

[6] Johansen, T., Fossen, T.I.: Control allocation—A survey. In. Automatica, vol.49, pp. 1087–1103 (2013)

[7] V. L. Timchenko, D.O. Lebedev, Algorithmic Procedures Synthesis of Robust-Optimal Control for Moving Objects, In: Y.P. Kondratenko, V.M. Kuntsevich, A.A. Chikrii, V.F. Gubarev (Eds.), Recent Developments in Automatic Control Systems, Series in Automation, Control and Robotics, River Publishers, Gistrup (2022) pp. 289-323. (2022) ISBN: 978-87-7022-674-5/

### **Robust-Optimal Control for Marine Moving Objects**

V.L. Timchenko, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine, vl.timchenko58@gmail.com

**Abstract.** The control of transient processes of a wide class of moving objects described by ordinary nonlinear differential equations requires development of robust-optimal systems with variable structure. The solution of this problem is suggested using general algorithmic procedure for constructing optimal trajectories, determining switching moments and synthesizing control functions for multidimensional systems. The control of the mismatch between the trajectory of a physical object and the optimal model calculated trajectory allows to take into account the values of the optimal control and to form a robust subsystem, which provides invariance to incomplete information about the moving object.

**Keywords.** Robust-optimal control, variable-structure system, marine moving object, quadrotor UAV

УДК 626.02

## **АВАРІЯ ПА «ТИТАН» КОМПАНІЇ OCEAN GATE – УРОКИ ТРАГЕДІЇ: ВІД ПРОРИВНОГО СТАРТАПУ ДО ГЛИБОКОВОДНОЇ КАТАСТРОФИ**

**Трушляков Є.І.,**

*д-р техн. наук, професор,*

*професор кафедри кондиціювання та рефрижерації Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова,  
eugeniy.trushliakov@nuos.edu.ua*

**Анотація:** Проаналізовано відомі з відкритих джерел матеріали, щоб зрозуміти фактори, що призвели до катастрофічної загибелі ПА «Титан» у червні 2023 року при зануренні до «Титаніка», та допомогти гарантувати, що подібна трагедія не повториться у майбутньому.

**Ключові слова:** підводний апарат, глибоководна аварія, вуглепластиковий корпус, циклічні навантаження, система життєзабезпечення, безпека екіпажу.

19 червня 2023 року в Атлантичному океані зник підводний апарат компанії Ocean Gate «Титан», який вирушив дослідити уламки «Титаніка». ПА перестав виходити на зв'язок приблизно через 1 годину 45 хвилин після занурення. На борту були п'ятеро людей — два члени екіпажу на чолі з керівником самої компанії і три пасажери. Судно шукали близько чотирьох діб, доки у четвер, 22 червня, не було виявлено уламки апарату. Пізніше в Береговій охороні США заявили, що ПА вибухнуло від сильного тиску. Ocean Gate Expeditions, компанія-оператор зниклого апарату «Титан», визнала його екіпаж загиблим.

«Титан» — це дослідницький підводний апарат з максимальною глибиною занурення до 4000м, який може перевозити максимум п'ять осіб, зазвичай пілота та чотирьох «фахівців місії», серед яких можуть бути археологи, морські біологи або будь-хто, хто може дозволити собі такий досвід як турист. Ocean Gate розпочала розробку підводного апарату, попередньо

названого «Cyclops 2», із композитного вуглецевого волокна та титанового корпусу у співпраці з Лабораторією прикладної фізики Вашингтонського університету у 2013 році. В квітні 2018 року Стоктон Раш (Stockton Rush), керівник та засновник компанії Ocean Gate, наголосив про початок експлуатації апарату. В жовтні 2019р. «Cyclops 2» було перейменовано у «Титан». Ocean Gate почала проводити експедиції до «Титаніку» у 2021 році. Одне місце на човні коштувало біля 250 тисяч доларів. З 2021 року компанія зробила не менше 15 занурень та спустила на місце катастрофи «Титаніка» близько 60 туристів та 15 дослідників.

У прес-релізі від 2022 року компанія Ocean Gate особливо наголосила на досвіді НАСА в галузі композитних корпусів, завдяки чому вдалося знизити вагу експериментального судна «Титан» настільки, щоб доставляти туристів на дно океану. «Можливість створення міцного корпусу "Титану" з використанням вуглецевого волокна аерокосмічного класу та виробничих протоколів дозволила створити підводний апарат, який важить у рази менше, ніж інші глибоководні занурювані апарати з екіпажем, — сказав Раш. — Це зниження ваги дозволяє нам нести значно велике корисне навантаження, яке ми використовуємо для перевезення п'яти членів екіпажу: пілота, дослідників та фахівців».

