

І.М. Гвоздева, В.Ф. Миргород, Б.В. Жеков, О.М. Єрмошкін, Г.П. Грама
**ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ДАТЧИКА TRO
ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ СИСТЕМИ ОЧИЩЕННЯ БАЛАСТНИХ ВОД**

Анотація. З метою аналізу антропогенного впливу на екологію водних систем здійснено порівняльний аналіз методів і технологій, які застосовуються для очищення баластних вод на борту суден. Надійність роботи датчиків TRO (загального залишкового окислювача), які входять до складу суднової системи очищення баластних вод (СОБВ), залишається недостатньо високою, що обумовило проведення експериментальних досліджень їх характеристик під час експлуатації СОБВ Electro-Cleen™ System в усіх режимах її експлуатації (баластування, дебаластування та стрипінгу). Для підвищення надійності роботи СОБВ запропонована нова структура системи автоматичного управління, яка включає додатковий контур автоматичного корегування значень датчика TRO за допомогою PLC. Програмування додаткового PLC здійснене із застосуванням програмного забезпечення ALPHA PROGRAMMING.

Ключові слова. Система очищення баластних вод, датчик загального залишкового окислювача, система автоматичного управління, програмований логічний контролер, дебаластування

Постановка проблеми. Баластні системи є одними з основних суднових систем, які призначені для забезпечення остійності судна шляхом прийому та відкачування баластних вод у баластні танки. Під час здійснення операцій баластування/дебаластування відбувається забір/скидання баластних вод та осадів у акваторіях морів та океанів. Баластні води та осадки містять велику кількість бактерій, рослин і тварин, які можуть виживати в життєздатній формі на протязі кілька тижнів, що сприяє їх перенесенню у водні системи інших регіонів. При потраплянні в басейни морів або в водні потоки, ці організми можуть створювати небезпеку для навколишнього середовища, здоров'я людей, майна або ресурсів, погіршувати біологічне розмаїття та ін. Зростаючий сумарний тоннаж світового торгового флоту, який скидає щорічно до 10 млрд тон водяного баласту, в якому мешкає понад 7 тисяч видів морських тварин, бактерій та рослин, змусив звернути пильну увагу на проблему, пов'язану з антропогенним впливом на екологію водних систем внаслідок розселення інвазійних видів мікроорганізмів із-за скидання баластних вод з суден у самих різних районах Світового океану [1,2]. Цей процес, в силу своєї непередбачуваності, отримав назву “екологічна рулетка” [3,4].

Зростаюче міжнародне значення проблеми перенесення морських організмів з водним баластом та можливість завдання шкоди морському середовищу призвело до

створення відповідних законодавчих документів, як на регіональних рівнях, так і на рівні ООН та International Maritime Organization (ІМО) [5, 6]. Відповідно до Міжнародної конвенції ІМО “Охорона і управління судновими баластними водами і осадами” [7] стало необхідним впровадження систем управління баластними водами і систем очищення баластних вод на борту суден. СОБВ є складними судновими інженерними комплексами, які складаються з багатьох підсистем, вимірювання у яких здійснюється за допомогою багатьох датчиків та вимірювальних каналів. Незважаючи на високий рівень автоматизації процесів, які відбуваються у СОБВ, надійність роботи деяких датчиків залишається недостатньо високою та вимагає дослідження їх характеристик під час експлуатації СОБВ.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Міжнародна конвенція про контроль суднових баластних вод й осадів та управління ними (BWM) [1] є ключовим міжнародним документом, що регулює питання запобігання забрудненню морського середовища судновими баластними водами. Міжнародна конвенція включає два основні правила, які визначають стандарти управління баластними водами: правило D-1 визначає стандарт обміну баластними водами, правило D-2 деталізує стандарт очищення баластних вод з використанням СОБВ [7–9]. У символіку класів суден, на яких здійснюється управління судновими баластними водами і осадами шляхом заміни баласту в морі, вноситься спеціальний знак BWM, що підтверджує їх відповідність міжнародним вимогам щодо безпечної заміни баласту в морі. Для суден, які не мають на борту систем безпечної заміни баласту в морі, заміна водяного баласту в морі забороняється. Зовсім небагато часу залишається до повної заборони експлуатації суден без наявності на них СОБВ [9–11]. Сучасні судна, відповідно до вимог ІМО, в обов'язковому порядку оснащуються СОБВ, а судна, що знаходяться в експлуатації, модернізуються шляхом встановлення цих систем.

Для очищення баластних вод на суднах застосовується багато різних методів та технологій [8, 12]. Найбільш дієвим та ефективним є метод, який полягає в об'єднанні різних технологій та уможливорює двоступеневе очищення і знезараження баластних вод до рівня стандарту D-2.

