О. В.** 71
 ОЦІНКА ЕКОЛОГІЧНОЇ НЕБЕЗПЕКИ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ
 УРБОЕКОСИСТЕМИ ЗА СТАНОМ ДЕПОНУЮЧОГО СЕРЕДОВИЩА
- Врублевський Р. Є.** 79
 ІНФОРМАЦІЙНА СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ МАГНІТНО-
 ІМПУЛЬСНОЮ ОБРОБКОЮ ДЕТАЛЕЙ СУДНОВИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ
 УСТАНОВОК

Ищенко І. М., Голощанов С. С. АНАЛІЗ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ЧАСТОТИ З ЕЛЕКТРИЧНИМ ТА МАГНІТНИМ ПІДСУМОВУВАННЯМ ВИХІДНИХ НАПРУГ І МАГНІТНИХ ПОТОКІВ	87
Nahovskyi D. A., Doschenko G. G. CONTROL METHODS OF VESSEL'S THRUSTER AT CHANGING OPERATING CONDITIONS	97
Половинка Э. М., Слободянюк Н. В. ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ДИНАМИЧЕСКИХ БЕЗМОТОРНЫХ ИСПЫТАНИЙ ТОПЛИВНОЙ АППАРАТУРЫ ДИЗЕЛЕЙ	109
Хлопенко Н. Я., Рожков С. А., Хлопенко И. Н. ФИЛЬТРАЦИЯ ПОМЕХ РОБАСТНЫМ РЕГУЛЯТОРОМ В СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ ПОТОКОСЦЕПЛЕНИЕМ РОТОРА	122
<i>МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО</i>	
Браїло М. В., Кобельник О. С., Сапронов О. О., Аппазов Е. С., Ludmila Dulebová ЕПОКСИ-ПОЛІЕФІРНІ КОМПОЗИТИ З ПІДВИЩЕНИМИ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ДЛЯ РЕМОНТУ ЕЛЕМЕНТІВ СУДНОВИХ ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ	134
Сапронова А. В. ВПЛИВ ВМІСТУ ОРГАНІЧНИХ ВОЛОКОН В ЕПОКСИДНОМУ ЗВ'ЯЗУВАЧІ НА ПОКАЗНИКИ АДГЕЗІЙНОЇ ТА КОГЕЗІЙНОЇ МІЦНОСТІ ПОКРИТТІВ ТРАНСПОРТНОЇ ТЕХНІКИ	141
Сизоненко О. М., Негруца Р. Ю., Торпаков А. С., Букетова Н. М., Пилипчук Н. А. ВПЛИВ СИНТЕЗОВАНОЇ ПОРОШКОВОЇ ТИТАНО-АЛЮМІНІЄВОЇ ШИХТИ НА МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ЕПОКСИКОМПОЗИТІВ ДЛЯ ЗАСОБІВ МОРСЬКОГО ТА РІЧКОВОГО ТРАНСПОРТУ	151
Терновий Ю. Ф., Воденнікова О. С., Білан В. І ОТРИМАННЯ КОМПЛЕКСНИХ ЛІГАТУР НА ОСНОВІ МАРГАНЦЮ МЕТОДОМ РОЗПИЛЕННЯ РОЗПЛАВУ ВОДОЮ	162
ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ МАТЕРІАЛІВ	168

CONTENTS

SEA AND RIVER TRANSPORT

- Brazhnik I. D.** 4
CHANGE OF OPERATING CHARACTERISTICS OF TANKER
INERTIZATION SYSTEM BY USE OF FORCED GAS SUPPLY
- Godovanuk S.P., Selivanov S. E.** 12
MATHEMATICAL MODEL OF SEARCH AND RESCUE OPERATION TO
SAVE PEOPLE IN THE SEA AREA OF RESPONSIBILITY OF UKRAINE
- Ivanov A. A., Avramenko M. M., Rastegina G. I., Timofeev K. V.** 20
HIGH VOLTAGE SIMULATOR FOR TRAINING OF SHIP PERSONNEL
- Nosov P. S., Zinchenko S. M., Ben A. P., Nahrybelnyi Ya. A.,
Dudchenko O. M.** 31
MODELS OF DECISION MAKING BY A NAVIGATOR UNDER
IMPLICIT AGREEMENTS WITH COLREG RULES
- Tovstokory O., Nesterenko V., Zavalniuk O.** 40
FEATURES OF TUGBOATS STABILITY CONTROL
IN MANEUVERING ON THE SHELF