Центральна частина міцного корпусу апарату є циліндричною трубою довжиною 2,4 м з внутрішнім діаметром 1,42 м, що складається з 800 шарів вуглецевого волокна з товщиною стінки 127 мм. Дві напівсфери з титану закривають карбонову трубу через приклеєні титанові кільця. Для захисту від морської води на шов та циліндр напилено поліуретановий еластомер. У напівсферу, що відкидається, вбудований лінзовидний акриловий ілюмінатор із зовнішнім діаметром 0,53 м і масою 40 кг. На додаток до відсіку екіпажу «Титан» включає посадкову конструкцію і зовнішню оболонку зі скловолоконного композиту, які кріпляться болтами до титанових сполучних кілець. Загалом «Титан» має розміри 6,70 м × 2,80 м × 2,50 м і важить 9525 кг при максимальному корисному навантаженні 685кг. Він рухається зі швидкістю до 5,6 км/год із використанням чотирьох електричних двигунів, розташованих у два ряди по горизонталі та два по вертикалі. Система життєзабезпечення розрахована на 23 години штатної роботи + 72 години додатково у разі аварійної ситуації. Як елемент безпеки ПА використовує запатентовану систему моніторингу стану корпусу в режимі реального часу, яка аналізує тиск на судно та цілісність конструкції. Будь-які виявлені проблеми викликали б «ранне попередження» пілота, щоб залишити «достатньо часу для... безпечного повернення на поверхню».

OceanGate була націлена на те, щоб порушити процес освоєння океану, стверджуючи, що її технологія настільки доскональна, що робить стандарти безпеки, що широко використовуються, неактуальними. Ocean Gate — це частина «блакитної економіки», яку інвестори вигадали для стартапів, покликаних заробляти гроші, використовуючи можливості Світового океану, переважна більшість яких залишаються недостатньо дослідженими та недостатньо комерціалізованими.

Але ще у 2018 році керівник морських операцій компанії Ocean Gate Девід Локрідж (David Lochridge) попереджав керівництво про небезпеку використання ПА, але його було звільнено. Комітет Manned Underwater Vehicles з Marine Technology Society ще у 2018 році направив лист Стоктону Рашу за підписом 38 його експертів, в якому висловлював стурбованість тим, що компанія у своїх розробках не оцінює ризики та не консультується з експертами з профільних агентств. На це Раш відповів, що регулювання галузі стримує інновації. Локрідж та інші експерти неодноразово говорили, що не було проведено сканування корпусу або лінії з'єднання, щоб перевірити наявність відшарування, пористості та порожнечі достатньої адгезії клею, що використовувався через товщину корпусу (Локріджу повідомили, що обладнання для проведення такої перевірки не існує). Через два роки після цього у послужному списку «Титану» виник дуже дивний випадок. У корпусі апарату було виявлено ознаки втоми матеріалу та граничну глибину занурення знизили до 3000 м, хоча мета комерційного застосування ПА для підводного туризму – «Титанік» –

лежить на глибині 3750 м. За деякими джерелами, корпус ПА було відремонтовано, за іншими — замінено. На офіційному сайті компанії про цю критично важливу для безпеки екіпажу деталі інформації не було.



На підставі аналізу конструкції ПА «Титан» виділимо найбільш слабкі її елементи: місця склеювання вуглепластикового корпусу з титановими кільцями; ілюмінатор, який невідомо точно, який тиск витримував; і поведінка вуглепластика при циклічному навантаженні/розвантаженні. Використовуючи маловивчений у поведінці на великих глибинах матеріал, компанія також обрала складно зчленовану конструкцію корпусу, який складається з вуглеволоконної труби циліндричної форми з прикріпленими до неї в торцях титановими напівсферами. Тоді причиною загибелі ПА та його екіпажу може бути руйнування або вуглепластикового корпусу або акрилового ілюмінатора. Однією з можливих причин катастрофи могла бути поломка люка з болтами, який використовувався для герметизації апарату, або протікання між кришкою і корпусом. Така пригода також спричинила б руйнування корпусу ПА. Другою можливою причиною могли стати помилки на стадії конструювання корпусу апарату, який не витримав тиску води.

Таким чином, підсумовуючи відомі факти щодо конструкції апарату та умов його експлуатації, можливо зробити висновки, що при проектуванні «Титану» було проігноровано загальноприйняті способи створення та експлуатації підводних апаратів. Це і спричинило катастрофу, жертвами якої стали п'ятеро людей.

### CATASTROPHE OF OCEAN GATE'S "TITAN" – LESSONS OF THE TRAGEDY: FROM BREAKTHROUGH STARTUP TO DEEP SEA DISASTER

Trushliakov Eugeny, Doctor of Tech. Sc., Professor

Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolayiv, Ukraine

**Annotation:** An analysis of known open source materials was performed to understand the factors that led to the catastrophic death of manned underwater vehicle "TITAN" in the June 2023 sinking of the "TITANIC", and to help ensure that a similar tragedy does not happen again in the future.

**Key words:** Manned Underwater Vehicle, Carbon Fiber Hull, Cyclic Loads, Life Support System, Deep Sea Disaster, Crew Safety.