Обробка баластних вод на борту суден зазвичай проводиться у два етапи: твердо-рідинне розподілення та дезінфекція [13]:

1. Твердо-рідинне розподілення: за допомогою фільтрації видаляються механічні домішки та великі організми.
2. Дезінфекція: знищення та/або деактивація мікроорганізмів різними методами, такими, як хімічна та/або фізико-хімічна інактивація (УФ-випромінювання (уф-промені), висока температура, кавітація), дезоксидація [9].

СОБВ є складними інженерними комплексами, що включають в себе різні компоненти. Враховуючи високий рівень автоматизації СОБВ, тобто насиченість різноманітними елементами (датчиками, виконавчими механізмами, лініями зв'язку тощо), їх сумарна надійність залишається недостатньо високою. Суворі морські умови, вібрація, вплив солоної води та інші фактори також можуть негативно впливати на надійність обладнання.

Для контролю відповідності очищеної води стандарту D-2 та ефективності роботи СОБВ використовується показник ТРО [10]. Концентрація ТРО вимірюється спеціальним датчиком, який визначає сумарний вміст дезінфікуючих речовин (хлору, діоксиду хлору) у воді. Точність та стабільність вимірювань ТРО може варіюватися під впливом різних факторів, таких, як тип та концентрація окислювача, температура та солоність води, наявність органічних речовин [11]. Ці фактори зумовлюють необхідність проведення досліджень, спрямованих на вдосконалення характеристик датчиків ТРО у складі СОБВ.

Значна більшість (89%) опитаних судновласників/операторів повідомили про проблеми, пов'язані зі збоями обладнання у системах обробки баластних вод (BWM) [15]. Це говорить про те, що надійність обладнання є серйозною проблемою при експлуатації таких систем. Наведемо неповний перелік відмов, що стосуються тільки блоку датчиків ТРО.

- Камера охолодження ТРО не працює.
- Пошкодження соленоїдного клапана коробки відбору проб ТРО.
- Засмічення зворотних клапанів ТРО.
- Несправність/відмова датчиків ТРО.
- Блок керування очищенням ТРО.
- Несправності датчиків ТРО, пов'язані з тиском в шафі, контролером очищення, зворотним клапаном, соленоїдними клапанами.
- Датчики ТРО, включаючи його систему відбору проб, проблема всмоктування бустерним насосом.
- Відмова реле датчика ТРО.
- Друкована плата ТРО пошкоджена.
- Нестабільні показання ТРО.
- Високі показання ТРО в ppm.
- Сигналізація високого рівня ТРО.
- Система відбору проб ТРО не працює.
- Некоректні показання ТРО через реагенти.
- Неможливість контролювати рівень ТРО при скиданні.
- Несправність зварювального насоса відбору проб ТРО.
- Датчик ТРО вийшов з ладу.
- Виявлено витік насоса дозування проб датчика ТРО.
- Пошкодження ТРО під тиском.
- Дефектний впускний соленоїдний клапан ТРО.
- Соленоїдний клапан датчика ТРО пошкоджений.

Наведений перелік демонструє низку відмов, які можуть виникнути у блоці датчиків ТРО в складі систем обробки баластних вод. Ці фактори зумовлюють необхідність досліджень, спрямованих на забезпечення на заданому рівні надійності датчиків ТРО та їх характеристик у складі СОБВ.

Метою даної роботи є аналіз роботи датчика ТРО (загального залишкового окислювача) в усіх режимах експлуатації системи очищення баластних вод Electro-Cleen™ System для забезпечення відповідності міжнародному стандарту D-2.

Матеріали та методи дослідження Викладення основного матеріалу дослідження. Для досягнення поставленої мети роботи досліджено СОБВ Electro-Cleen™ System (ECS), яка відповідає стандарту D-2. Робочі умови системи розраховані на продукування рівня ТРО від 1 мг/л до 10 мг/л. Система ECS має складну структуру та складається елементів, які представлені на рисунку 1.



Рисунок 1 – Елементи системи Electro-Cleen™ System:

- 1 – блок електричної камери; 2 – блок автоматичної нейтралізації;
3 – обладнання для розподілу електроенергії; 4 – блок датчиків ТРО; 5 – комп'ютер управління; 6 – блок датчика провідності; 7 – витратомірний блок; 8 – датчик температури прісної води; 9 – Т-подібний фільтр

У системі очищення баластних вод Electro-Cleen™ System (рис. 1) використовується двоетапний метод: перший етап – фільтрація: видалення механічних домішок та великих організмів; другий етап – додавання в цю воду сильного окислювача, отриманого електролітичним шляхом.

При електролізі морської води відбуваються складні електрохімічні процеси, які призводять до утворення різних хімічних сполук, що використовуються для дезінфекції баластних вод. Розглянемо основні процеси, що відбуваються при електролізі морської води в системах очищення баластних вод.