ENGINEERING IN THE TRANSPORT INDUSTRY

- Samarin O. Ye.** 48
ENGINE FLYWHEEL WITH VARIABLE MOMENT OF INERTIA
- Khudiakov I., Gritsuk I, Pogorletsky D., Manzheley V.** 55
DIAGNOSTICS OF SHIP POWER PLANT USING ERS-500 TECHSIM
TRANSAS MIP LTD TRAINING SIMULATOR IN THE PROCESS OF
TRAINING OF ENGINEER OFFICERS
- Cheilytko A. A., Ilin C. V., Chernenko A. V. Ivanisova A. P.** 64
DEVELOPMENT OF STRUCTURAL MEASURES FOR
PROTECTION OF URBAN FACILITIES FROM NOISE

AUTOMATION AND COMPUTER INTEGRATED TECHNOLOGIES

- Barabash O. V.** 71
ECOLOGICAL HAZARD ASSESSMENT OF THE
ATMOSPHERIC AIR AT THE URBAN ECOSYSTEM
BY THE STATE OF THE DEPOSIT ENVIRONMENT
- Vryblevskiy R. Ye.** 79
INFORMATION SYSTEM FOR CONTROL OF MAGNETIC-PULSE
PROCESSING OF DETAILS OF SHIP POWER PLANTS
- Ischenko I. M., Goloshchapov S. S.** 87
ANALYSIS OF SEMICONDUCTOR FREQUENCY CONVERTERS WITH
ELECTRICAL AND MAGNETIC SUMMATION OF OUTPUT VOLTAGES AT
MAGNETIC FLUXES

Nahovsky D. A., Doschenko G. G. 97
CONTROL METHODS OF VESSEL'S THRUSTER
AT CHANGING OPERATING CONDITIONS

Polovinka E., Slobodyaniuk N. 109
SOFTWARE AND HARDWARE COMPLEX FOR DYNAMIC
MOTORLESS TESTS OF DIESEL ENGINE FUEL EQUIPMENT

Khlopenko N. J., Rozhkov S. A., Khlopenko I. N. 122
FILTRATION OF UNDESIRE SIGNALS BY THE ROBUST
CONTROLLER IN THE ROTOR FLUX-LINKAGE CONTROL SYSTEM

MATERIAL SCIENCE

**Brailo M. V., Kobelnik O. S., Saprionov O. O.,
Appazov E. S., Ludmila Dulebová** 134
STRESS-RELATED AND HEAT-TRANSFER
PROPERTIES OF EPOXY-POLYESTER COMPOSITES
FILLED WITH ACTIVATED CARBON

Sapronova A. V. 141
THE INFLUENCE OF ORGANIC FIBER CONTENT IN THE EPOXIDE
BINDER ON ADHESIVE AND COGESIVE STRENGTH OF THE
TRANSPORT TECHNICAL COATINGS

**Sizonenko O. M., Negrutsa R. Yu., Torpakov O. S.,
Buketova N. M., Pilypchuk N. A.** 151
INFLUENCE OF SYNTHESIZED POWDER TITANIUM-ALUMINUM
CHARGE ON MECHANICAL PROPERTIES OF EPOXYCOMPOSITES
FOR SEA AND RIVER TRANSPORT

Ternovyi Yu. F., Vodennikova O. S., Bilan V. I. 162
OBTAINING COMPLETE MARGANESE-BASED ADDITION
ALLOYS BY UTILIZING THE SPUTTERING METHOD OF LIQUID-
ALLOY BY WATER

APPLICATION REQUIREMENTS 168

Науковий журнал

НАУКОВИЙ ВІСНИК
ХЕРСОНСЬКОЇ ДЕРЖАВНОЇ МОРСЬКОЇ АКАДЕМІЇ

№ 1 (20), 2019

Відповідальний за випуск *Р. Є. Врублевський*
Технічний редактор *О. Ю. Клементьєва*
Коректор *Н. Грем*
Коректура англійської мови *А. С. Волкова, Л. В. Ліпиць*
Друк, фальцювальні-палітурні роботи *В. Г. Удов*

Підписано до друку 31.07.2019. Формат 84×108/32.
Папір офсетний.
Ум. др. арк. 11,0. Наклад 100 прим.

Видавець і виготовлювач ХДМА
Свідоцтво про державну реєстрацію ДК № 4319 від 10.05.2012
73000, м. Херсон, просп. Ушакова, 20