1. Електроліз солоної води:

На катоді: $2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2 + 2\text{OH}^-$ Вода відновлюється, утворюючи газоподібний водень (H_2) та гідроксид-іони (OH^-).

На аноді: $2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 4\text{H}^+ + \text{O}_2 + 4\text{e}^-$ Вода окислюється, утворюючи іони водню (H^+), газоподібний кисень (O_2) та вільні електрони (e^-).

2. Утворення гіпохлориту:

Хлор-іони (Cl^-), присутні в морській воді, окислюються на аноді:



Утворений хлор (Cl_2) реагує з гідроксид-іонами (OH^-), утворюючи гіпохлорит-іони (OCl^-):



Гіпохлорит-іони (OCl^-) є основним дезінфікуючим агентом, який знищує бактерії, віруси та інші мікроорганізми в баластній воді. Окиснення хлорид-іонів також призводить до утворення ефективної дезінфікуючої речовини – гіпохлориту.

3. Вплив рН:

рН морської води відіграє важливу роль у співвідношенні між різними формами активного хлору:

При $\text{pH} < 7$ переважає гіпохлористина (HClO) та хлорноватиста (HClO_3) кислоти, які є більш ефективними дезінфікуючими агентами, ніж гіпохлорит-іон (OCl^-).

При $\text{pH} > 7$ переважає гіпохлорит-іон (OCl^-).

Оптимальний рН для дезінфекції баластних вод зазвичай знаходиться в діапазоні 7-8.

У СОБВ Electro-Cleen™ System (ECS) енергія використовується для окиснення хлорид-іонів, що призводить до утворення ефективної дезінфікуючої речовини – гіпохлориту. Концентрація активних окислювачів, що утворюються при електролізі, повинна контролюватися для забезпечення ефективної дезінфекції та запобігання негативному впливу на навколишнє середовище. Ця концентрація залежить від напруги та струму в електролізері. Це дозволяє регулювати рівень TRO в автоматичному або ручному режимах, змінюючи співвідношення “напруга-струм”.

Надмірна концентрація окислювачів може бути шкідливою для морського середовища, тому необхідно суворо контролювати, щоб максимальна концентрація, яка вимірюється датчиком TRO у баластній воді, не перевищувала 10 мг/л (0,001%) [14].

СОБВ Electro-Cleen™ System має три основні режими роботи:

- Баластування: концентрація TRO має бути 6-10 мг/л.
- Дебаластування: концентрація TRO має бути < 1 мг/л.
- Стріпінг: концентрація TRO має бути < 1 мг/л.

В СОБВ ECS для вимірювання TRO використовується метод фотометрії з реагентом DPD (диметил-п-фенілендіаміном) для колориметричного визначення концентрації окислювача в баластній воді. Фотоколориметричний метод ґрунтується на взаємодії вимірюваної речовини (в даному випадку, хлору) з реагентом. Внаслідок цієї реакції утворюється сполука, забарвлення якої пропорційне концентрації окислювача. Фотоколориметр вимірює інтенсивність забарвлення отриманого розчину з допомогою світлового потоку. Промені світла проходять через ємність зі зразком і потрапляють на фотоелемент. Чим вище концентрація окислювача, тим інтенсивніше забарвлення розчину і тим менше світла досягає фотоелемента.

Фотоколориметричний датчик TRO містить наступні елементи:

- Джерело світла - зазвичай галогенова лампа або світлодіод.
- Світлопрозора ємність для зразка з відомими оптичними параметрами.

- Фотодетектор, який перетворює світловий сигнал на електричний.
- Фотофільтр, який відокремлює необхідну довжину хвилі світла для вимірювання (зелений спектр з довжиною хвилі 515 нм).
- Електронна схема, яка обробляє електричний сигнал і надсилає результат вимірювання на дисплей та до системи управління.

До чинників, що впливають на точність вимірювань TPO, належать:

- Регулярне калібрування датчика забезпечує точність вимірювань.
- Температура води: може впливати на інтенсивність забарвлення, швидкість реакції її, отже, на показання датчика.
- Наявність механічних забруднень: сторонні речовини у воді можуть спотворити результати вимірювань, забруднення датчика біоплівками або іншими відкладеннями знижує його чутливість і точність.
- Забруднення електродів датчика може призвести до зниження чутливості та точності вимірювань. (будь-яке забруднення веде до зміщення "0", тобто постійної помилки показань датчика).

Робота датчика TPO досліджувалася експериментально. Експеримент проводився під час кожної операції (баластування, дебаластування, стріпінгу), значення TPO були отримані вперше лише на основі спостережень за роботою системи в автоматичному режимі, вдруге – з допомогою ручного коригування. Для запобігання їхнього виходу за межі стандарту, оскільки після другого перевищення значень TPO система ECS зупиняє баластні операції та вимагає перезапуску. Результати вимірювань відображені на графіках.

На рис. 2 показано графік рівня TPO під час операції дебаластування в автоматичному режимі роботи ECS.

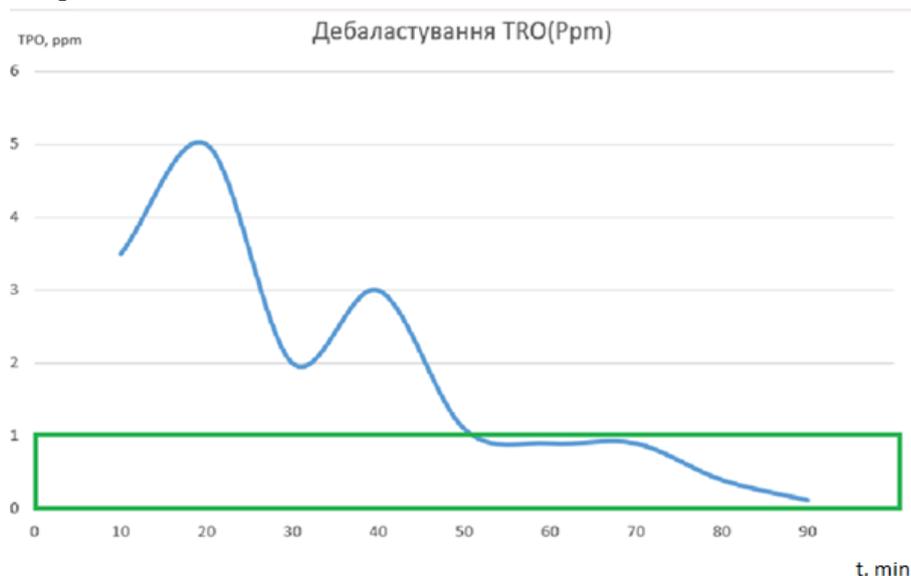


Рисунок 2 – Графік зміни рівня TPO під час дебаластування

Додатково з експериментальними дослідженнями роботи датчика TRO у автоматичному режимі роботи СОБВ ECS проведений експеримент, який містив етап ручного коригуванням рівня TRO. Під ручним коригуванням маються на увазі дві дії:

1. проведення позапланового калібрування датчика TRO
2. введення вручну величини рівня струму-напруги на електролізер, що й призводить до зміни рівня TRO на виході електролізера.

Умови додаткового експерименту були аналогічними. Результати зміни рівня TRO у часі при додатковому ручному коригуванні рівня TRO під час операції дебаластування представлені на рис. 3.

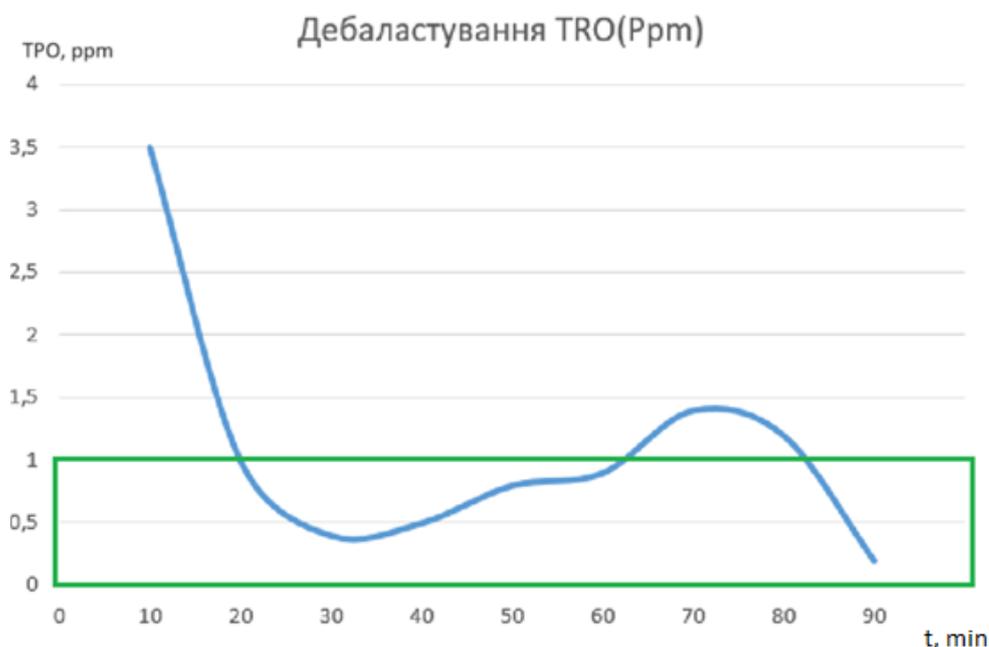


Рисунок 3 - Графік залежності TRO від часу при операції дебаластування (з використанням ручного способу коригування)

Результати експериментальних досліджень свідчать, що система є інерційною, стабілізація процесу у повністю автоматичному режимі керування відбувається приблизно за 50 хвилин. Вихід величини TRO за припустимі межі призводить до автоматичної зупинки баластних операцій. Повторне включення та уведення системи в нормальну роботу також займає тривалий час. Ці затримки негативно впливають на економічні показники роботи судна. Аналіз отриманих експериментальних даних свідчить про те, що без ручного коригування у СОБВ спостерігається коливання значень TRO та тривале повернення системи до заданих параметрів. Перелік можливих нештатних ситуацій наведений у таблиці 1.

Аналіз результатів експериментів показує, що для забезпечення відповідності очищення баластних вод стандарту D2 під час роботи СОБВ, необхідно інколи вимушено вручну коригувати значення TRO та протягом кожного з режимів спостерігати за значеннями TRO датчика.

Нештатні ситуації, пов'язані з рівнем TRO

Тривога та відключення в цьому рядку ігноруються протягом 120 секунд після початку операції	
Концентрація TRO > 3,0 ppm (після 240 секунд, режим баластування)	Тривога
Концентрація TRO > 3,0 ppm (після 360 секунд, режим баластування)	Відключення
Концентрація TRO < 2,5 ppm (після 240 секунд, режим баластування)	Тривога
Концентрація TRO < 2,5 ppm (після 360 секунд, режим баластування)	Зупинка
Концентрація TRO > 0,1 ppm (після 240 секунд, режим дебаластування)	Тривога
Концентрація TRO > 0,1 ppm (після 360 секунд, режим дебаластування)	Відключення
Ненормальний рівень TRO (після 10 секунд)	Тривога
Помилка датчика (після 60 секунд)	Відключення

Для максимального уникнення ручного коригування та покращення якості моніторингу системи ECS автори запропонували автоматизувати процес додаткового коригування датчика TRO за рахунок введення до системи додаткового контуру управління із застосуванням PLC FX1S-14MT-001 фірми Mitsubishi. Програмування контролера здійснене з допомогою програмного забезпечення ALPHA PROGRAMMING. Розроблена структурна схема системи очищення баластних вод з додатковим PLC при дебаластуванні наведена на рис. 4.

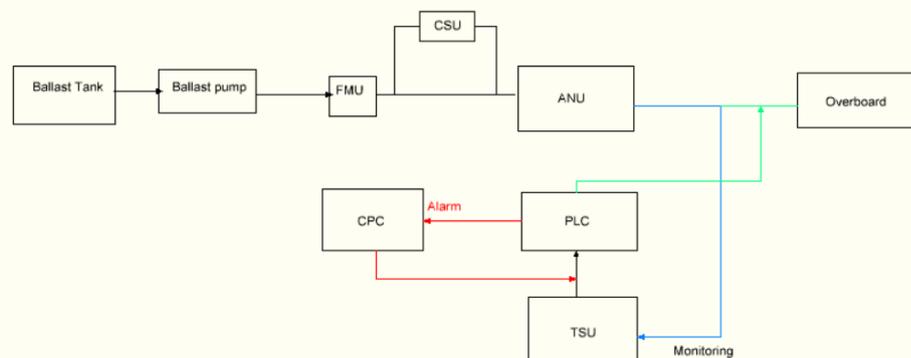


Рисунок 4 – Структурна схема системи очищення баластних вод з додатковим PLC при дебаластуванні

На рис. 4 застосовані наступні позначення: Balast tank – баластний танк, Balast pump – баластний насос, FMU – витратомірний блок, CSU – датчик провідності, ANU – блок автоматичної нейтралізації, CPC – центральний ПК, PLC – запропонований програмований контролер, TSU – блок датчиків TRO.

У схемі, наведеної на рис. 4, передбачено, що сигнал з TSU (Transmitting Switching Unit – блок перемикання передачі) буде в будь-якому випадку поданий на

створений додатковий PLC. Після чого, якщо PLC прочитає некоректні дані рівня TRO, то на CPC (Central Processing Unit – центральний процесорний блок) буде подаватися лише сигнал тривоги, але вже програмований додатковий контролер виправить ситуацію з концентрацією TRO, і у цьому випадку буде поданий управляючий сигнал, що вода може бути скинута у баластний танк.

На рис. 5 зображена блок-схема алгоритму роботи PLC в TSU при здійсненні операції дебаластування. Як можна побачити з рисунку, система ESC працює в нормальному режимі при значеннях TRO від 0 до 1 ppm. Блок-схема програми демонструє роботу додаткового PLC під час дебаластування в умовах, коли система ESC працює в нормальному режимі при значеннях TRO від 0 до 1 ppm, та більше, ніж 1 ppm (червоні лінії). З аналізу алгоритму видно, що у випадку, коли значення реагенту більше, ніж 1 ppm, відбувається циркуляція води, спрацьовує сигналізація та значення рівня TRO повертається до норми.

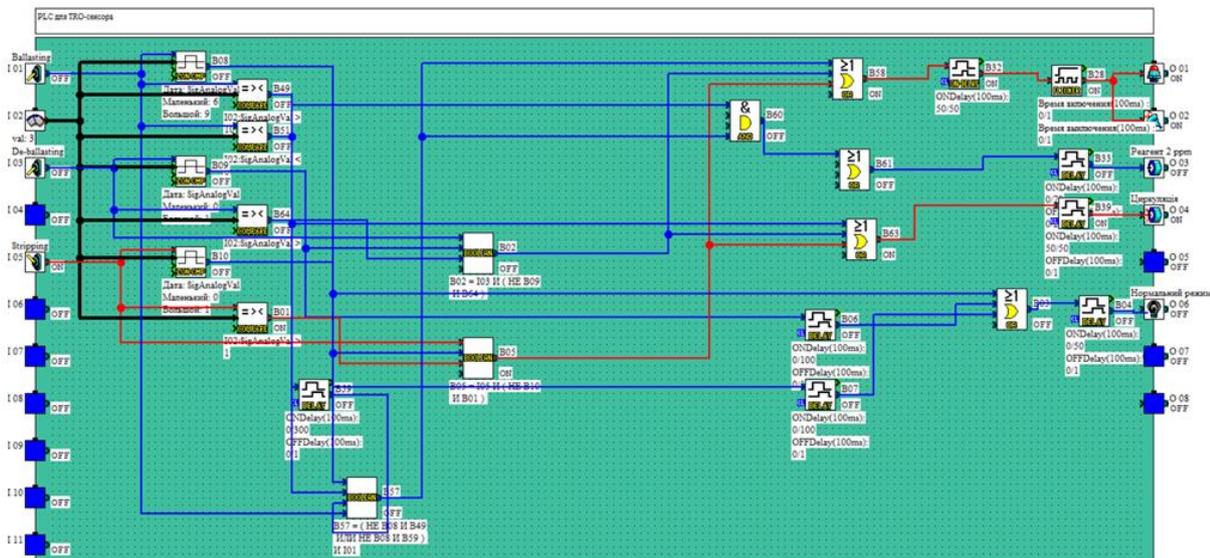


Рисунок 5 – Блок-схема програми роботи додаткового PLC під час дебаластування в умовах, коли значення TRO більше, ніж 1 ppm.

Реалізація розробленого програмного забезпечення додаткового PLC дозволила здійснити автоматичне корегування рівнів TRO та прискорення процесу виходу системи до заданих параметрів при виконанні операцій баластування, дебаластування та стріпінгу.

Висновки. За результатами проведеного дослідження встановлено, що аби операції баластування, дебаластування та стріпінгу баластних вод відповідали стандарту D2, доцільно ввести до складу системи додатковий контур автоматичного корегування значень датчика TRO за допомогою PLC. Реалізація розробленого програмного забезпечення додаткового PLC дозволила здійснити автоматичне корегування рівнів TRO та зменшення коливань та часу виходу системи до заданих параметрів при виконанні операцій баластування, дебаластування та стріпінгу. Результати проведених досліджень

можуть бути використані для аналізу процесів контролю та для оптимізації управління ECS у системах очищення баластних вод морських суден.

ЛІТЕРАТУРА

1. Александров Б. Г. Теоретичні основи управління якістю водного середовища за допомогою твердих субстратів. *Доп. НАН України*. 2001. № 5. С. 181–184.
2. Александров Б. Г. Проблема перенесення водних організмів суднами та деякі підходи до оцінки ризику нових інвазій. *Морський екологічний журнал*. 2004. № 1. С. 5–17.
3. Cockell S.J., Geller J., Linden W. The development of a decisional balance scale for anorexia nervosa. *European Eating Disorders Review*. 2002. № 10. P. 356–357.
4. Cockell S.J., Geller J., Linden W. Decisional balance in anorexia nervosa: Capitalizing on ambivalence. *European Eating Disorders Review*. 2003. № 11. P. 75–89.
5. Ballast Water Management.
URL: <http://www.imo.org/OurWork/Environment/BallastWaterManagement/Pages/Default.aspx>.
6. Ballast water treatment technologies and current system availability. Part of Lloyd's Register's Understanding Ballast Water Management series. London, 2012. URL: http://www.lr.org/Images/BWT2012v2b_tcm155-242898.pdf.
7. International Convention for the Control and Management of Ships' Ballast Water and Sediments (2004). International Maritime Organization.
URL: [https://www.imo.org/en/About/Conventions/Pages/International-Convention-for-the-Control-and-Management-of-Ships%27-Ballast-Water-and-Sediments-\(BWM\).aspx](https://www.imo.org/en/About/Conventions/Pages/International-Convention-for-the-Control-and-Management-of-Ships%27-Ballast-Water-and-Sediments-(BWM).aspx).
8. International Convention for the Prevention of Pollution from Ships (MARPOL).
URL: [https://www.imo.org/en/about/Conventions/Pages/International-Convention-for-the-Prevention-of-Pollution-from-Ships-\(MARPOL\).aspx/](https://www.imo.org/en/about/Conventions/Pages/International-Convention-for-the-Prevention-of-Pollution-from-Ships-(MARPOL).aspx/)
9. Мельник О.М., Волошин А.О., Онищенко О.А., Логінов О.В., Щебрина О.В. (2022) Огляд процесу модернізації та оснащення суден системами очищення баластних вод. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського*. Серія: Технічні науки. Том 33 (72) № 5. С. 299–304.
10. Melnyk, O., Onyshchenko S. (2022) Ensuring Safety of Navigation in the Aspect of Reducing Environmental Impact. ISEM 2021, LNNS 463, pp. 1–9. https://doi.org/10.1007/978-3-031-03877-8_9
11. Melnyk, O., Bychkovsky, Y., Voloshyn, A. (2022) Maritime situational awareness as a key measure for safe ship operation. *Scientific Journal of Silesian university of Technology*. Series Transport. 114, 91–101. ISSN: 0209-3324. <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2022.114.8>.
12. Горбов В.М., Мітенкова В.С., Тимофеева А.С. Порівняльна оцінка енергетичної ефективності способів обробки баластних вод. *Науковий вісник Херсонської державної морської академії*. 2013. № 1 (8). С. 35–44.
13. Ballast Water Management. Електронний ресурс. Режим доступу: <http://www.imo.org/OurWork/Environment/BallastWaterManagement/Pages/Default.aspx>.
14. Жеков Б.В., Гвоздева І.М., Грама Г.П., Єрмошкін О.М. Експериментальне дослідження роботи датчика загального залишкового окислювача суднової системи очищення баластних вод. Матеріали XIV міжнародної науково-технічної конференції «Судно-»

ва електроінженерія, електроніка і автоматика» (м. Одеса, 19.11.2024 - 20.11.2024). Одеса: НУ ОМА, 2024. С. 9–13.

15. Best Practices for Operations of Ballast Water Management Systems Report. *American Bureau of Shipping*. Advisory Services. Date: 18 March 2019. © 2019 American Bureau of Shipping.

REFERENCES

1. Aleksandrov B. G. Theoretical foundations of water quality management using solid substrates. *Supplement of the NAS of Ukraine*. 2001. No. 5. P. 181–184.
2. Aleksandrov B. G. The problem of the transfer of aquatic organisms by ships and some approaches to assessing the risk of new invasions. *Marine Ecological Journal*. 2004. No. 1. P. 5–17.
3. Cockell S.J., Geller J., Linden W. The development of a decisional balance scale for anorexia nervosa. *Evropean Eating Disorders Review*. 2002. № 10. P. 356–357.
4. Cockell S.J., Geller J., Linden W. Decisional balance in anorexia nervosa: Capitalizing on ambivalence. *Evropean Eating Disorders Review*. 2003. № 11. P. 75-89.
5. Ballast Water Management.
URL: <http://www.imo.org/OurWork/Environment/BallastWaterManagement/Pages/Default.aspx>.
6. Ballast water treatment technologies and current system availability. Part of Lloyd's Register's Understanding Ballast Water Management series. London, 2012.
URL: http://www.lr.org/Images/BWT2012v2b_tcm155-242898.pdf.
7. International Convention for the Control and Management of Ships' Ballast Water and Sediments (2004). International Maritime Organization. URL: [https://www.imo.org/en/About/Conventions/Pages/International-Convention-for-the-Control-and-Management-of-Ships%27-Ballast-Water-and-Sediments-\(BWM\).aspx](https://www.imo.org/en/About/Conventions/Pages/International-Convention-for-the-Control-and-Management-of-Ships%27-Ballast-Water-and-Sediments-(BWM).aspx).
8. International Convention for the Prevention of Pollution from Ships (MARPOL). URL: [https://www.imo.org/en/about/Conventions/Pages/International-Convention-for-the-Prevention-of-Pollution-from-Ships-\(MARPOL\).aspx/](https://www.imo.org/en/about/Conventions/Pages/International-Convention-for-the-Prevention-of-Pollution-from-Ships-(MARPOL).aspx/)
9. Melnyk O.M., Voloshyn A.O., Onyshchenko O.A., Loginov O.V., Shchebryna O.V. (2022) Review of the process of modernization and equipping ships with ballast water treatment systems. *Scientific notes of the V.I. Vernadsky Tavrichesky National University*. Series: Technical Sciences. Vol. 33 (72) No. 5. pp. 299–304.
10. Melnyk, O., Onyshchenko S. (2022) Ensuring Safety of Navigation in the Aspect of Reducing Environmental Impact. ISEM 2021, LNNS 463, pp. 1–9. https://doi.org/10.1007/978-3-031-03877-8_9
11. Melnyk, O., Bychkovsky, Y., Voloshyn, A. (2022) Maritime situational awareness as a key measure for safe ship operation. *Scientific Journal of Silesian university of Technology*. Series Transport. 114, 91-101. ISSN: 0209-3324. <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2022.114.8>.
12. Gorbov V.M., Mitenkova V.S., Tymofeeva A.S. Comparative assessment of energy efficiency of ballast water treatment methods. *Scientific Bulletin of the Kherson State Maritime Academy*. 2013. No. 1 (8). P. 35-44.

13. Ballast Water Management.

URL:<http://www.imo.org/OurWork/Environment/BallastWaterManagement/Pages/Default.aspx>.

14. Zhekov B.V., Gvozdeva I.M., Grama G.P., Yermoshkin O.M. Experimental study of the operation of the general residual oxidant sensor of the ship's ballast water treatment system. Proceedings of the XIV International Scientific and Technical Conference "Marine Electrical Engineering, Electronics and Automation" (Odessa, 19.11.2024 - 20.11.2024). Odesa: NU OMA, 2024. P. 9-13.

15. Best Practices for Operations of Ballast Water Management Systems Report. *American Bureau of Shipping*. Advisory Services. Date: 18 March 2019. © 2019 American Bureau of Shipping.

Received 14.08.2025.

Accepted 19.08.2025.

Study of TRO sensor characteristics during operation of ballast water treatment system

Ballast water and sediments contain a large number of bacteria, plants and animals that can be transferred to water systems in other regions. To reduce the anthropogenic impact on the ecology of water systems, in accordance with the IMO International Convention "Protection and Management of Ships' Ballast Water and Sediments", the implementation of ballast water treatment systems (BWTS) on board ships has become mandatory. Based on a comparative analysis of the methods and technologies used in BWTS, it was found that the most effective and efficient method is one that combines different technologies and enables two-stage treatment and disinfection of ballast water to the level of the D-2 standard.

To monitor the compliance of purified water with the D-2 standard and the efficiency of the BWTS operation, the TRO (total residual oxidant) concentration indicator is used, which is measured by a special sensor that determines the total content of disinfectants in water. The reliability of the TRO sensors remains insufficiently high, which necessitated experimental studies of their characteristics during the operation of the BWTS Electro-Cleen™ System in all modes of its operation (ballast, deballast and stripping). In the BWTS ECS, the photometry method with the DPD reagent is used to measure TRO for colorimetric determination of the oxidant concentration in ballast water.

To improve the quality of monitoring and increase the reliability of the BWTS ECS operation, the authors proposed to introduce an additional control loop into the system using the Mitsubishi PLC FX1S-14MT-001. The programming of the proposed PLC was carried out using the ALPHA PROGRAMMING software.

The results of the research can be used to analyze control processes and optimize the ballast water treatment systems of sea vessels.

Keywords: Ballast water treatment system, total residual oxidant sensor, automatic control system, programmable logic controller, deballast

Гвоздева Ірина Маратівна – доктор технічних наук, завідувач кафедри електрообладнання і автоматики суден Національного університету “Одеська морська академія”, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5797-0559>

Миргород Володимир Федорович – доктор технічних наук, професор кафедри автоматизації суднових енергетичних установок Національного університету “Одеська морська академія”, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8361-1672>

Жеков Богдан Васильович – магістр Національного університету “Одеська морська академія”, ORCID:

Єрмошкін Олексій Миколайович – старший викладач кафедри електрообладнання і автоматики суден Національного університету “Одеська морська академія”, ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-4435-4316>

Грама Геннадій Петрович – кандидат педагогічних наук, доцент кафедри електрообладнання і автоматики суден Національного університету “Одеська морська академія”, ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-6032-9196>

Hvozdeva Iryna – Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Electrical Equipment and Ship Automation of the National University “Odesa Maritime Academy” , ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5797-0559>

Myrhorod Volodymyr – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Automation of Ship Power Plants of the National University “Odesa Maritime Academy” , ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8361-1672>

Zhekov Bohdan – a master of the National University “Odesa Maritime Academy” , ORCID:

Yermoshkin Oleksiy – Senior Lecturer at the Department of Electrical Equipment and Ship Automation of the National University “Odesa Maritime Academy”, ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-4435-4316>

Gramma Gennadiy – Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor of the Department of Electrical Equipment and Ship Automation of the National University “Odesa Maritime Academy” , ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-6032-9196>